Anyagszerkezet, anyaghullámok, atomi és molekuláris kölcsönhatások

Példaként: atomi erő mikroszkópia

Bozó Tamás

Nanobiotechnológia és Molekuláris Biofizika Munkacsoport
Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet

2016 október 6.

1

Áttekintés

Témakörök:

- atomszerkezet
- atommodellek
- az elektron kettős természete, anyaghullámok
- szabad és kötött elektron terjedése
- kvantumszámok
- atomi és molekuláris kölcsönhatások
- atomi erő mikroszkópia

Kollokviumi tételek:

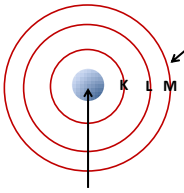
6. A részecske-hullám kettősség bizonyítása az elektron esetében. Anyaghullámok szabad és kötött állapotban.

7. Atomi és molekuláris kölcsönhatások általános leírása.

Tankönyvi részek: I/1.1, I/1.2, I/1.3, I/1.4, I/2, X/2

Kapcsolódó gyakorlatok: Fényemisszió, Fényabszorpció, Rezonancia

Általános atomszerkezet, alapfogalmak



elektronhéjak
K: max. 2 e^-
L: max. 8 e^-
M: max. 18 e^-

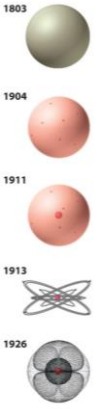
elektron
m_e=9.10938356 × 10^{-31} kg
q_e=1.60217662 × 10^{-19} C

atommag, nukleonokkal:
protonok (p^+)
neutronok (n^0)

kémiai tulajdonságok!

***Z*: atomszám = protonszám (= elektronszám)**
***N*: neutronszám**
A*: tömegszám = *Z+N
(Magszerkezet lásd: 10. ea.)

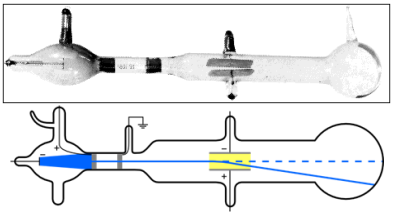
Atommodellek



~ Kr.e. 400	**Demokritosz:** az anyag atomokból áll
1803	**Dalton:** kémiai súlyviszonyok, az elemek azonos atomokból állnak, billiárdgolyó modell
1904	**J.J. Thomson:** katódsugárzás: elektron felfedezése, elektron tömege „mazsolás pudding" modell
1910	**R.A. Millikan:** elektron töltése
1909-11	**E. Rutherford:** atommag felfedezése, bolygómodell
1913	**N. Bohr:** diszkrét atomi energiaállapotok, Bohr-modell
1914	**J. Franck, G.L. Hertz:** energiakvantum
1923	**L.V. de Broglie:** elektronhullám
1926	**E. Schrödinger:** hullámegyenlet, kvantummechanikai atommodell
1927	**W. Heisenberg:** határozatlansági reláció
1927-28	**C.J. Davisson, L.H. Germer, G.P. Thomson:** elektronhullám interferencia
1932	**J. Chadwick:** neutron felfedezése

Az elektron felfedezése (1897)

Joseph John Thomson
1856-1940

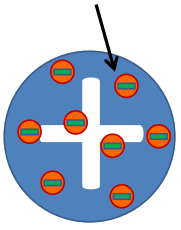


Megfigyelések	Következtetések
A katódsugár elektromos térben a pozitív elektród felé hajlik, és mágneses térrel is eltéríthető.	A sugár negatívan töltött részecskékből („korpuszkulumokból") áll.
Alacsony m/q arány.	Ezek a részecskék vagy nagyon könnyűek vagy nagy a töltésük.
A m/q arány független a katód (és a csőben lévő gáz) anyagától.	Ezek a részecskék valamennyi atom alapvető összetevői.

5

Thomson mazsolás puding modellje (1904)

e^-



$$m_{elektron} = 9{,}109 \cdot 10^{-31} kg$$

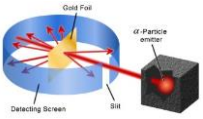
$$q_{elektron} = -e = 1.602 \cdot 10^{-19} C$$

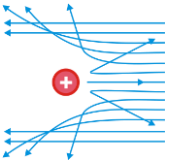
- Kis tömegű, negatív töltésű részecskék (elektronok)
- egyenletesen, középpont-szimmetrikusan oszlanak meg
- az atom tömegének nagy részét hordozó
- homogén sűrűségeloszlású,
- pozitív töltésű felhőben.
- Az elektronok úgy helyezkednek el, hogy minimális potenciális energiával rendelkezzenek.
- Ha kimozdítjuk őket egyensúlyi rendszerükből, rezegni kezdenek, az atom sugároz.

6

Az atommag felfedezése (1909)

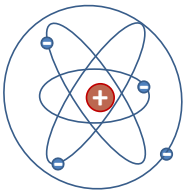
Ernest Rutherford
1871-1937



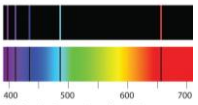


Megfigyelések	Következtetések
Az α részecskék 99.995%-a elhajlás nélkül, vagy enyhe elhajlással áthaladt a fólián.	Az atom sűrűségeloszlása nem egyenletes. A tömeg legnagyobb része egy kis térfogatrészbe tömörül.
Mindössze 0.005%-uk verődött vissza éles szögben.	Ez a térfogatrész az atom térfogatánál 10^5-szer kisebb, és pozitív töltést hordoz.

Rutherford bolygó modellje



- Elektronok (könnyű, negatívan töltött részecskék) keringenek az atommag (nehéz, pozitív töltésű részecske) körül.
- Az elektronokat a Coulomb erő tartja körpályán.



(b) H_2 emission spectrum (top), H_2 absorption spectrum (bottom)

Hiányosságok:
- Nem stabil (gyorsulás→ sugárzás → energiaveszteség → magba zuhanás)
- Nem magyarázta a H_2 gáz vonalas spektrumát.

Bohr hidrogénatomja, a „régi kvantumelmélet” (1913)

Niels Henrik David Bohr
1885-1962

I. Pályafeltétel: az elektronok csak meghatározott pályákon keringhetnek (n=1, 2, 3, ...).

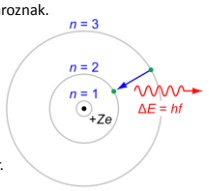
$$\underbrace{m_e \cdot v \cdot r}_{\substack{\text{impulzusmomentum} \\ L\,[kg \cdot m^2 \cdot s]}} = n \cdot \frac{h}{2\pi} = n \cdot \hbar$$

Ezeken a pályákon tartózkodva energiájuk meghatározott és állandó (E_1, E_2, E_3,...), nem sugároznak.

II. Frekvenciafeltétel:

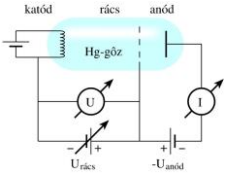
$$\Delta E = E_m - E_i = h \cdot f$$

$$f = \frac{\Delta E}{h}$$



Sugárzás (emisszió): alacsonyabb pályára lépéskor.
Abszorpció: magasabb pályára kerüléshez vezet.

A Franck-Hertz kísérlet: az energiakvantum bizonyítéka (1914)

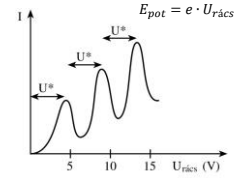


James Franck
1882-1964

Gustav Ludwig Hertz
1887-1975

Eredmény:

$$E_{pot} = e \cdot U_{rács}$$



Következtetés:
Az atom energiája nem változhat folytonasan, hanem meghatározott értékeket (quantumokat) vehet fel.

Az elektron hullámtermészete

Einstein:	Planck:	Maxwell:
tömeg-energia equivalencia	sugárzási törvény	fény terjedési sebessége
$E = mc^2$	$E = h \cdot f$	$c = \lambda \cdot f$

de Broglie: Ha a fény részecske, akkor az elektron lehet hullám? (1923):

Louis Victor de Broglie
1892-1978

$$\left.\begin{aligned} m \cdot c^2 &= h \cdot \frac{c}{\lambda} \\ p &= m \cdot v \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} \lambda &= \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v} \\ p &= \frac{h}{\lambda} \end{aligned}$$

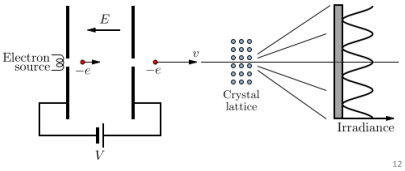
Részecske-hullám dualitás: Az elektron egyszerre tekinthető szubatomi részecskének és hullámjelenségnek. Ez általánosítható minden részecskére (anyaghullámok).

Interferencia kísérletek (1927-28)

J.Davisson and L.H.Germer

- A hullámtermészet kísérletes bizonyítékai.
- Davisson, Germer és Thomson elektronnyalábbal váltott ki diffrakciót vékony fémfóliákon.
- Interferenciamintázat jelent meg, ami a hullámtermészet egyértelmű bizonyítéka.
- Más anyagi részecskékkel (protonok, neutronok, atomok is sikerült interferenciát kelteni. Ez az anyag hullámtermészetét bizonyítja.

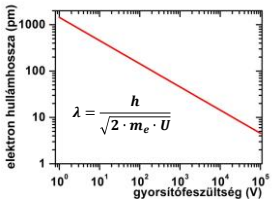
G. P. Thomson



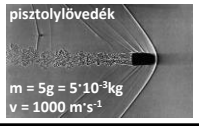
Az elektronhullám hullámhossza

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad p = m_e \cdot v \qquad \lambda = \frac{h}{m_e \cdot v}$$

$$E_{pot} = e \cdot U \qquad E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 \qquad E_{kin} = E_{pot} \qquad v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m_e}}$$



Miért nem érzékeljük a makroszkopikus testek hullámtulajdonságait?



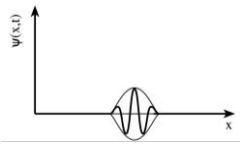
$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\ m^2 \cdot kg \cdot s^{-1}}{5 \cdot 10^{-3}\ kg \cdot 1000\ m \cdot s^{-1}} = \mathbf{1{,}325 \cdot 10^{-34} m}$$

Az eletron hullámtermészete

Ervin Schrödinger
1887-1961

Az elektronhullám terjedési törvénye (1926):

A hullámfüggvény (állapotfüggvény) **Ψ(x,t)** az elektronhullám „amplitudoját" a hely **(x)** és az idő **(t)** függvényeként adja meg.
Az elektront mint kiterjedt, folytonos töltésfelhőt írja le, aminek a tér minden pontjában **Ψ²**-tel arányos töltéssűrűsége van.



„hullámcsoport"

hely (kiterjedés): ahol Ψ(x,t) ≠ 0
impulzus (p): a fv. alakja adja meg

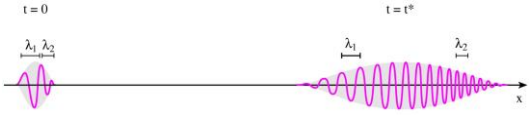
Szabad elektron terjedése

1. Ψ(x,t) ≠ 0 több pontra is teljesül → a hely nem határozható meg egyetlen számmal.

2. Ψ(x,t) : nem periodikus függvény → nincs egyértelmű hullámhossza → A kb. legnagyobb (λ_1), ill. legkisebb (λ_2) értékek között bármilyen λ–val jellemezhető.

Mivel $p = \frac{h}{\lambda}$, $v = \frac{p}{m_e}$ és $s = v \cdot t$

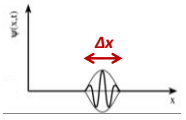
Sem az impulzus, sem a sebesség, sem az elmozdulás nem határozható meg egyetlen számértékkel → s_1 és s_2 között bármilyen értékkel jellemezhető → Ψ(x,t) szétterül a terjedés közben. Új hullámhegyek és -völgyek jelennek meg.



Heisenberg-féle határozatlansági reláció (1927):

Werner Karl Heisenber
1901-1976

Az állapotfüggvény ***Ψ(x,t)*** önmagában teljesen határozott, egyértelmű függvény.
A hordozott információ egy része (pl. hely, impulzus) azonban határozatlan.



$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

Δx: hely határozatlansága
Δp: impulzus határozatlansága
h: Planck' állandó

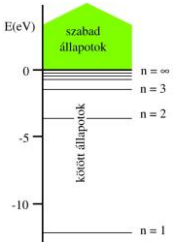
Konklúzió: Minél pontosabban meghatározott az elektron helye, annál kevésbé meghatározott az impulzusa (és sebessége), és fordítva.

Általános elv: a részecskéket jellemző más komplementer változókra is érvényes. Pl.:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

Mi a helyzet a kötött állapotú elektronokkal?

1. Atommag elektromos erőtere hat rájuk.
2. Az állapotfüggvényt saját irányába tereli (torzítja).
3. Az elektronok impulzusa határozatlan → a szétterülés érvényben marad.
4. Nincs elég energiájuk az atom elhagyására → kötött állapot.



Következmény:
Dinamikus egyensúly (magvonzás és szétterülés között).
Szimmetrikus alak (állóhullámszerű)
Stacionárius függvény → ***Ψ(x)***
↓
Mivel *Δt* teljesen határozatlan → *E* teljesen határozott → diszkrét energiaszintek.

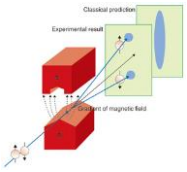
Hogyan jellemezhetjük az atomi elektronállapotokat?

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

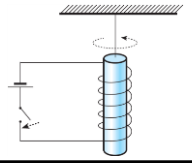
Elektronpálya (orbitál): *n, l, m_l* kvantumszámokkal jellemezhető állapot. Rajta max. 2 db, ellentétes spinű elektron tartózkodhat.

Az elektron saját impulzusmomentuma (spin)

Stern-Gerlach kísérlet

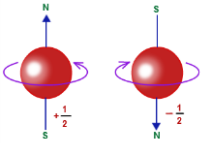


Einstein-de Haas kísérlet



Következtetések:

- Az elektronnak van saját mágneses momentuma.
- Irányítottsága kétféle lehet.
- Az elektronnak saját impulzusmomentuma van (mivel a mágneses momentum mindig impulzusmomentummal jár együtt).

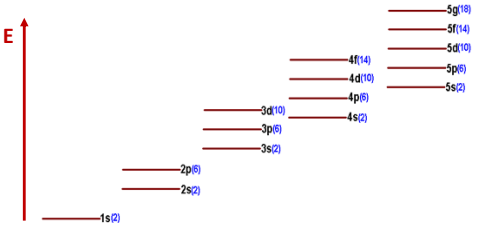


Spinkvantumszám: m_s vagy $s = \pm 1/2$

Hogyan foglalják el az elektronok a kvantumállapotokat?

Pauli elv: Egy atomon belül nem lehet két olyan elektron, amelynek mind a 4 kvantumszáma megegyezik.

Energiaminimum elve

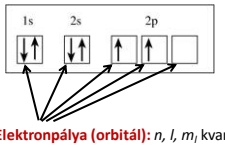


Hund szabály: Adott elektronkonfigurációra a legalacsonyabb energiájú állapot a legnagyobb eredő spinértéknél van.

Hogyan foglalják el az elektronok a kvantumállapotokat?

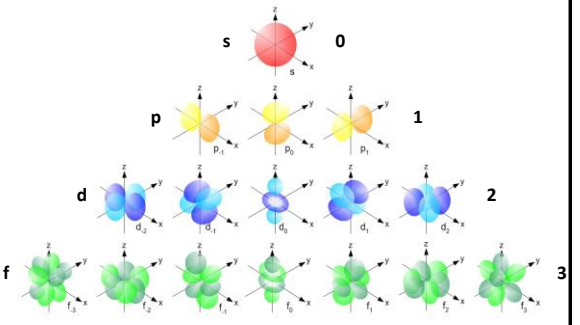
Konfiguráció: Megadjuk a (teljesen vagy részlegesen) betöltött alhéjakat és az ekvivalens (azonos alhéjhoz tartozó) elektronok számát.

Egy példa: Szénatom, *Z=6*

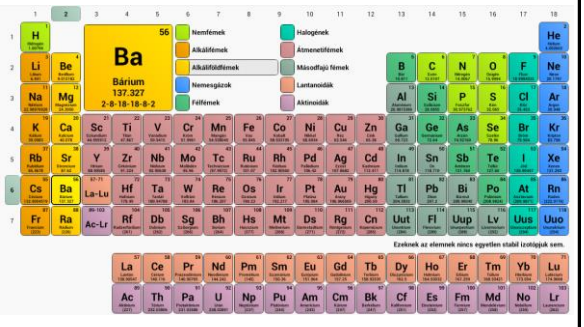


Elektronpálya (orbitál): *n, l, m_l* kvantumszámokkal jellemezhető állapot. Rajta max. 2 db, ellentétes spinű elektron tartózkodhat.

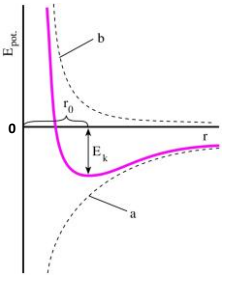
Elektronpályák (orbitálok) szemléltetése



Atomi kölcsönhatások

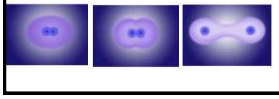


Atomi kölcsönhatások általános leírása



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

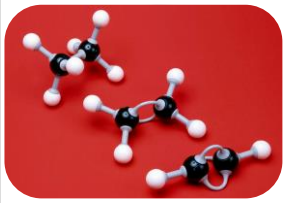
A és B: kölcsönhatásokra jell. állandók
n < m
r: atomok távolsága
r_0: kötéstávolság
E_k: kötési energia



I. Kovalens kötés

- Atomokat közös elektronpályák tartják össze
- Vegyértékelektronok szerepe
- Elektrosztatikus komponens is jelen lehet
- Erős kötés: E_k>1 eV

  *(1 eV = 1,6*10^{-19}J = 96 kJ/mol ~ 100 kJ/mol)*

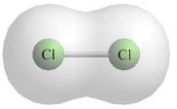


	szén-szén kötéshossz	kötési energia
H_3C-CH_3 etán	154 pm	-331 KJ·mol^{-1}
H_2C=CH_2 etén (etilén)	139,9 pm	-590 KJ·mol^{-1}
HC≡CH etin (acetilén)	120,3 pm	-812 KJ·mol^{-1}

I. Kovalens kötés

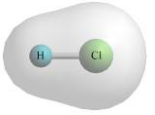
Apoláris (homeopoláris)

(+) és (-) töltések súlypontja egybeesik
kötőelektronok egyenletes eloszlása
„tiszta kovalens”
Pl.: H_2, Cl_2, O_2



Poláris (heteropoláris)

töltések súlypontja eltolódik
polarizált elektronfelhő
elektromos dipólus
elektrosztatikus komponens megjelenik
Pl.: HCl, HF, H_2O

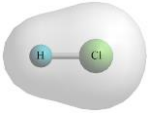


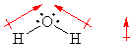
I. Kovalens kötés

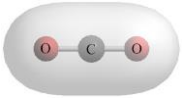
Elektromos dipólus momentum: a töltésszétválás mértéke. Vektor!

$$p = q \cdot d$$

p: dipólusmomentum
q: töltés értéke
d: töltések súlyponti távolsága
[D, debye] *(1D = 3,34*10^{-30} Cm)*

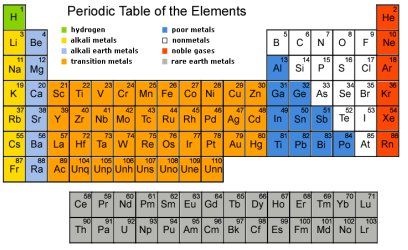




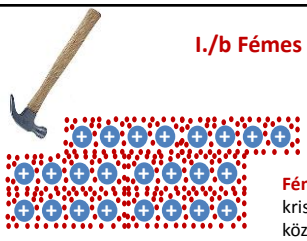


I./b Fémes kötés

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



I./b Fémes kötés



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

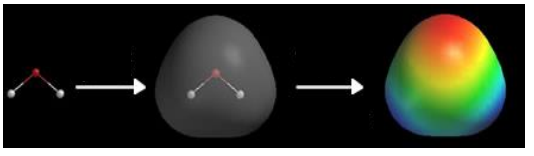
Fizikai tulajdonságok:
fémes szín
nyújthatóság, alakíthatóság
elektromos vezetés
hővezetés

II. Elektrosztatikus kölcsönhatáson alapuló kötések

Elektronegativitás fogalma

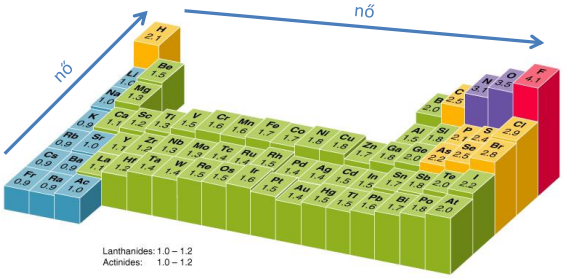
Meghatározza, milyen erővel vonzza az atom a (kovalens) kötésben lévő elektronokat.
Egysége önkényes *(Pauling, Mulliken, Sanderson és más skálák)*

$$EN = |E_{ionizációs}| + |E_{elektronaffinitás}|$$



II. Elektrosztatikus kölcsönhatáson alapuló kötések

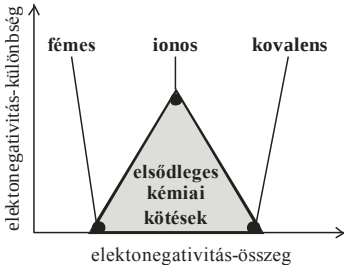
Elektronegativitás *L. Pauling* szerint (relatív egységekben)



II. Elektrosztatikus kölcsönhatáson alapuló kötések

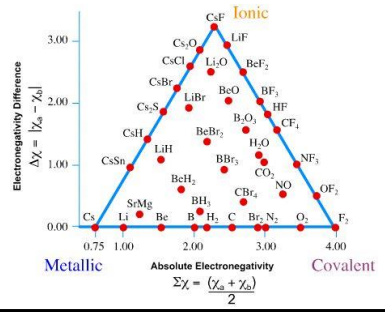
Elektronegativitás különbség:

< 0,6 (apoláris kovalens) **0,6 – 2,1** (poláris kovalens) **2,1 <** (ionos)



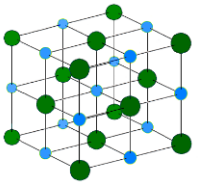
II. Elektrosztatikus kölcsönhatáson alapuló kötések

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



II./a Ionos kötés

- (+) és (-) ponttöltések között Coulomb erők
- Heteropoláris kötések „határesete”
- Nagy EN különbségű atomok között *(pl. NaCl, ΔEN=3-0,9=2,1)*
- Általában sokatomos kristályok, de értelmezhető két atomra is
- Hosszú hatótávú kh., de ez a közegtől is függ (lsd. hidratáció)
- Erős kölcsönhatás (E_k > 1 eV)

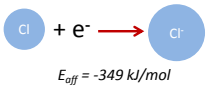


Ionrács: a pozitív és negatív ionok kristályos rendben helyezkednek el sztöchiometriai arányú halmazban.

II./a Ionos kötés

Példa:

E_i = 496 kJ/mol



E_{aff} = -349 kJ/mol

$E_{rács}$ = -788 kJ/mol

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 töltéseloszlás
- Intra/intermolekuláris kölcsönhatás
- Gyenge kölcsönhatás (E_k = 0,003-0,02 eV)

- A dipólusok közti vonzás és taszítás:

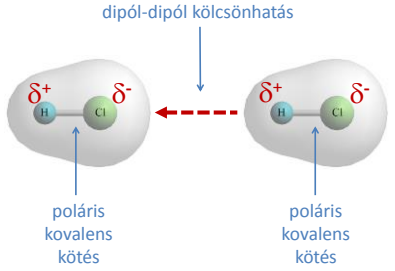
$E_{vonzó} = p\,E$

p: dipólusmomentum
E: környező partnerek által keltett elektromos térerősség

$E_{taszító}$: partnerek elektronfelhőjének taszítása

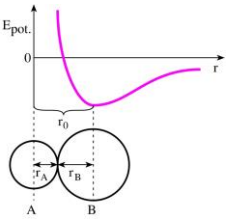
II./b Dipól-dipól kölcsönhatás

Példa:



III. Van der Waals-kölcsönhatások

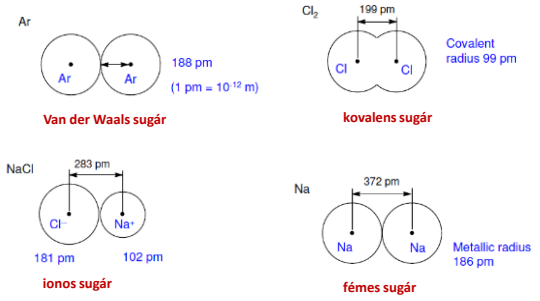
- Apoláris molekulákban/molekularészekben időlegesen kialakuló dipólus egy másik apoláris molekulában dipólust indukál
- Közöttük vonzó (diszperziós, vagy London-féle) erők lépnek fel
- Inter/intramolekuláris kölcsönhatás
- Nagy jelentőség biokémiai reakciókban, szerkezetstabilizálásban
- Gyenge kölcsönhatás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



r_0 : kötéshossz

r_A és r_B : az A és B atom Van der Waals sugara

Atomi méretek fogalma

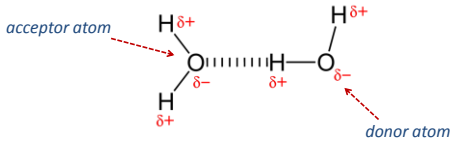


Elektrosztatikus kölcsönhatáson alapuló kötések

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

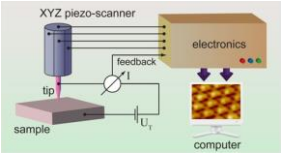
- Két nagy elektronegativitású atom között létrejövő H-híd
- Általában **F, N, O** atomok között
- Intermolekuláris / intramolekuláris kölcsönhatás
- Kötéstáv ált.: 0,23 – 0,35 nm
- A kötés térben irányított
- Nagy jelentőség biokémiai reakciókban, szerkezetstabilizálásban
- Közepes erősségű kölcsönhatás (E_k ~ 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 *(lsd. entrópianövekedés elve, 2. félév)*
- Intra/intermolekuláris kölcsönhatás
- Nagy jelentőség biokémiai reakciókban, szerkezetstabilizálásban
- Gyenge kölcsönhatás

Pásztázó próbamikroszkópiák
(Scanning Probe Microscopy, SPM)

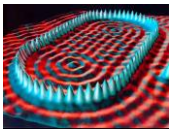


Változatos szerkezetvizsgáló eljárások, melyek egy vékony szonda és valamely felület között létrejövő atomi szintű kölcsönhatások detektálásán alapulnak.

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

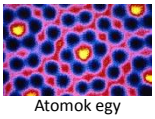
Nem diffrakció-limitált módszerek.

Akár pm-es pásztázási pontosság is elérhető.

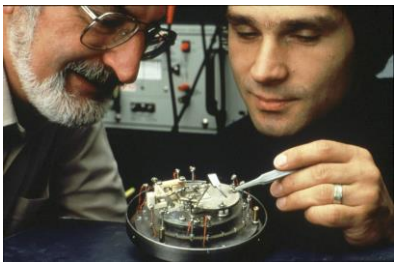


Vasatomok rézen, STM kép

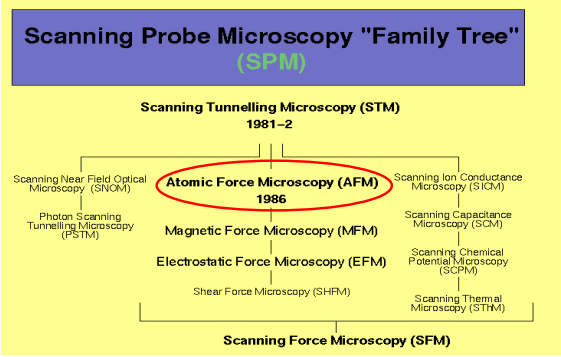
Scanning Tuneling Microscope (STM) 1981
Pásztázó alagút-mikroszkóp



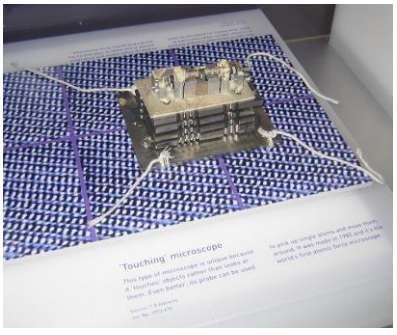
Atomok egy szilíciumlapkán



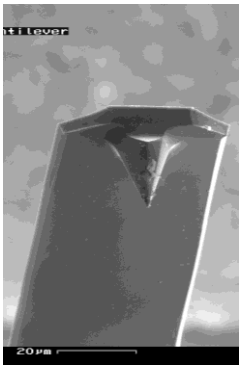
Heinrich ROHRER és Gerd BINNING
Nobel díj: 1986



Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia



A szonda: piciny tű



Egy kb. 100-500 µm hosszú laprugóhoz (vagy rugólapkához) kapcsolva.

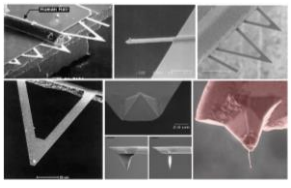
Anyaga: ált. szilícium-nitrid

Általában fémbevonat (Au, Cu, Ni...)

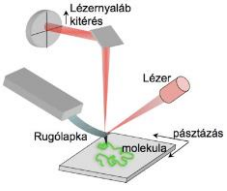
Tűhegy sugara: 0.1 nm – 100 µm

Rugóállandó: k~0.1-10 N/m

f_0~50-500 kHz



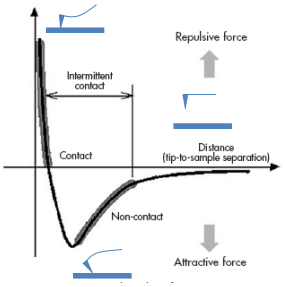
Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia



- A szonda egy rugalmas, mikroszkópikus méretű laprugóra szerkesztett parányi tű.
- A tűhegy atomjai és a minta felületének atomjai között taszító-vonzó kölcsönhatások a rugólapka elhajlását okozzák.
- 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

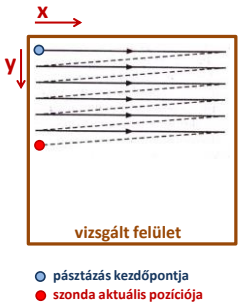


Atomi kölcsönhatások a tűhegy és a minta között:

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

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

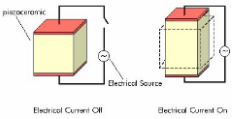
Pásztázási mintázat:



Pásztázás alapja:

Inverz piezoelektromos hatás: Bizonyos anyagokban (pl. kvarc kristály) feszültség hatására deformáció jelentkezik (~1nm hosszváltozás/Volt).

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

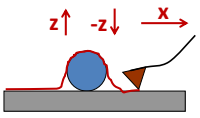


(Bővebben: Ultrahang ea., 2. félév)

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Kontakt mód: (Contact mode)

- A tű folyamatos 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.

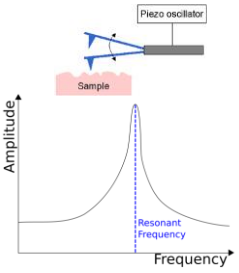


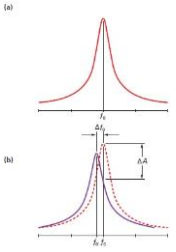
Hátrány: jelentős perturbáció lehet vertikális és horizontális irányban.

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

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

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

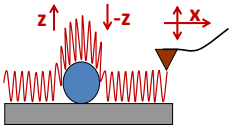




Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

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

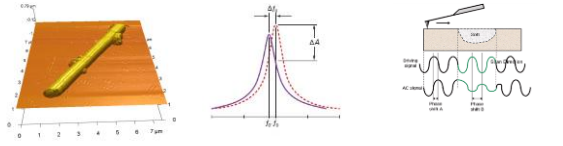
- A tűt a rezonanciafrekvenciájához közeli frekvencián rezegtetjük.
- Vonalanként pásztázzuk a felszínt.
- A felszínnel való kölcsönhatás miatt a rezgés amplitúdója megváltozhat.
- Az amplitúdót a tű és a felszín távolságának szabályozásával tartjuk állandó értéken.
- Pontról pontra regisztráljuk az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



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

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

magasság kontraszt | amplitúdó-kontraszt | fázis-kontraszt

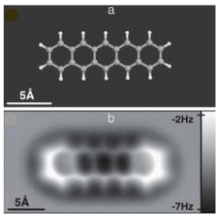


Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

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

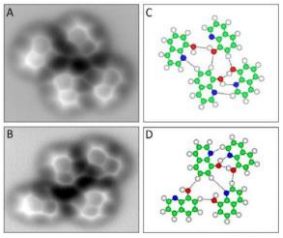
Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Példák:



Pentacén molekula AFM képe

Nature Chemistry 3, 273–278 (2011)

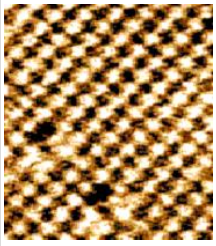


Hidrogénkötések 8-hidroxiquinolin molekulák között (AFM felvétel)

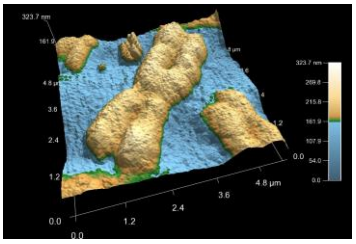
Science 26, 611-614 (2013)

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Példák:



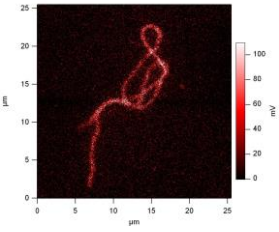
NaCl kristály AFM képe



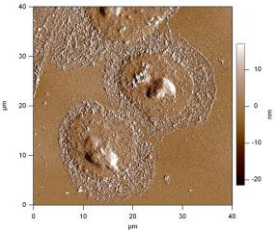
Humán metafázisos kromoszóma AFM képe

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Példák:



Egyedi aktinpolimer AFM képe

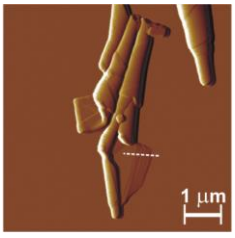


HeLa sejtek AFM képe

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Példák:

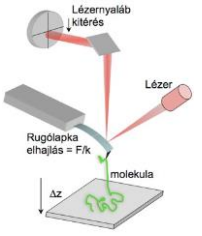
T7 bakteriofágok AFM képe

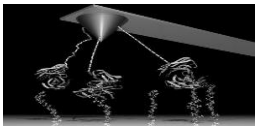


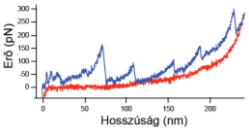
Többrétegű foszfolipid membrán tekercsek

Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

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

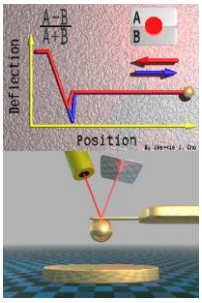






Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Erőspektroszkópia:



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

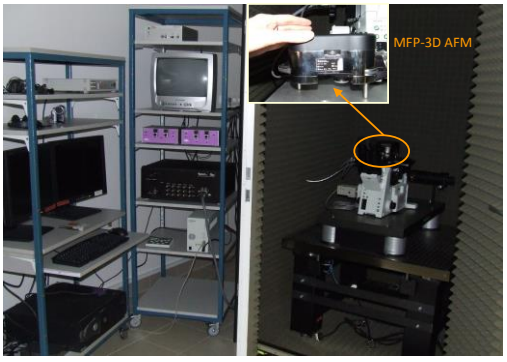
$$F = k \cdot \Delta x$$

k: rugóállandó

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

61

Atomic Force Microscopy (AFM),



Atomic Force Microscopy (AFM),

Köszönöm a figyelmet!