



Atomi, illetve molekuláris kölcsönhatások és alkalmazásai

Példaként: atomi erő mikroszkópia



Bozó Tamás
Nanobiotechnológia és Molekuláris Biofizika Munkacsoport
Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet
bozo.tamas@med.semmelweis-univ.hu

2018 október 16.

Áttekintés

Témakörök:

- alapvető kölcsönhatások
- atomi és molekuláris kölcsönhatások
- pásztázó próbamikroszkópiák
- atomi erő mikroszkópia
 - kontakt mód
 - oszcilláló mód
 - erőspektroszkópia

Várható kollokviumi tétel:

Hogyan értelmezhető az atomok közötti kölcsönhatások, kötéstípusok?

Tankönyvi részek: I/2, VIII/4.2.1., X/2

Kapcsolódó gyakorlat: Rezonancia

Atomi kölcsönhatások



Ezenek az elemek nincs egyetlen stabil izotópja sem.

Alapvető kölcsönhatások a fizikában

Kölcsönhatás	Mire hat?	Hatótávolság	Relatív erősség
Gravitáció	minden részecske	végtelen ($\sim 1/r^2$)	10^{-40}
Elektromágneses	töltött részecskék	végtelen ($\sim 1/r^2$)	10^{-2}
Erős nukleáris	nukleonok	10^{-15} m	1
Gyenge nukleáris	minden részecske	10^{-18} m	10^{-13}

Coulomb kölcsönhatás

$$F_C = k \cdot \frac{q_A \cdot q_B}{r^2}$$

($k = 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$)



Gravitáció

$$F_g = \gamma \cdot \frac{m_A \cdot m_B}{r^2}$$

($\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$)



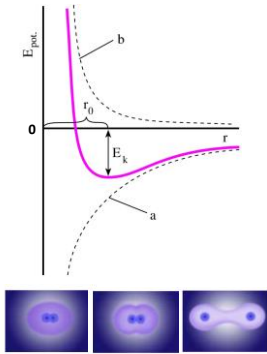
Atomi kölcsönhatások

e.g.: H₂



1

Atomi kölcsönhatások általános leírása



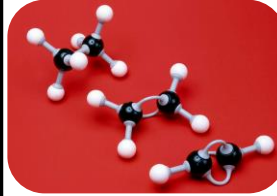
$$E_{pot.} = E_{vonzó} + E_{taszító} = -\frac{A}{r^n} + \frac{B}{r^m}$$

A és B: kölcsönhatásokra jellemző állandók
 $n < m$
 r : atomok távolsága
 r_0 : kötéstávolság
 E_k : kötési energia

I. Kovalens kötés

- Atomokat **közös elektronpályák: molekulapályák** tartják össze
- Vegyértékelektron párok** szerepe
- Elektrosztatikus komponens is jelen lehet
- Erős kötés: $E_k > 1 \text{ eV}$

$$(1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 96 \text{ kJ/mol} \sim 100 \text{ kJ/mol})$$



	szén-szén kötéshossz	kötési energia
H ₃ C-CH ₃ etán	154 pm	-331 kJ·mol ⁻¹
H ₂ C=CH ₂ etén (etilén)	139,9 pm	-590 kJ·mol ⁻¹
HC≡CH etin (acetilén)	120,3 pm	-812 kJ·mol ⁻¹

Mik azok az atomi elektronpályák? (ismétlés)

Az elektron állapota kvantumszámokkal (4db) írható le:

kvantumszám	lehetséges értékei	Mit jellemez?	Mit ad meg?
fő	$n=1,2,3,\dots,7$	elektronhéj	energiaszint
mellék	$l=0,1,2,\dots,(n-1)$ or: s, p, d, f	alhéj	(pálya-) impulzusmomentum (perdület) nagysága
mágneses	$m_l=-l,\dots,0,\dots,+l$	orbitál (elektronpálya) az alhéjon	(pálya-) impulzusmomentum (perdület) iránya
spin	$m_s=\pm 1/2$	elektron saját perdületét (spinjét)	spin iránya (nagysága konstans)

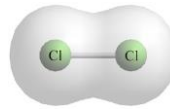
Elektronpálya (orbitál): n, l, m_l kvantumszámokkal jellemezhető állapot. Rajta max. 2 db, ellentétes spinű elektron tartózkodhat.

9

I. Kovalens kötés

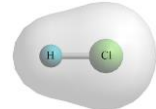
Apoláris (homeopoláris)

(+) és (-) töltések súlypontja egybeesik
 kötőelektronok egyenletes eloszlása
 „tisztan kovalens”
 Pl.: H₂, Cl₂, O₂



Poláris (heteropoláris)

töltések súlypontja eltérő
 polarizált elektronfelhő
 elektromos dipólus
 elektrosztatikus komponens megjelenik
 Pl.: HCl, HF, H₂O

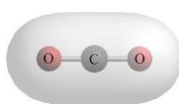
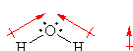
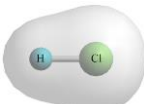


I. Kovalens kötés

Elektromos dipólus momentum: a töltésszétválás mértéke. Vektor!

$$p = q \cdot d$$

p : dipólusmomentum
 q : töltés értéke
 d : töltések súlyponti távolsága
 [D, debye] ($1\text{D} = 3,34 \cdot 10^{-30} \text{ C}\cdot\text{m}$)



I./b Fémek kötés

- Atomokat **közös elektronpályák** tartják össze
- Vegyértékelektronok (itt **energiasávot** alkotnak)
- Erős kötés: $E_k > 1 \text{ eV}$
- Nincs értelmezve két atomra, sokatomos rendszerek

Periodic Table of the Elements

hydrogen

alkali metals

alkali earth metals

transition metals

noble gases

metalloids

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

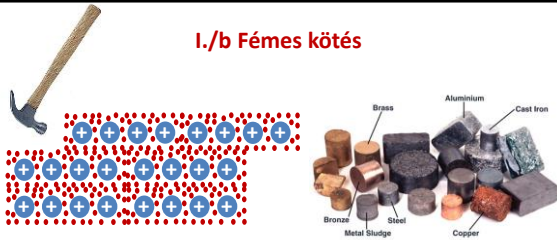
poisonous

poisonous

poisonous

poisonous

I./b Fémek kötése

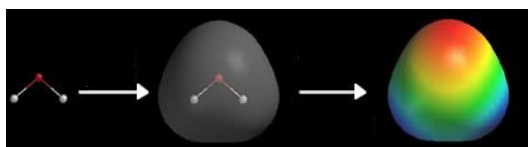


Fémrács: pozitív fémionok kristályos rendben, körülöttük közös pályát kialakító, delokalizált elektronrendszer.

Fizikai tulajdonságok: fémek szín, nyújthatóság, alakíthatóság, elektromos vezetés, hővezetés

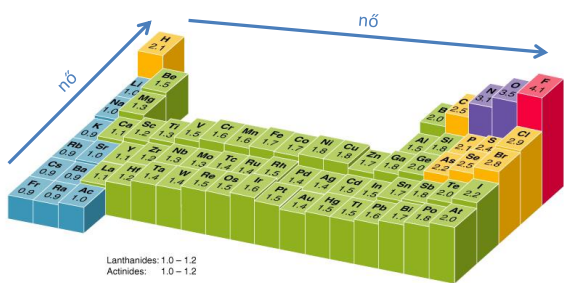
II. Elektrosztatikus kölcsönhatáson alapuló kötések

Elektronegativitás fogalma
Meghatározza, milyen erővel vonzza az atom a (kovalens) kötésben lévő elektronokat.
Egysége önkényes (Pauling, Mulliken, Sanderson és más skálák)

$$EN \approx |E_{\text{ionizációs}}| + |E_{\text{elektronaffinitás}}|$$


II. Elektrosztatikus kölcsönhatáson alapuló kötések

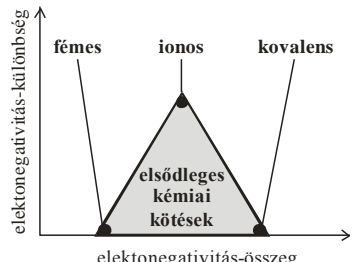
Elektronegativitás L. Pauling szerint (relatív egységekben)



Lanthanides: 1.0 – 1.2
Actinides: 1.0 – 1.2

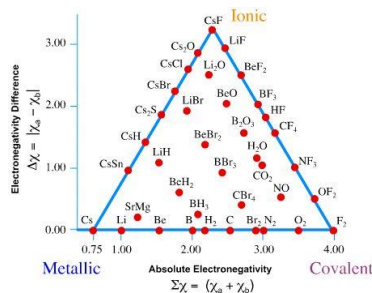
II. Elektrosztatikus kölcsönhatáson alapuló kötések

Elektronegativitás különbség:
< 0,6 (apoláris kovalens) 0,6 – 2,1 (poláris kovalens) 2,1 < (ionos)



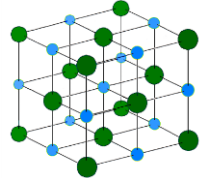
II. Elektrosztatikus kölcsönhatáson alapuló kötések

Példa: (Ez a modell (N. C. Norman) nem a Pauling skála szerinti EN értékeket használja!)



II./a Ionos kötés

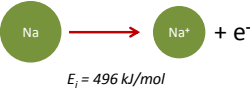
- (+) és (-) ponttöltések között Coulomb erő
- Heteropoláris kötések „határesetek”
- Nagy EN különbségű atomok között (pl. NaCl, $\Delta EN = 3,0 - 0,9 = 2,1$)
- Általában sokatomos kristályok, de értelmezhető két atomra is
- Hosszú hatótávú kh., de ez a közegtől is függ (Isd. hidratáció)
- Erős kölcsönhatás ($E_k > 1 \text{ eV}$)



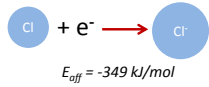
Ionrács: a pozitív és negatív ionok kristályos rendben helyezkednek el sztoichiometriai arányú halmazban.

II./a Ionos kötés

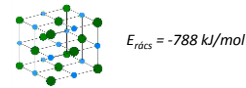
Példa:



Ionizációs energia: kationok létrehozásához (elektronok kiszakításához) befektetendő energia.



Elektronaffinitás: anionok képződése (elektronfelvétel) során történő energiafelszabadulás. (Olykor E befektetést igényel)



Rácsenergia: az ellentétes töltésű ionok kristályrácsba rendeződésekor felszabaduló energia. (E_{pot} csökken)

II./b Dipól-dipól kölcsönhatás

- (+) és (-) atomcsoportok/molekularészek között Coulomb erők
 - Permanens dipólus jellegű töltéeloszlás
 - Intra/intermolekuláris kölcsönhatás
 - Gyenge kölcsönhatás ($E_k = 0,003-0,02$ eV)
- A dipólusok közti vonzás és taszítás:

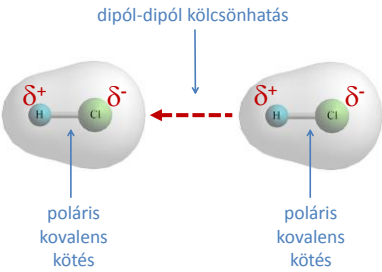
$$E_{vonzó} = p \cdot E$$

$$E_{taszító} = \text{partnerek elektronfelhőjének taszítása}$$

p : dipólusmomentum
 E : környező partnerek által keltett elektromos térerősség

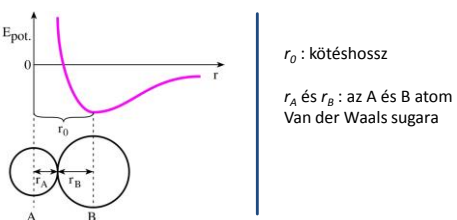
II./b Dipól-dipól kölcsönhatás

Példa:

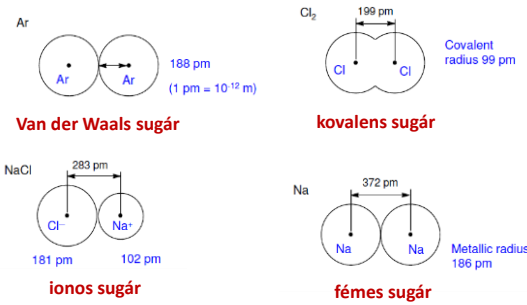


III. Van der Waals-kölcsönhatások

- **Apoláris** molekulákban/molekularészekben időlegesen kialakuló dipólus egy másik apoláris molekulában **dipólust indukál**
- Közöttük vonzó (diszperziós, vagy London-féle) erők lépnek fel
- Inter/intramolekuláris kölcsönhatás
- Nagy jelentőség biokémiai reakciókban, szerkezetstabilizálásban
- Gyenge kölcsönhatás ($E_k \sim 0,02$ eV)



Atomi méretek fogalma

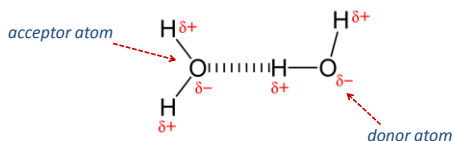


Elektrosztatikus kölcsönhatáson alapuló kötések

Kölcsönhatás	E_{pot} távolságfüggése	E_k
Ion-ion	$1/r$	2-3 eV
Ion-dipólus	$1/r^2$	0,1-0,2 eV
Dipólus-dipólus (rögzített partnerek)	$1/r^3$	0,02 eV
Dipólus-dipólus (hőmozgás mellett)	$1/r^6$	0,003 eV
Diszperziós	$1/r^6$	0,02 eV

IV. Hidrogénkötés

- Két nagy elektronegativitású atom között létrejövő H-híd
- Általában **F, N, O** atomok között
- Intermolekuláris / intramolekuláris kölcsönhatás
- Kötéstáv átl.: 0,23 – 0,35 nm
- A kötés térben irányított
- Nagy jelentőség biokémiai reakciókban, szerkezetstabilizálásban
- Közepes erősségű kölcsönhatás ($E_k \sim 0,2$ eV)

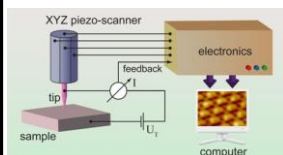


V. Hidrofób kölcsönhatás



- Vizes közegben értelmezhető (pl. biológiai rendszerek)
- Hidrofób molekulák/molekularészek asszociációja → cél a víz kiszorítása
- Nem csak Van der Waals alapú
- Hajtóereje a apoláros rész–víz határfelület csökkentése, ezzel a vízmolekulák rendezettségének csökkentése (Ist. termodinamika 2. főtétele)
- Intra/intermolekuláris kölcsönhatás
- Nagy jelentőség biokémiai reakciókban, szerkezetstabilizálásban
- Gyenge kölcsönhatás

Pásztázó próbamikroszkópiák (Scanning Probe Microscopy, SPM)

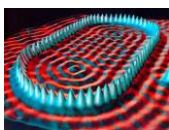


Változatos szerkezetvizsgáló eljárások, melyek egy vékony szonda és valamely felület között létrejövő atomi szintű kölcsönhatások detektálásán alapulnak.

Egy felületet tapogatunk le pontról-pontra, akár atomról-atomra.

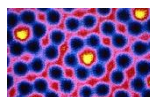
Nem diffrakció-limitált módszerek.

Akár pm-es pásztázási pontosság is elérhető.

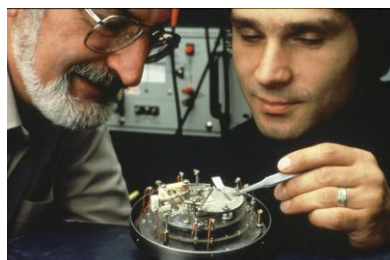
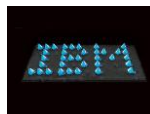


Vasatomok rézen, STM kép

Scanning Tunneling Microscope (STM) 1981 Pásztázó alagút-mikroszkóp

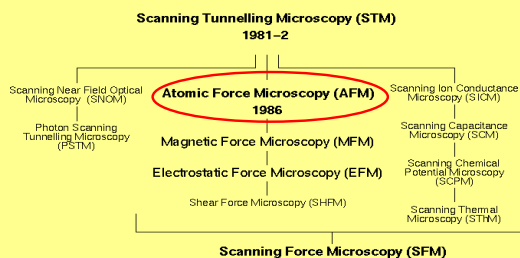


Atomok egy szilíciumlapkán

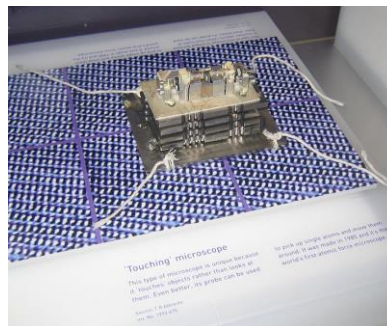


Heinrich ROHRER és Gerd BINNING
Nobel díj: 1986

Scanning Probe Microscopy "Family Tree" (SPM)



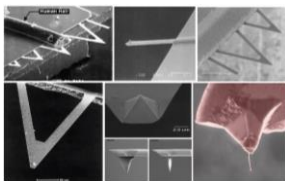
Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia



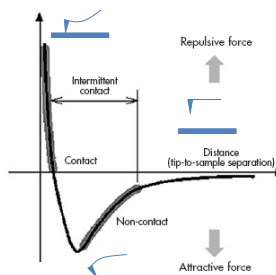
A szonda: piciny tű



Egy kb. 100-500 μm hosszú laprugóhoz (vagy rugólapkához) kapcsolva.
Anyaga: ált. szilícium-nitrid
Általában fémbevonat (Au, Cu, Ni...)
Tűhegy sugara: 0.1 nm – 100 μm
Rugóállandó: $k \sim 0.1\text{--}10 \text{ N/m}$
 $f_0 \sim 50\text{--}500 \text{ kHz}$



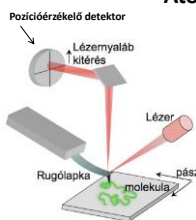
Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia



Atomi kölcsönhatások a tűhegy és a minta között:

- Vonzás és tasztítás
- Eredőjük távolságfüggő
- Nagyobb távolságoknál: vonzás (van der Waals erők)
- Közel érve: Coulomb tasztítás

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

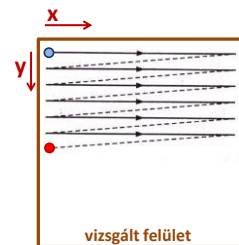


- A szonda egy rugalmas, mikroszkópius méretű laprugóra szerkesztett parányi **tű**.
- A tűhegy atomjai és a minta felületének atomjai között tasztító-vonzó **kölcsönhatások** a rugólapka elhajlását okozzák.
- Ezt az **elhajlást** a rugólapra fókuszált lézernyaláb eltérülését követve detektáljuk.
- X-Y irányban vonalanként **pásztázzuk** a felületet.
- Vertikális **felbontóképesség** akár 10 pm, a horizontális ennél rosszabb.

- **Levegőben és folyadékban** (fiziológiás közeg) is működőképes
- Szinte mindenféle felületen alkalmazhatók.
- nm- μm nagyságú objektumok szkennelhetők.
- **Natív minták vizsgálhatóak:** nem kíván fixálást, festést vagy jelölést.

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Pásztázási mintázat:

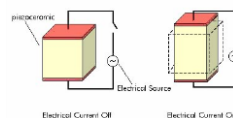


- ● pásztázás kezdőpontja
- ● szonda aktuális pozíciója

Pásztázás alapja:

Inverz piezoelektromos hatás: Bizonyos anyagokban (pl. kvarc kristály) feszültség hatására deformáció jelentkezik ($\sim 1 \text{ nm}$ hosszváltozás/Volt).

A mintaasztal x-y irányba mozdítható hozzászátolt feszültségvezérelt piezoelektromos kristályok segítségével.

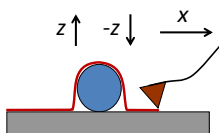


(Bővebben: Ultrahang ea., 2. félév)

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Kontakt mód: (Contact mode)

- A tű folyamatosan kapcsolatban van a felszínnel, vonalról vonalra pásztázza azt.
- A felszínre kifejtett **erőt** (a rugólapka elhajlását) **konstans értéken tartjuk** a tű és a felszín távolságának szabályozásával (feedback rendszer)
- Pontról pontra regisztráljuk az ehhez szükséges **z** irányú elmozdulást.

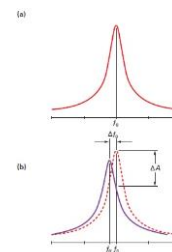
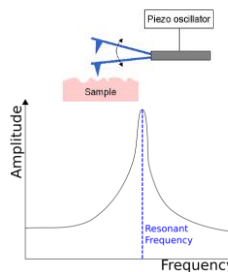


Hátrány: jelentős perturbáció lehet vertikális és horizontális irányban.

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Oscilláló mód: (Tapping mode, Non-contact mode)

Rezonancia: kényszerrezgés, $f \approx f_0$, nagy amplitúdók

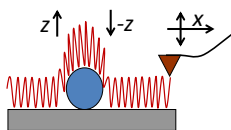


(Bővebben: Rezonancia gyakorlat)

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

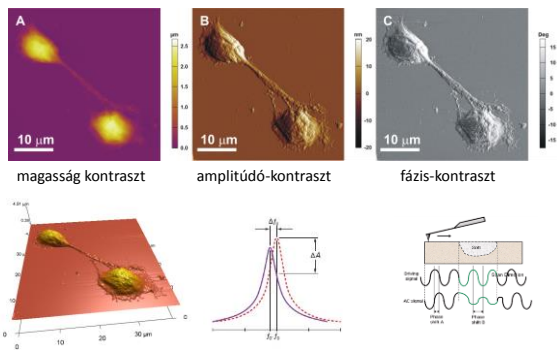
Oscilláló mód: (Tapping mode, Non-contact mode)

- A tűt a rezonanciafrekvenciájához közeli frekvencián **rezgetjük**.
- Vonalanként pásztázzuk a felszínt.
- A felszínnel való kölcsönhatás miatt a **rezgés amplitúdója megváltozhat**.
- Az **amplitúdót** a tű és a felszín távolságának szabályozásával **tartjuk állandó értéken**.
- Pontról pontra regisztráljuk az ehhez szükséges **z** irányú elmozdulást.



Előnye: elvileg kiküszöbölt laterális erőképződés, érzékeny minták vizsgálatára is alkalmas.

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

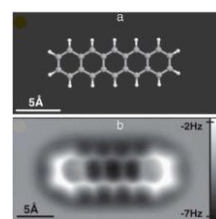


Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

<http://www.youtube.com/watch?v=BrsoS5e39H8>

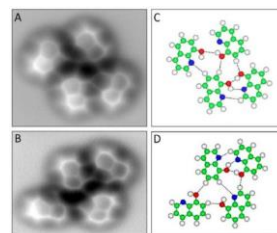
Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Példák:



Pentacén molekula
AFM képe

Nature Chemistry 3, 273–278 (2011)

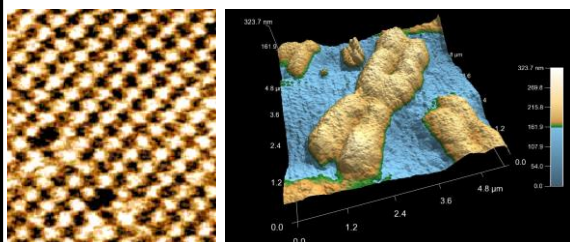


Hidrogénkötések 8-hidroxiquinolin
molekulák között (AFM felvétel)

Science 26, 611-614 (2013)

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Példák:

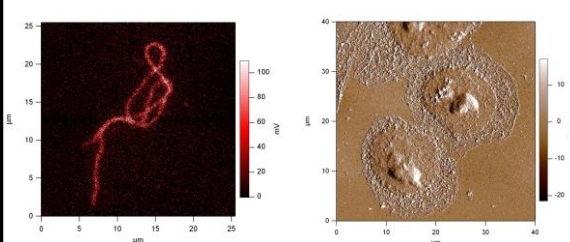


NaCl kristály AFM képe

Humán metafázisos kromoszóma AFM képe

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Példák:

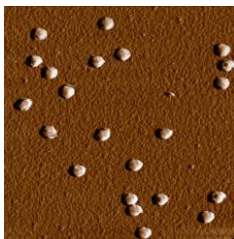


Egyedi aktinpolimer AFM képe

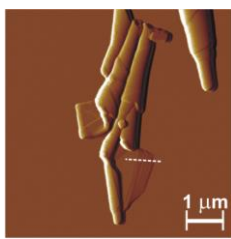
HeLa sejtek AFM képe

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Példák:



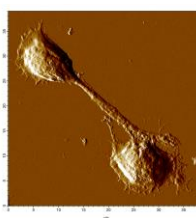
T7 bakteriofágok AFM képe



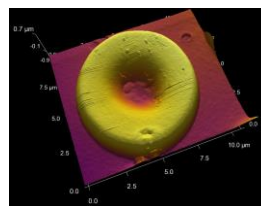
Többrétegű foszfolipid membrán tekercsek

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Példák:



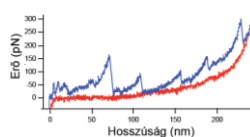
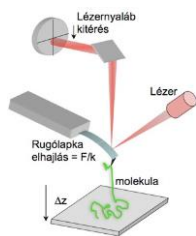
B-limfociták – közöttük membrán nanocső



Vörösvértest, rajta „VÉR” nanolitográfia

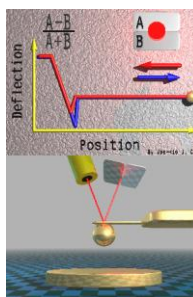
Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Erőspektroszkópia: a mintát erő nyomási és húzási ciklusok során regisztrált erőválaszok. (erő – távolság függvény)
~10 pN érzékenység



Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Erőspektroszkópia:



Hooke törvény: A rugólapka elhajlása (Δx) arányos az erővel (F):
(Rezonancia gyak.)

$$F = k \cdot \Delta x$$

k : rugóállandó

Átszúrási, szakítási, domén-kitekeredési és más erők, viszkózus és elasztikus tulajdonságok mérhetőek így.

46

Atomic Force Microscopy (AFM),



Atomic Force Microscopy (AFM),



Köszönöm a figyelmet!



Pablo Picasso: "Don Quixote"
polikarbonát felszínbe rajzoltva

1 µm