



# Anyagszerkezet, anyaghullámok, atomi és molekuláris kölcsönhatások

Példaként: atomi erő mikroszkópia



Bozó Tamás

Nanobiotechnológia és Molekuláris Biofizika Munkacsoport  
Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet

2017 október 12.

1

## Áttekintés

### Témakörök:

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

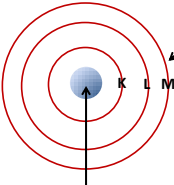
### Kollokviumi tételek:

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<sup>-</sup>

L: max. 8 e<sup>-</sup>

M: max. 18 e<sup>-</sup>

elektron

$m_e = 9.10938356 \times 10^{-31}$  kg

$q_e = 1.60217662 \times 10^{-19}$  C

atommag, nukleonokkal:  
protonok (p<sup>+</sup>)  
neutronok (n<sup>0</sup>)

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, **bolgyómodell**



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

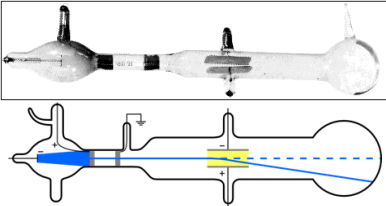
1932

J. Chadwick: neutron felfedezése

## Az elektron felfedezése (1897)



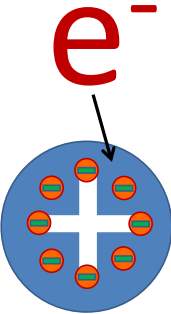
Joseph John Thomson  
1856-1940



Megfigyelések	Következtetések
A katódsugár elektromos térben a pozitív elektród felé hajlik, és mágneses térrel is elteríthető.	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 pudding modellje (1904)



- 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.

### Probléma:

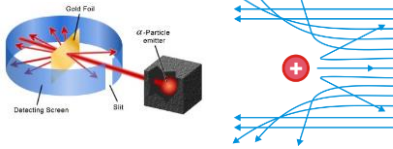
- nem ad magyarázatot az atomok vonalas színképére.

6

### Az atommag felfedezése (1909)



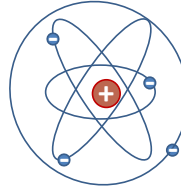
Ernest Rutherford  
1871-1937



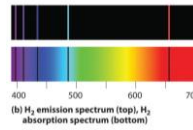
Megfigyelések	Következtetések
Az $\alpha$ részecskék 99.995%-a elhajlás nélkül, vagy enyhe elhajlással áthaladt a fólián.	Az atom sűrűségeloszlása nem egyenletes. A tömeg legnagyobb része egy kis térfogatrészbe tömörül.
Mindössze 0.005%-uk verődött vissza éles szögben.	Ez a térfogatrész az atom térfogatánál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

7

### Rutherford bolygó modellje



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



#### Hiányosságok:

- Nem stabil (gyorsulás  $\rightarrow$  sugárzás  $\rightarrow$  energiavesztés  $\rightarrow$  magba zuhanás)
- Nem magyarázta a  $H_2$  gáz vonalas spektrumát.

8

### Bohr hidrogénatomja, a „régí kvantumelmélet” (1913)



Niels Henrik David Bohr  
1885-1962

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

$$m_e \cdot v \cdot r = n \cdot \frac{h}{2\pi} = n \cdot \hbar$$

impulzusmomentum  
 $L [kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}]$

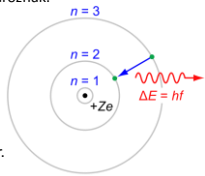
Ezek a pályák tartózkodva energiájuk meghatározott és állandó ( $E_1, E_2, E_3, \dots$ ), nem sugároznak.

#### II. Frekvenciafeltétel:

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

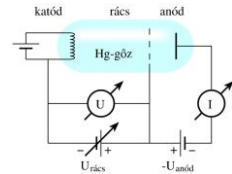
$$f = \frac{\Delta E}{h}$$

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

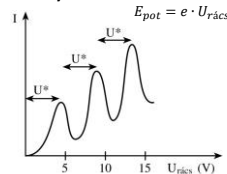


9

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



#### Eredmény:



James Franck  
1882-1964



Gustav Ludwig Hertz  
1887-1975

#### Következtetés:

Az atom energiája nem változhat folytonosan, hanem meghatározott értékeket (quantumokat) vehet fel.

10

### Az elektron hullámtermészete (1923)

Einstein:  
tömeg-energia  
equivalencia

$$E = mc^2$$

Planck:  
sugárzási  
törvény

$$E = h \cdot f$$

Maxwell:  
fény terjedési  
sebessége

$$c = \lambda \cdot f$$

**Ha a fény részecske, akkor az elektron lehet hullám?**



Louis Victor de Broglie  
1892-1978

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

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

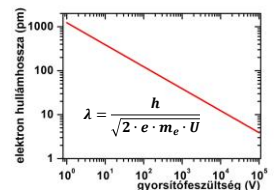
**Részecske-hullám dualitás:** Az elektron egyszerre tekinthető szubatomi részecskének és hullámjelenségnek. Ez általánosítható minden részecskére (anyaghullámok).

11

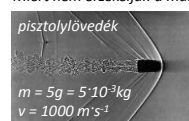
### Az elektronhullám hullámhossza

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{h}{p} \\ p &= m_e \cdot v \end{aligned} \right\} \lambda = \frac{h}{m_e \cdot v}$$

$$\left. \begin{aligned} E_{pot} &= e \cdot U \\ E_{kin} &= \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 \\ E_{kin} &= E_{pot} \end{aligned} \right\} v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m_e}}$$



Miért nem érzékeljük a makroszkopikus testek hullámtulajdonságait?



$$\begin{aligned} m &= 5g = 5 \cdot 10^{-3} kg \\ v &= 1000 m \cdot s^{-1} \end{aligned}$$

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

### Interferencia kísérletek (1927-28)

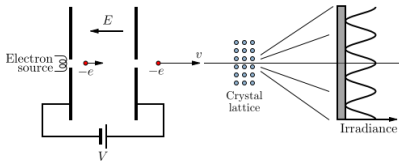


J. Davisson and L.H. Germer



G. P. Thomson

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



13

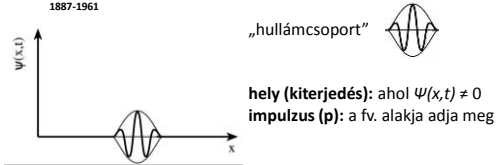
### Az elektron hullámtermésze

Erwin Schrödinger  
1887-1961

#### Az elektronhullám terjedési törvénye (1926):

A hullámfüggvény (állapotfüggvény)  $\psi(x,t)$  az elektronhullám „amplitúdóját” a hely ( $x$ ) és az idő ( $t$ ) függvényeként adja meg.

Az elektront mint kiterjedt, folytonos töltésselhőt írja le, aminek a tér minden pontjában  $\psi^2$ -tel arányos töltéssűrűsége van.



14

### Szabad elektron terjedése

$\psi(x,t) \neq 0$  több pontra is teljesül  $\rightarrow$  a hely nem határozható meg egyetlen számmal.

$\psi(x,t)$  : nem periodikus függvény  $\rightarrow$  nincs egyértelmű hullámhossza  $\rightarrow$  A kb. legnagyobb ( $\lambda_1$ ), ill. legkisebb ( $\lambda_2$ ) értékek között bármilyen  $\lambda$ -val jellemezhető.

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

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

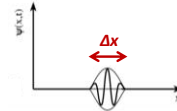


### Heisenberg-féle határozatlansági reláció (1927):

Werner Karl Heisenberg  
1901-1976

Az állapotfüggvény  $\psi(x,t)$  önmagában teljesen határozott, egyértelmű függvény.

A hordozott információ egy része (pl. hely, impulzus) azonban határozatlan.



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

$\Delta x$ : hely határozatlansága  
 $\Delta p$ : impulzus határozatlansága  
 $h$ : Planck' állandó

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

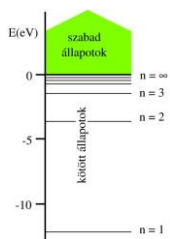
Általános elv: a részecskéket jellemző más komplementer változókra is érvényes. Pl.:

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

16

### Mi a helyzet a kötött állapotú elektronokkal?

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



#### Következmény:

- Dinamikus egyensúly (magvonzás és szétterülés között).
- Szimmetrikus alak (állóhullámszerű)
- Stacionárius függvény  $\rightarrow \psi(x)$

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

Mivel  $\Delta t$  teljesen határozatlan  $\rightarrow E$  teljesen határozott  $\rightarrow$  **diszkrét energiaszintek**.

17

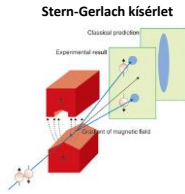
### Hogyan jellemezhetjük az atomi elektronállapotokat?

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

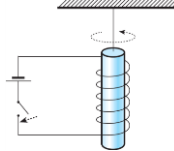
**Elektronpálya (orbitál):**  $n, l, m$ , kvantumszámokkal jellemezhető állapot. Rajta max. 2 db, ellentétes spinű elektron tartózkodhat.

18

### Az elektron saját impulzusmomentuma (spin)

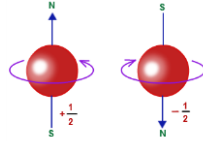


Einstein-de Haas kísérlet



#### Következtetések:

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

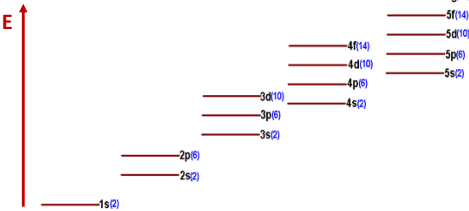


Spinkvantumszám:  $m_s$  vagy  $s = \pm 1/2$

### 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

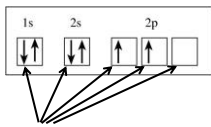


**Hund szabály:** Adott elektronkonfigurációra a legalacsonyabb energiájú állapot a legnagyobb eredő spinértéknél van.

### Hogyan foglalják el az elektronok a kvantumállapotokat?

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

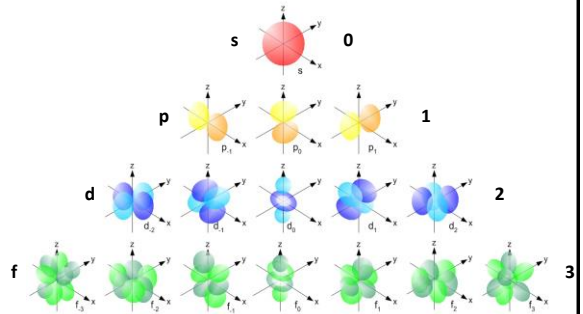
**Egy példa:** Szénatom,  $Z=6$ , konfigurációja:  $1s^2 2s^2 2p^2$



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

21

### Elektronpályák (orbitálok) szemléltetése



22

### Atomi kölcsönhatások

23

### 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 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 tartják össze
- Vegyértékelektronok 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
$H_3C-CH_3$ etán	154 pm	-331 KJ·mol <sup>-1</sup>
$H_2C=CH_2$ etén (etilén)	139,9 pm	-590 KJ·mol <sup>-1</sup>
$HC\equiv CH$ etin (acetilén)	120,3 pm	-812 KJ·mol <sup>-1</sup>

**I. Kovalens kötés**

**Apoláris (homeopoláris)**  
 (+) és (-) töltések súlypontja egybeesik  
 kötőelektronok egyenletes eloszlása  
 „tisztá 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] ( $1D = 3,34 \cdot 10^{-30} \text{ Cm}$ )

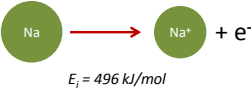
**I./b Fémies kötés**

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

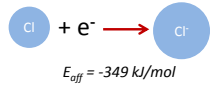


II./a Ionos kötés

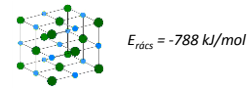
Példa:



**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 erő
- Permanens dipólus jellegű töltéeloszlás
- Intra/intermolekuláris kölcsönhatás
- Gyenge kölcsönhatás ( $E_k = 0,003-0,02$  eV)
- A dipólusok közti vonzás és taszítás:

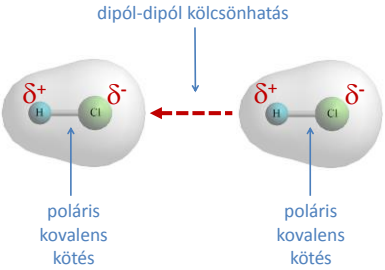
$E_{vonzo} = p E$

$p$ : dipólusmomentum  
 $E$ : környező partnerek által keltett elektromos térerősség

$E_{taszító}$ : partnerek elektronfelhőjének taszítása

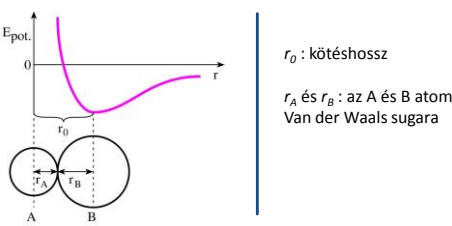
II./b Dipól-dipól kölcsönhatás

Példa:

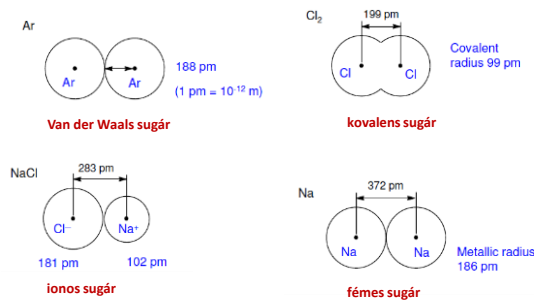


III. Van der Waals-kölcsönhatások

- 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 ( $E_k \sim 0,02$  eV)



Atomi méretek fogalma



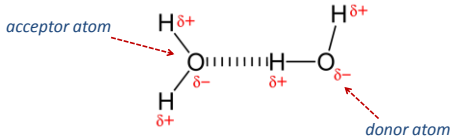
Elektrosztatikus kölcsönhatáson alapuló kötések

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)

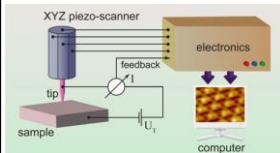


#### V. Hidrofób kölcsönhatás



- Vizes közegben értelmezhető (pl. biológiai rendszerek)
- Hidrofób molekulák/molekularészek asszociációja, cél a víz kizorítása
- Nem csak Van der Waals alapú, hajtóereje a apoláros rész - víz határfelület csökkentése, ezzel a vízmolekulák rendezettségének csökkentése (Ist. entrópiavételezés elve, 2. félév)
- Intra/intermolekuláris kölcsönhatás
- Nagy jelentőség biokémiai reakciókban, szerkezetstabilizálásban
- Gyenge kölcsönhatás

#### Pásztázó próbamikroszkópiák (Scanning Probe Microscopy, SPM)

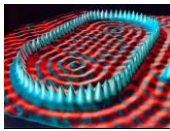


Változatos szerkezetvizsgáló eljárások, melyek egy vékony szonda és valamely felület között létrejövő atomi szintű kölcsönhatások detektálásán alapulnak.

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

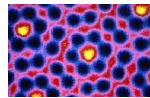
Nem diffrakció-limitált módszerek.

Akár pm-es pásztázási pontosság is elérhető.

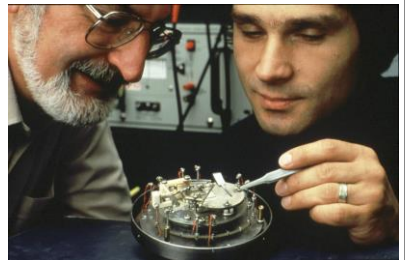
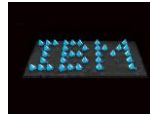


Vasatomok rézen, STM kép

#### Scanning Tunneling Microscope (STM) 1981 Pásztázó alagút-mikroszkóp

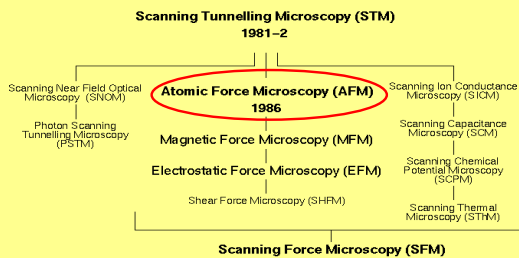


Atomok egy szilíciumlapkán

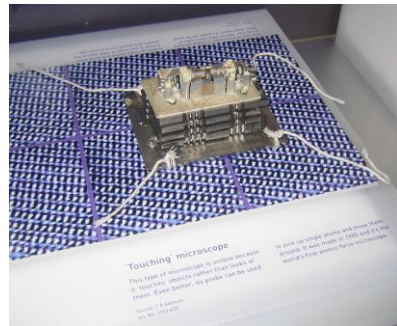


Heinrich ROHRER és Gerd BINNING  
Nobel díj: 1986

#### Scanning Probe Microscopy "Family Tree" (SPM)



#### Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

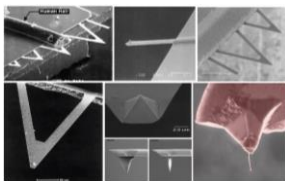




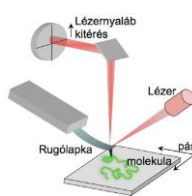
### A szonda: piciny tű



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



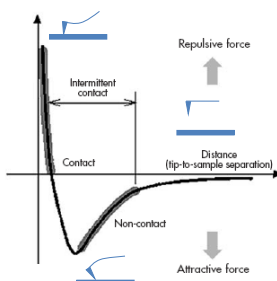
### Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia



- 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 folyadékokban (fiziológiai közeg) is működőképes
- Szinte mindenféle felületen alkalmazhatók.
- nm- $\mu\text{m}$**  nagyságú objektumok szkennelhetők.
- Natív minták vizsgálhatóak:** nem kíván fixálást, festést vagy jelölést.

### Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

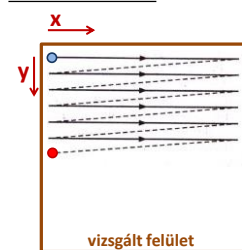


#### Atomi kölcsönhatások a tűhegy és a minta között:

- 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:

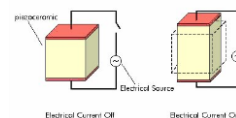


- pásztázás kezdőpontja
- szonda aktuális pozíciója

#### 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.

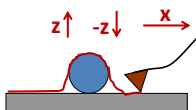


(Bővebben: Ultrahang ea., 2. félév)

### Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

#### Kontakt mód: (Contact mode)

- A tű 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.

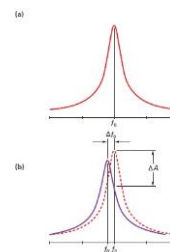
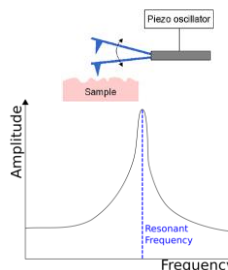


**Hátrány:** jelentős perturbáció lehet vertikális és horizontális irányban.

### Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

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

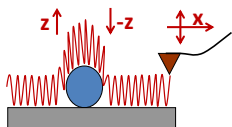
**Rezonancia:** kényszerrezgés,  $f \approx f_0$ , nagy amplitúdók



### Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

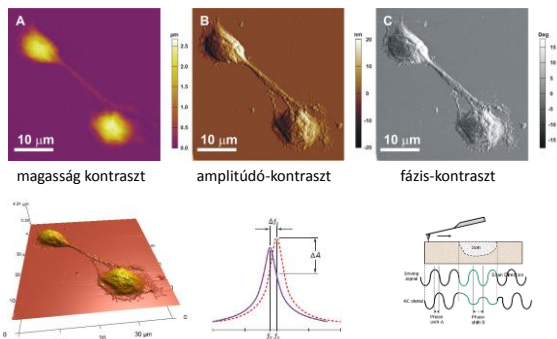
**Oscilláló mód:** (Tapping mode, Non-contact mode)

- 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 erőképzés, érzékeny minták vizsgálatára is alkalmas.

### Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

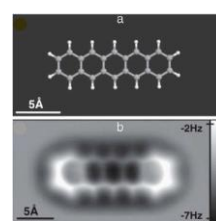


### Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

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

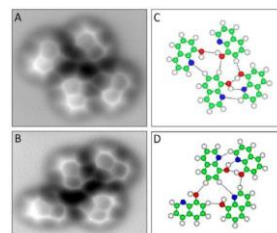
### Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

**Példák:**



Pentacén molekula  
AFM képe

Nature Chemistry 3, 273–278 (2011)

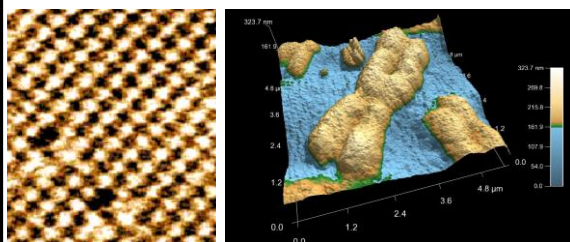


Hidrogénkötések 8-hidroxiquinolin  
molekulák között (AFM felvétel)

Science 26, 611-614 (2013)

### Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

**Példák:**

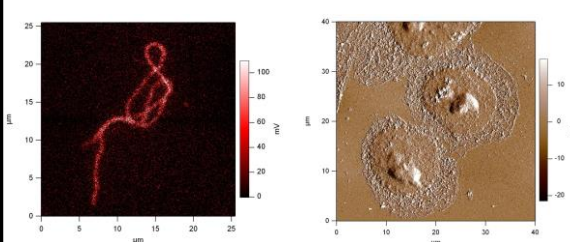


NaCl kristály AFM képe

Humán metafázisos kromoszóma AFM képe

### Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

**Példák:**

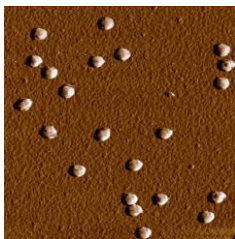


Egyedi aktinpolimer AFM képe

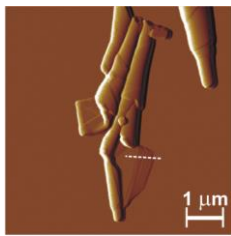
HeLa sejtek AFM képe

### Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

Példák:



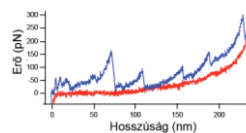
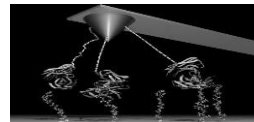
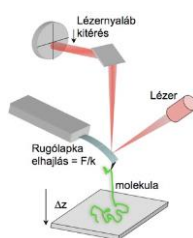
T7 bakteriofágok AFM képe



Többrétegű foszfolipid membrán tekercsek

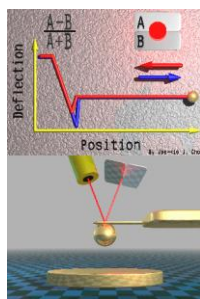
### Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia

**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:**



**Hook törvény:** A rugólapka elhajlása ( $\Delta x$ ) arányos az erővel ( $F$ ): (Rezonancia gyak.)

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

$k$ : rugóállandó

Átszűrési, szakítási, domén-kitekeredési és más erők, viszkozus és elasztikus tulajdonságok mérhetőek így.

63

### Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia



### Atomic Force Microscopy (AFM), Atomi erő mikroszkópia



**Köszönöm a figyelmet!**



Pablo Picasso: "Don Quixote" polikarbonát felületre rajzolva