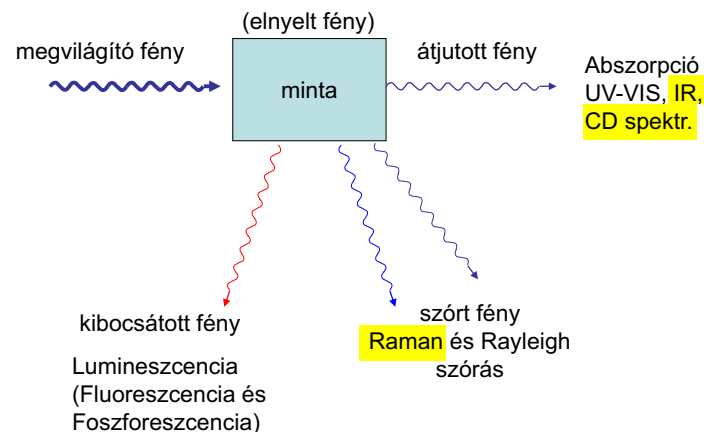


Infravörös és CD spektroszkópia a fehérjeszerkezet vizsgálatában

Smeller László

Mi történhet, ha egy mintát fénnyel világítunk meg?

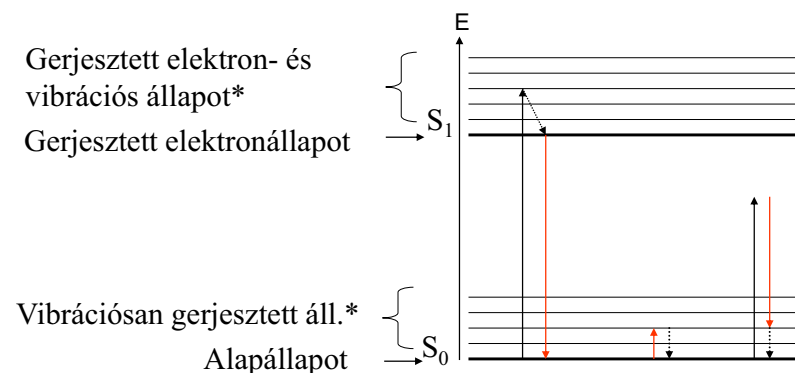


Abszorpciós és emissziós spektroszkópia

- Az átjutott vagy kibocsátott fény analízálása a hullámhossz függvényében.
- Információ:
 - atomok, molekulák azonosítása,
 - molekuláris szintű szerkezetváltozások (konformációváltozások) detektálása,
 - koncentráció meghatározás

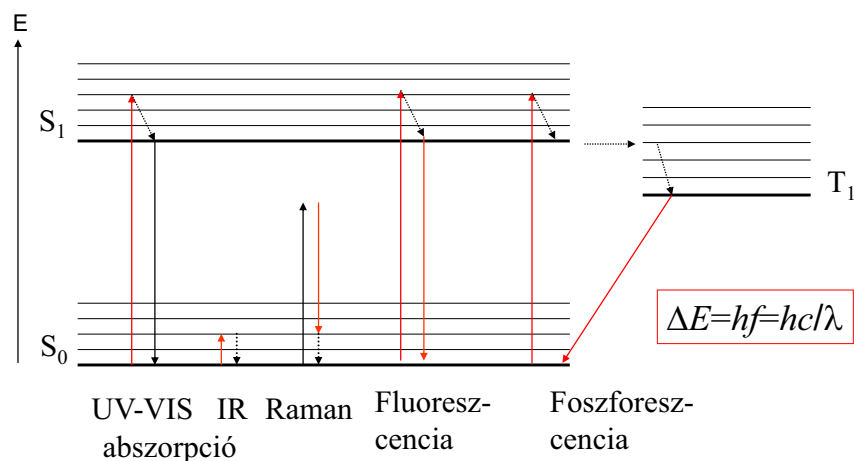
Miért nyel el ill. bocsát ki fényt egy atom v. molekula?

- Energiaátmenet: ld. Jablonski diagram

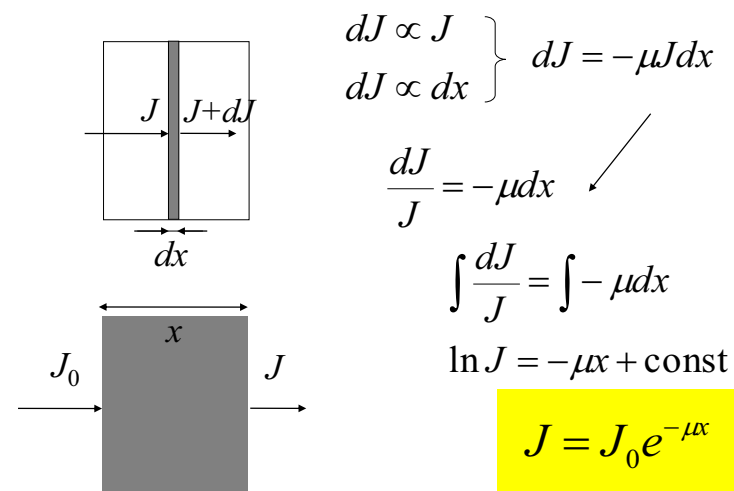


*csak molekuláknál!

Miért nyel el ill. bocsát ki fényt egy atom v. molekula?



Abszorpciós spektroszkópia Abszorpciós törvény



Abszorpciós spektroszkópia Lambert-Beer törvény

Elvi alapja: abszorpciós törvény: $J = J_0 \cdot e^{-\mu x}$
ahol $\mu(\text{anyag}, c, \lambda)$

- Lambert-Beer törvény:

$$A = \lg \frac{J_0}{J} = \varepsilon(\lambda) c x$$

- spektrum: $A(\lambda)$
- mérés: spektrofotométer
- referencia oldat (J_0)
- információ: azonosítás
koncentráció.

UV-VIS abszorpciós spektroszkópia

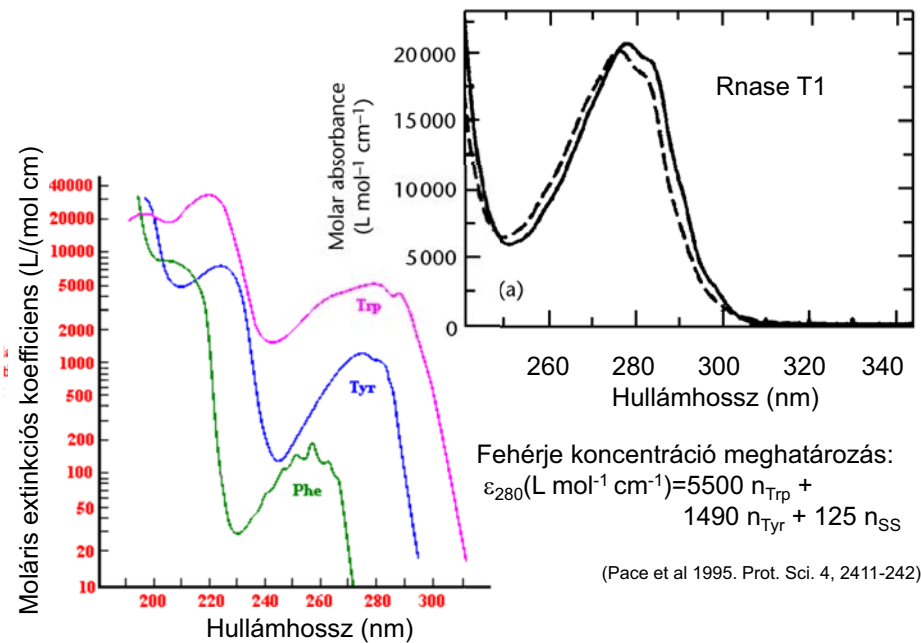
Mi abszorbeál a fehérjékben?

Molekularész	$\lambda_{\max}(\text{nm})$	$\varepsilon(\text{L/cm mol})$
Trp	280	5600
Tyr	274	1400
Phe	257	200
Diszulfid híd	250-270	300
Peptidkötés	190-230	

Fehérje koncentráció meghatározás:

$$\varepsilon_{280}(\text{L mol}^{-1}\text{cm}^{-1}) = 5500 n_{\text{Trp}} + 1490 n_{\text{Tyr}} + 125 n_{\text{SS}}$$

(Pace et al 1995. Prot. Sci. 4, 2411-242)

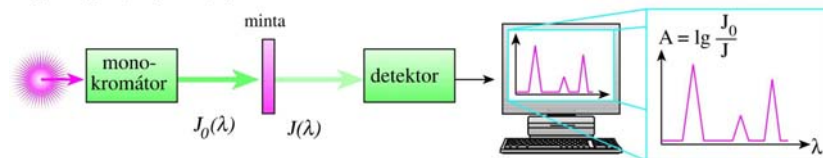


Infravörös spektroszkópia

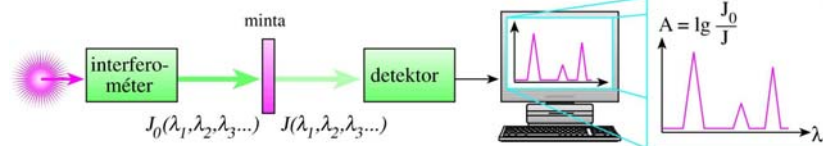
- Infravörös fény: $\lambda = 800 \text{ nm} - 1 \text{ mm}$
közép infra tartomány: $2,5\text{-}50 \mu\text{m}$
- abszorpciós spektroszkópia
- az elnyelt infravörös sugárzás molekularezgéseket kelt
- érzékeny a molekulaszervezetre
- speciális detektálás: FT spektrométer (FTIR spektroszkópia)

Az infravörös spektrum mérése: Fourier transzformációs spektrométer

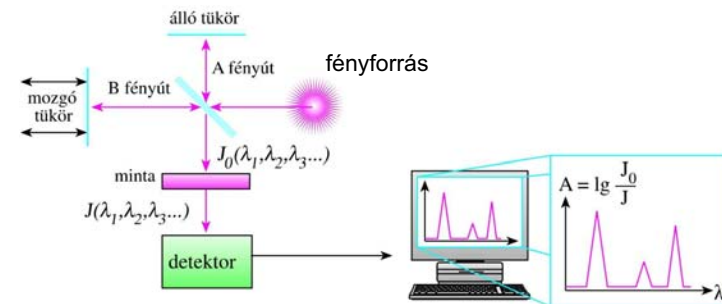
hagyományos (diszperziós) spektrométer



Fourier transzformációs spektrométer

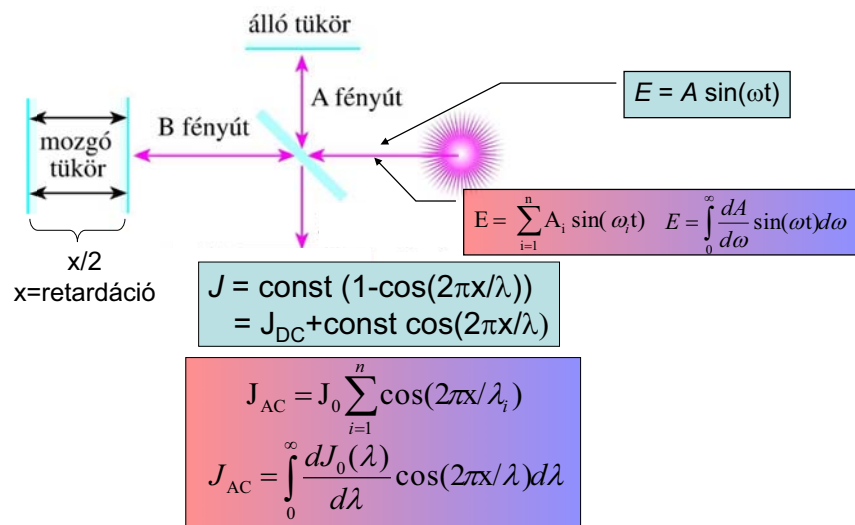


tk 6.17 ábra



tk 6.18 ábra

FTIR elve részletesen



Fourier transzformáció

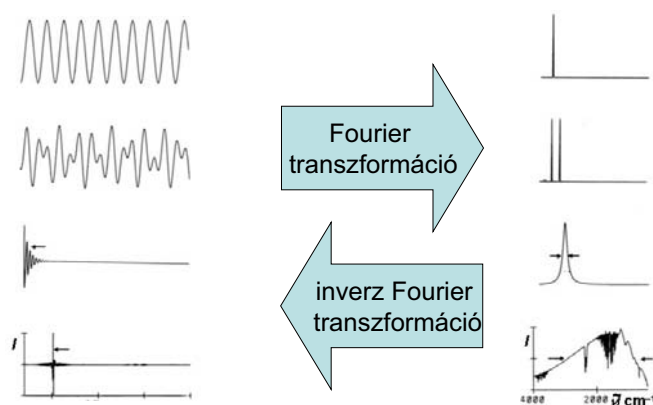
Egy $f(t)$ függvény Fourier transzformáltja a $g(x)$ függvény:

$$F(f(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-2\pi i \nu t} dt = g(\nu)$$

A Fourier transzformáció inverze:

$$F^{-1}(g(\nu)) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) e^{2\pi i \nu t} d\nu = f(t)$$

A Fourier transzformáció szemléltetése



A spektrum számolása a Fourier transzformációs spektrométerben

Az interferométeren keresztüljutott sugárzás:

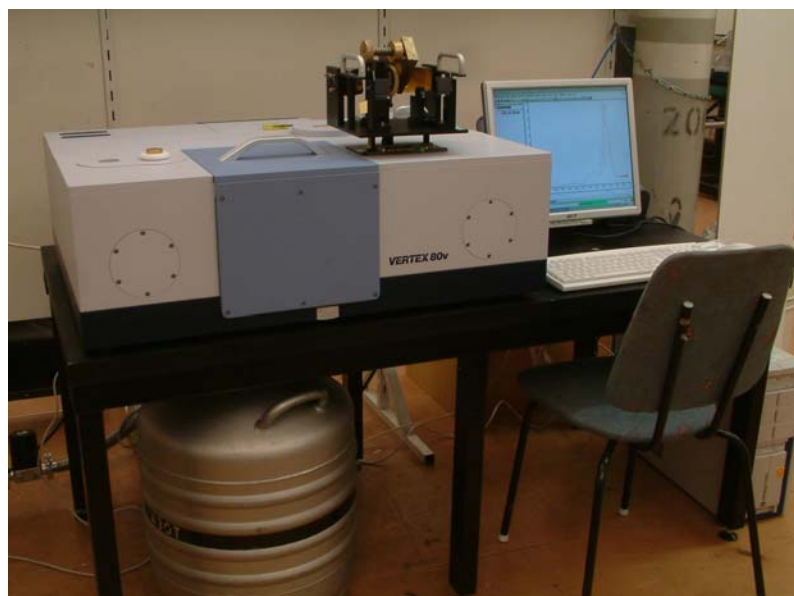
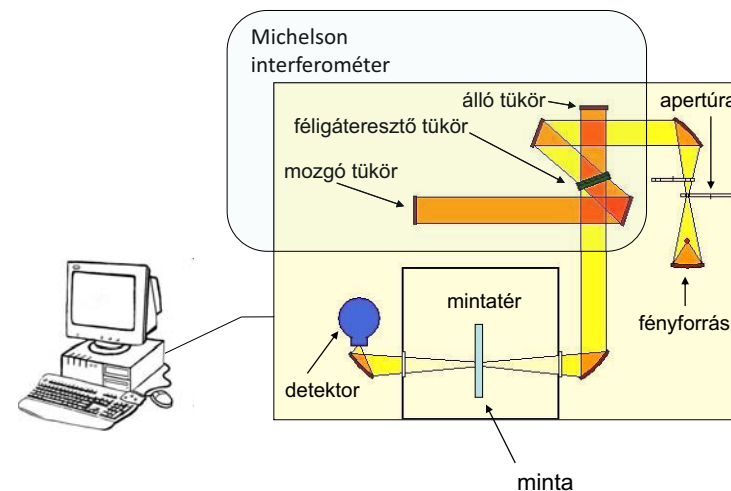
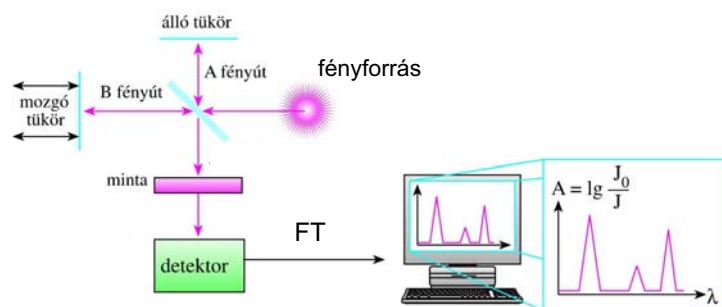
$$J_{AC} = \int_0^\infty \frac{dJ_0(\lambda)}{d\lambda} \cos(2\pi x/\lambda) d\lambda$$

éppen a $\frac{dJ_0(\lambda)}{d\lambda}$ mennyiség *cosinus* transzformáltja

A spektrum a $\frac{dJ_0(\lambda)}{d\lambda}$ -nek a mintán való

áthaladása után megmaradt részének és a

$\frac{dJ_0(\lambda)}{d\lambda}$ -nak a hányadosa (transzmissziós spektrum)

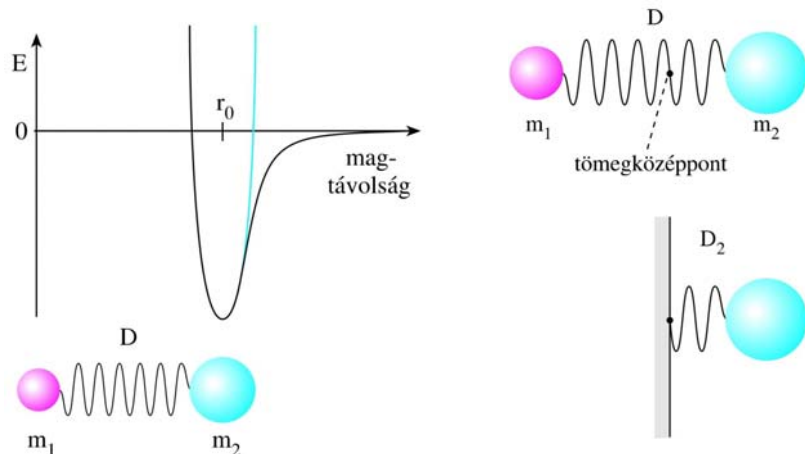


Molekularezgések

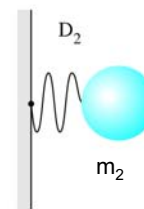
Az elektronok könnyűek, gyorsan követik az atommag mozgását, ezért az atommagok rezgéseit az elektronok nem befolyásolják.

A klasszikus fizikai leírásban az atommagok közti kötést, egy rugóval vesszük figyelembe.

Molekularezgések: kétatomos molekula

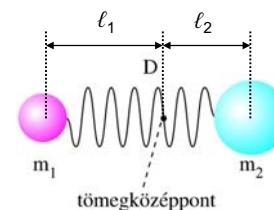


a középiskolából ismert:



$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D_2}{m_2}}$$

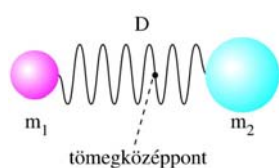
$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{l_1}{l_2} = \frac{\Delta l_1}{\Delta l_2}$$



$$\begin{aligned} \frac{m_1 + m_2}{m_1} &= \frac{l_1 + l_2}{l_2} = \frac{l}{l_2} = \frac{\Delta l}{\Delta l_2} = \\ &= \frac{F/D}{F/D_2} = \frac{D_2}{D} \end{aligned}$$

$$F = D\Delta l$$

tehát: $\frac{m_1 + m_2}{m_1} = \frac{D_2}{D}$, amit az $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D_2}{m_2}}$



egyenletbe helyettesítve
a rezgési frekvencia:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}}$$

az $m_{\text{redukált}} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ mennyiséget redukált
tömegnek is nevezik, ezzel a frekvencia:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m_{\text{redukált}}}}$$

A hullámhossz:

$$\lambda = \frac{c}{f} = 2\pi c \sqrt{\frac{m_{\text{redukált}}}{D}}$$

Az infravörös spektroszkópiában a λ reciprokát, a
hullámszámot (ν) használják:

$$\nu = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{D}{m_{\text{redukált}}}}$$

ν : hány hullám fér
el egységnyi
hosszúságon? [cm^{-1}]

Példa: CO

A mért rezgési hullámszám: $\nu = 2143 \text{ cm}^{-1}$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \lambda = 4,67 \mu\text{m} \Rightarrow f = 6,43 \cdot 10^{13} \text{ Hz} \\ m_{\text{C}} = 2 \cdot 10^{-26} \text{ kg}, m_{\text{O}} = 2,7 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \end{aligned} \Rightarrow D = 1875 \text{ N/m}$$

Ha ν ismert, D számolható
ha D ismert, ν számolható

Kvantummechanikai leírás

Kvantummechanikai oszcillátor:

Tömegpont parabolikus erőterben.

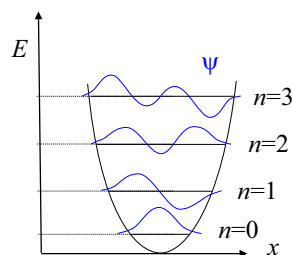
Hamilton operátor:

$$H = T + V$$

Schrödinger egyenlet:

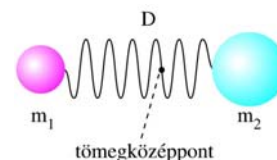
$$-\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi = E\psi$$

$$E_n = hf(n + \frac{1}{2}) \quad n = 0, 1, 2, \dots$$



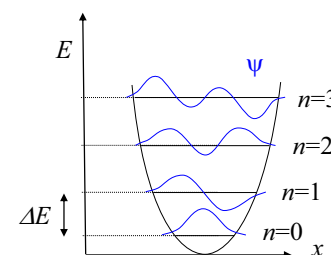
Klasszikus fizikai rezgések és energianívók kapcsolata

- Klasszikus kép
- Energianívók



$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m_{\text{redukált}}}}$$

rezonancia az f frekvenciájú fénnel



$$\Delta E = hf$$

u.a.!!!

A rezgési frekvencia függése a tömegtől és a kötéserősségtől

Tömeg: ↓

Infravörös rezgési frekvenciák (cm⁻¹)

B-H 2400	C-H 3000	N-H 3400	O-H 3600	F-H 4000
Al-H 1750	Si-H 2150	P-H 2350	S-H 2570	Cl-H 2890
	Ge-H 2070	As-H 2150	Se-H 2300	Br-H 2650

Víz (O-H): 3600 => nehézvíz: 2600 cm⁻¹

Kötéserősség:

C-N: 1100 cm⁻¹,
C=N: 1660 cm⁻¹,
C≡N: 2220 cm⁻¹.

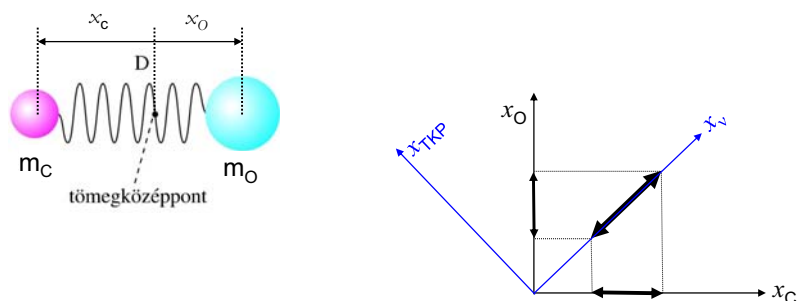
Sokatomos molekulák rezgései

N atomos molekula:

- 3N szabadsági fok, 3-3 a teljes molekula translációja ill. rotációja
- 3N-6 rezgési szabadsági fok (lineáris molekuláknál csak 3N-5)
- normálrezgések
- normálkoordináták

Normálkoordináták

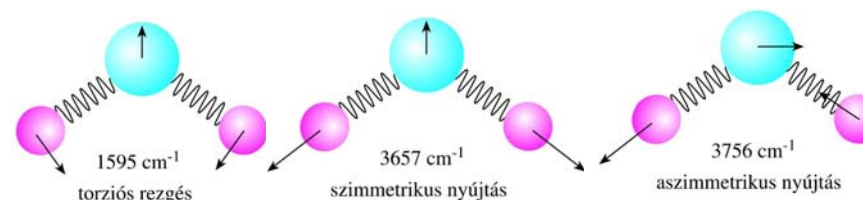
A kétatomos molekula példáján bemutatva:



Általános esetben $3N$ dimenziós koordináta-rendszer forgatása
Lineáris transzformáció (mátrixművelet)

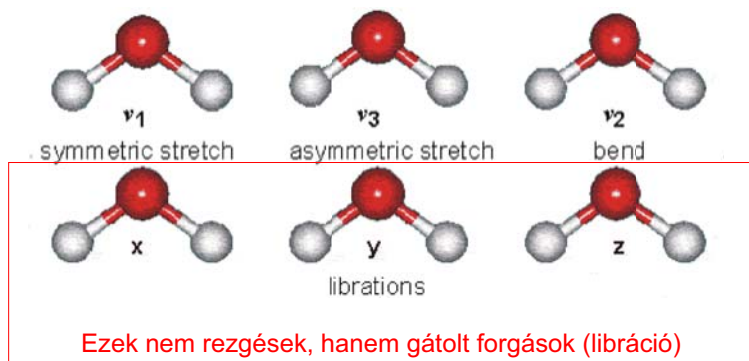
Normálrezgések

- Minden atom ugyanazzal a frekvenciával, fázissal, de különböző amplitúdóval és irányban rezeg.
- Pl. víz:

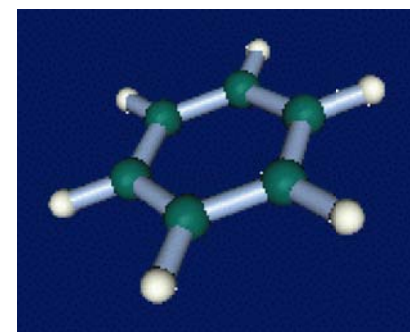


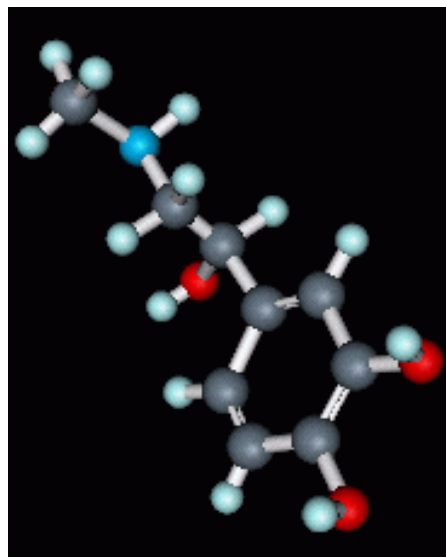
A normál módusok nem hatnak kölcsön egymással.

A víz normálrezgései

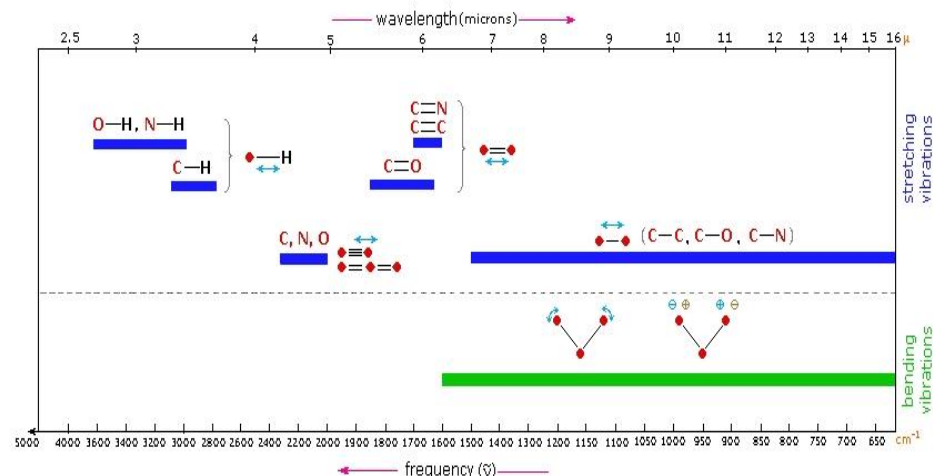


Benzol



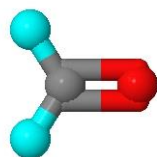
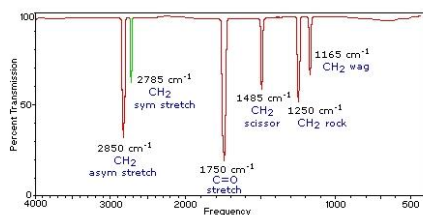


Néhány tipikus rezgési frekvencia



Példa: Formaldehid

Gas Phase Infrared Spectrum of Formaldehyde, $\text{H}_2\text{C}=\text{O}$



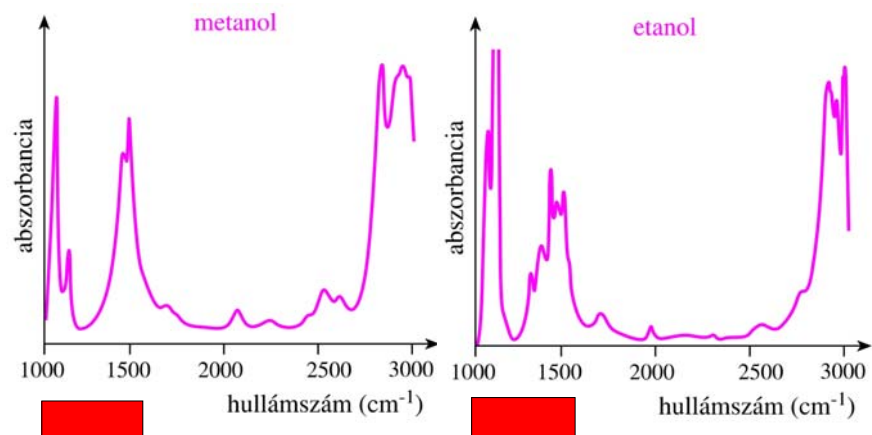
- ☐ View CH₂ Asymmetric Stretch
- ☐ View CH₂ Symmetric Stretch
- ☐ View C=O Stretch
- ☐ View CH₂ Scissoring
- ☐ View CH₂ Rocking
- ☐ View CH₂ Wagging

- ☐ Ball&Stick Model
- ☐ Spacefill Model
- ☐ Stick Model
- ☐ Motion Off

Analitikai alkalmazások

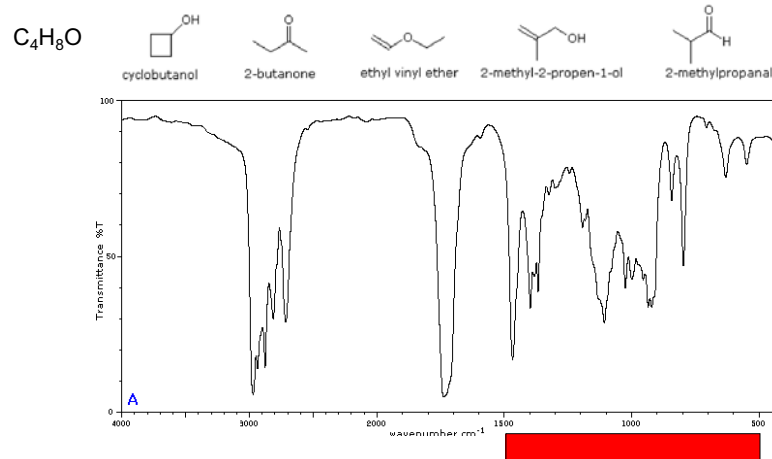
- szintézis: közti és végtermék azonosítás
- szerkezet bizonyítás
- metabolit kimutatás
- gyógyszerellenőrzés (tisztaság vizsgálat)
- Megj.: Lambert-Beer tv. itt is igaz, koncentráció meghatározás is lehetséges.

Molekula azonosítás



Fingerprint (ujlenyomat) tartomány

molekula azonosítás



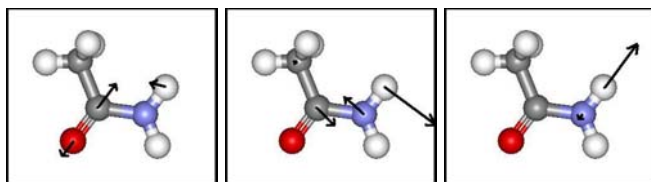
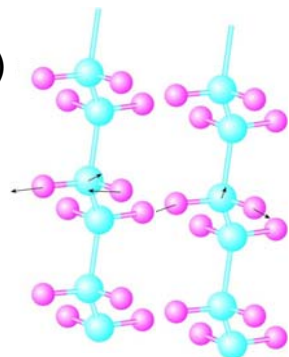
forrás: <http://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/VirtTxtJml/Spectrpy/InfraRed/infrared.htm>

Makromolekulák rezgései

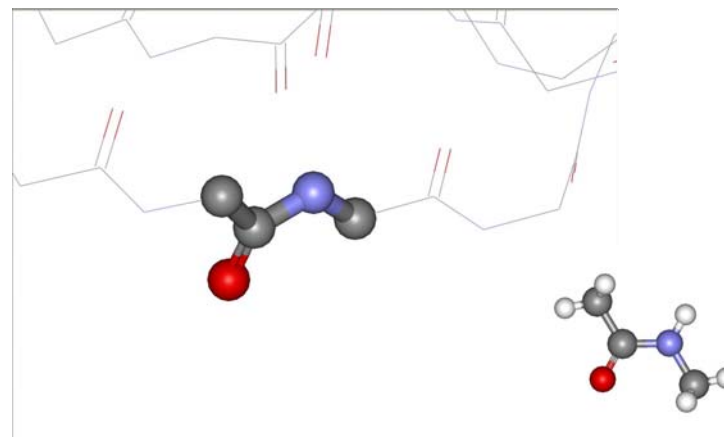
Globális rezgések (bonyolultak)

Lokalizált rezgések, pl:

- CH₂ rezgések a lipidekben
- amid rezgések a fehérjékben (acetamid rezgések)



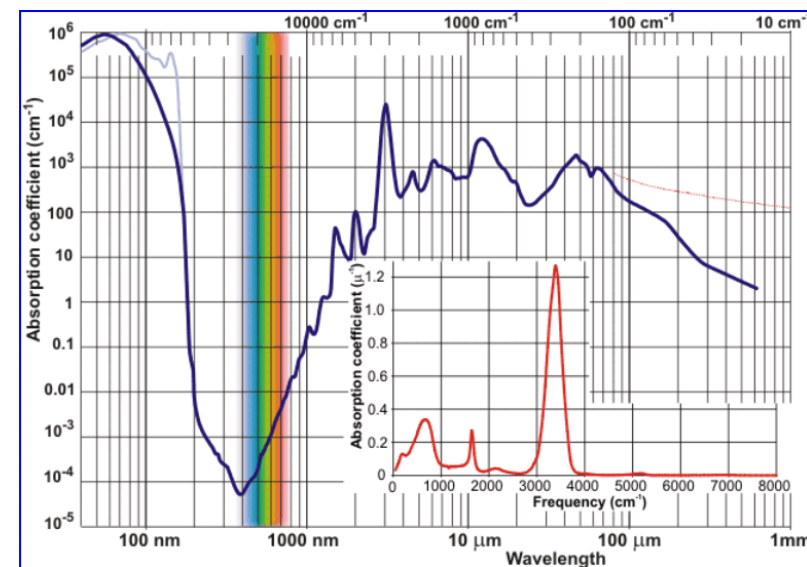
Az N-metilacetamid mint a fehérjelánc gerincének modellje



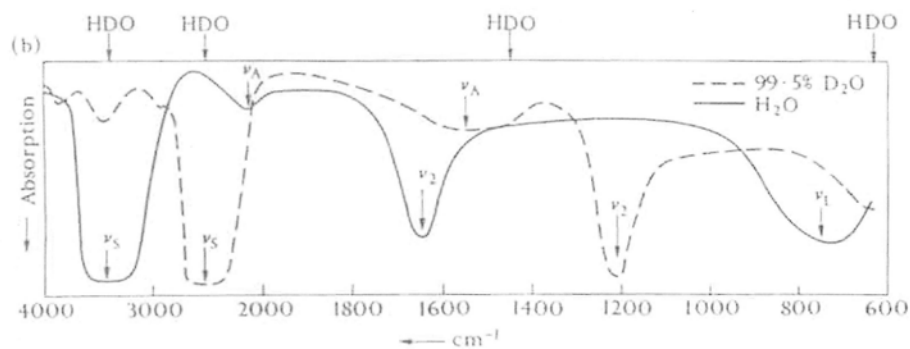
Fehérjék rezgési spektroszkópiája

- Gerinc: amid rezgések
 - konformáció (másodlagos szerkezet)
 - H/D csere, (harmadlagos szerkezet)
- Oldalláncok
 - kölcsönhatások más molekulákkal
 - pl Ca^{2+} kötés
- Fontos technikai megj.: nehézvíz (D_2O)

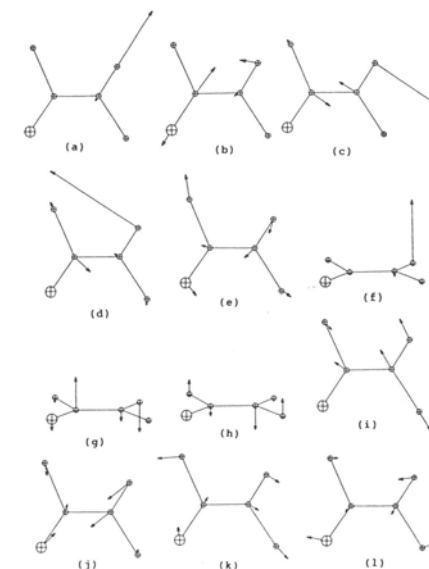
A víz abszorpciós spektruma



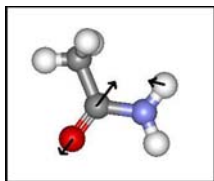
Víz és nehézvíz spektrumok



A fehérjék amid rezgései

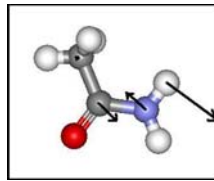


A fehérjék amid rezgései



amid I

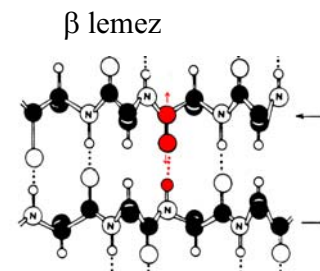
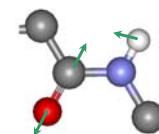
C=O rezgés
H-híd miatt
konformáció-
érzékeny



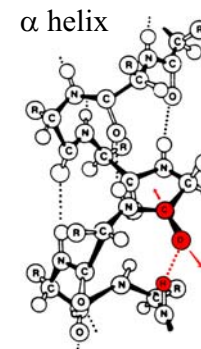
amid II

N-H deformációs rezgés
(síkbeli hajlítás)
H-D cserére érzékeny
Szerkezet kompaktága
(harmadlagos szerk.)

Az amid I vibráció és a másodlagos szerkezet



β lemez



α helix

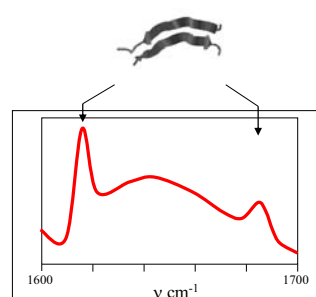
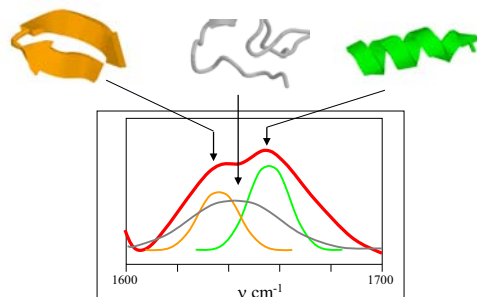
A másodlagos szerkezeti elemekhez tartozó jellegzetes amid I jel

Intramolekuláris szerkezet

β -lemez rendezetlen α -hélix

Intermolekuláris kölcsönhatás

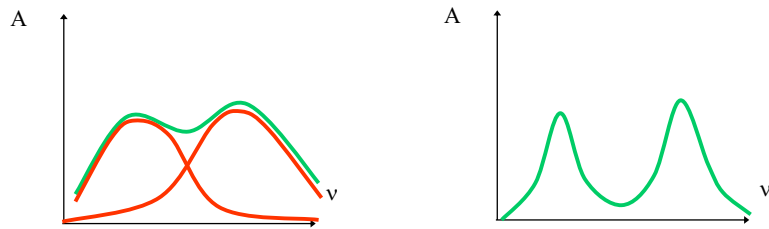
Intermolekuláris antiparallel β -lemez



Az amid I sáv komponenseinek hozzárendelése a másodlagos szerkezeti elemekhez (¹Byler és Susi (1986), ²Haris és Chapman, 1988, ³Ismail és mtsai, 1992 alapján)

hullámszám [cm^{-1}]	másodlagos szerkezet
1616	intermolekuláris béta szerkezet ³
1624-1637	kinyújtott láncok (béta szerkezet) ¹
1645	rendezetlen ¹
1654	alfa hélix ¹
1662	3_{10} hélix ²
1663-1670	hajlatok, hurkok ¹
1675	kinyújtott láncok (béta szerkezet) ¹
1683-1694	hajlatok, hurkok ¹
1685	intermolekuláris béta szerkezet ³

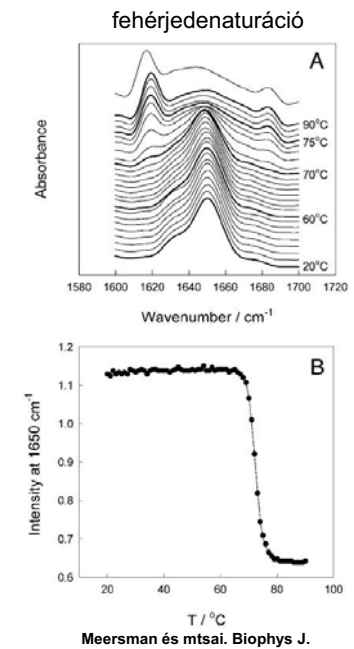
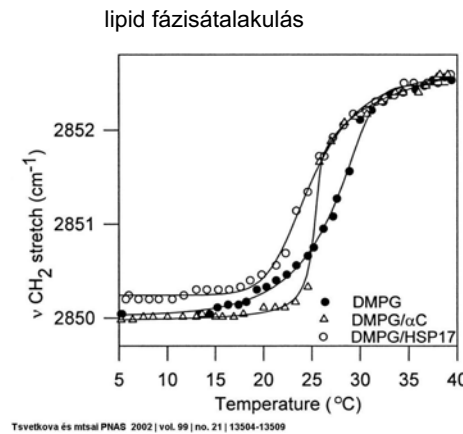
Az amid I sáv átlapoló komponensek összege: dekonvolúció



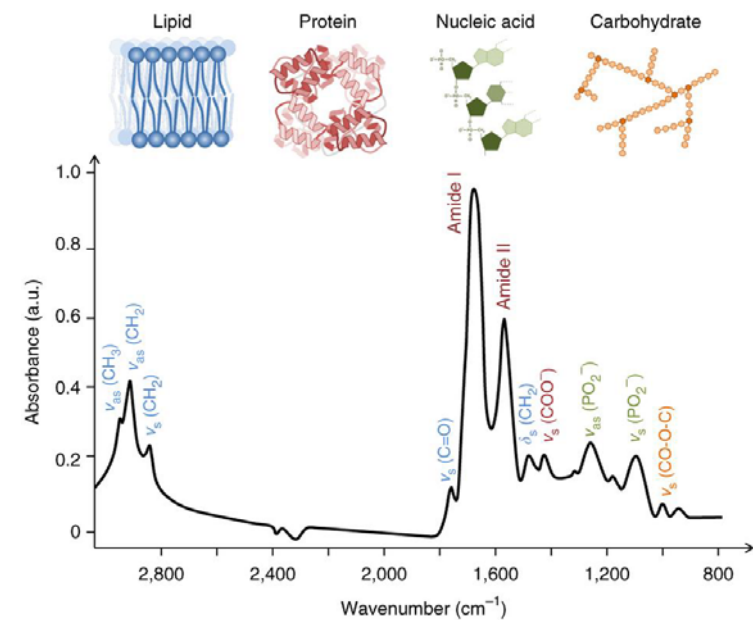
Fourier öndekonvolúció

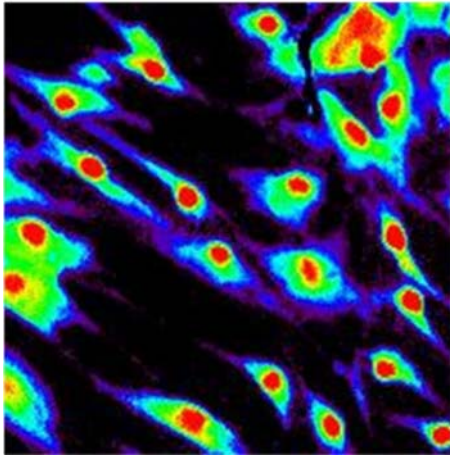
Vonalak szétválasztása vonalkeskenyítéssel

Alkalmazások



Speciális IR módszerek: IR Mikroszkóp



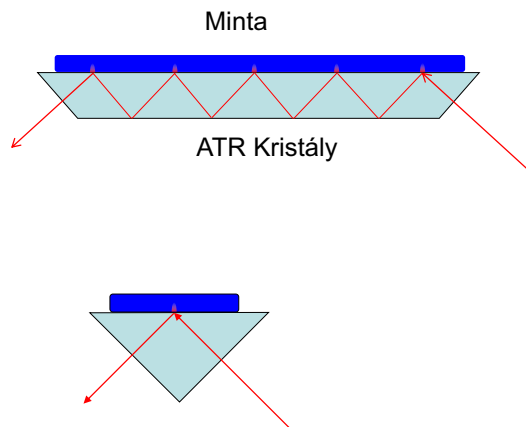


dermal fibroblasts imagined at
 1224 cm^{-1}

Hordozható FTIR spektrométer



ATR technika (Attenuated Total Reflection)

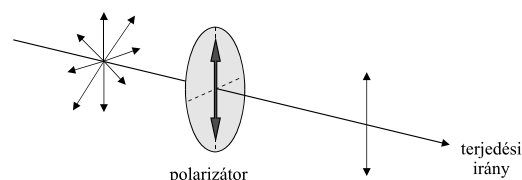


CD

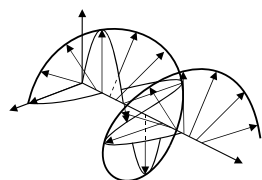
- Cirkuláris dikroizmus spektroszkópia

Poláros fény

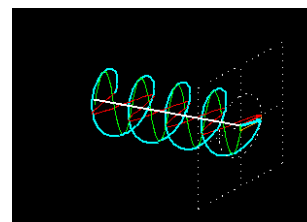
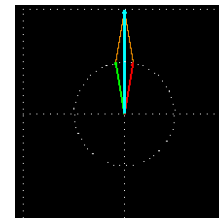
Síkban poláros:



Cirkulárisan poláros

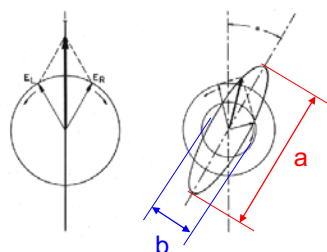


lin. pol =
jobbra+
balra cirk. pol.



mozgó animációk: <http://www.enzim.hu/~szia/cddemo/demo0.htm>

A jobbra és balra forgó cirkulárisan polarizált fénysugarakkal a királis molekulák különbözőképpen hatnak kölcsön:



$$\Delta A = A_L - A_R = \Delta \epsilon \cdot c \cdot x$$

$$\Delta \epsilon = \epsilon_L - \epsilon_R$$

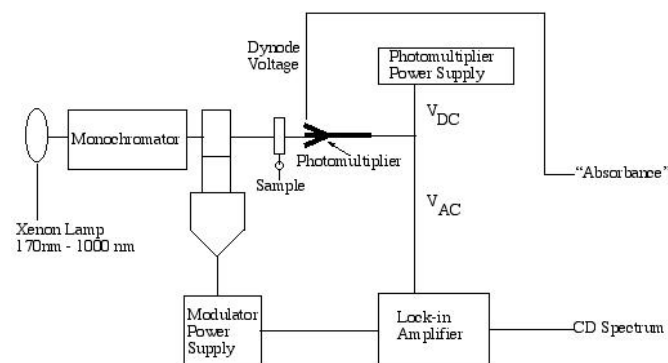
$$\text{Ellipticitás: } \theta \quad \text{tg } \theta = b/a$$

$$\theta = \frac{2.303}{4} \cdot (A_L - A_R) \cdot \frac{180}{\pi} \text{ [deg]}$$

$$\text{Lambert-Beer tv.: } \theta = c \cdot l \cdot \theta_m$$

(θ_m : moláris ellipticitás)

A CD spektrométer vázlata



CD és a fehérjeszerkezet

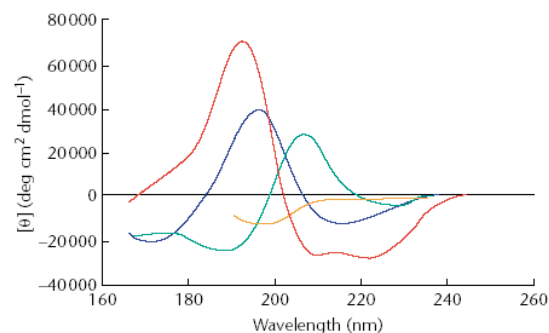
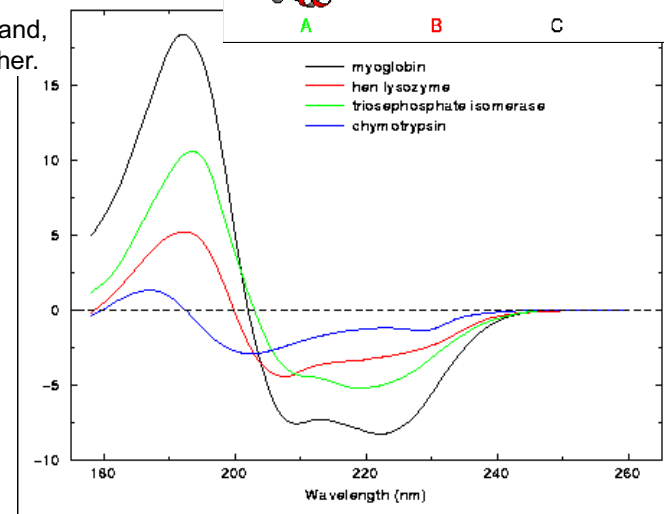
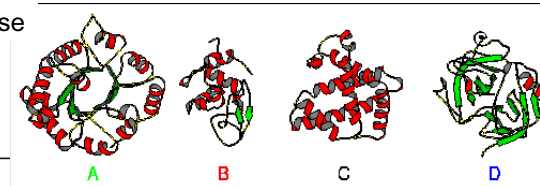
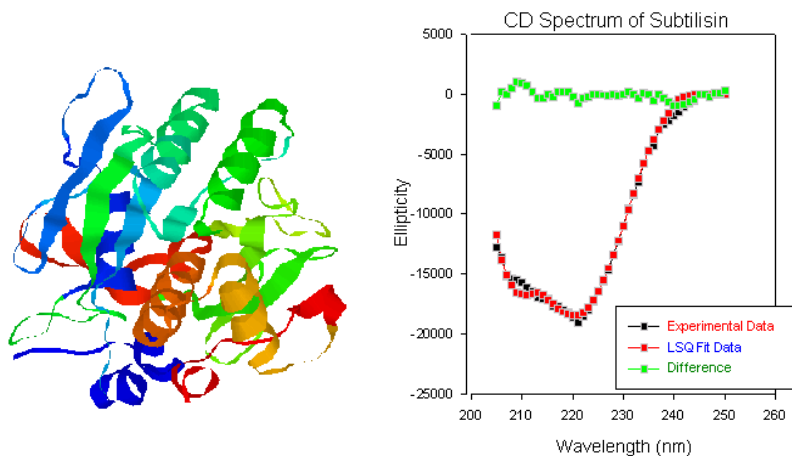


Figure 4 The far-UV CD spectra associated with various types of secondary structure elements in proteins. Red: α -helix; blue: antiparallel β -sheet; green: type I β -turn; orange: irregular structure. (Data taken from the Encyclopedia of Life Sciences)

- A) triosephosphate isomerase
 - B) hen egg lysozyme
 - C) myoglobin
 - D) chymotrypsin
- red:helix.
green:strand,
yellow:other.



The Structure and CD spectrum of Subtilisin



helix	sheet	coil
57.92	26.22	15.85

Vége