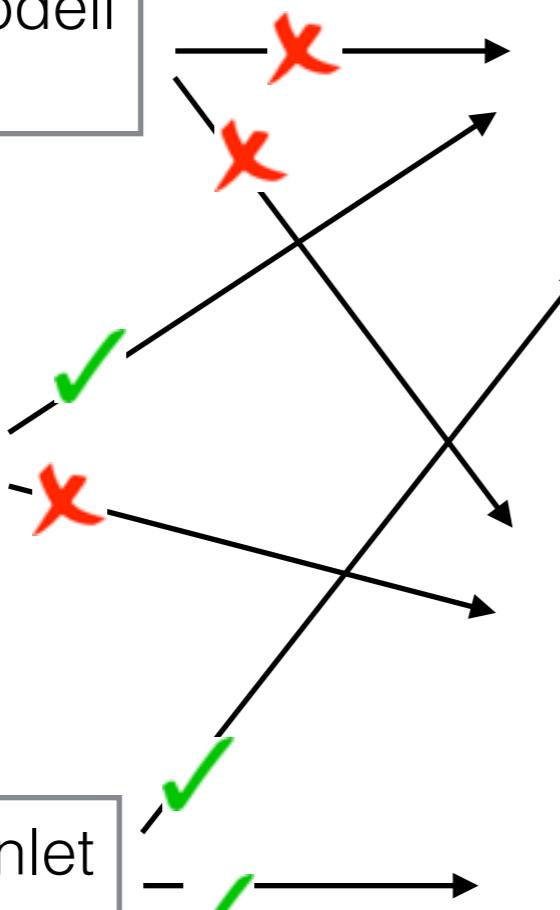


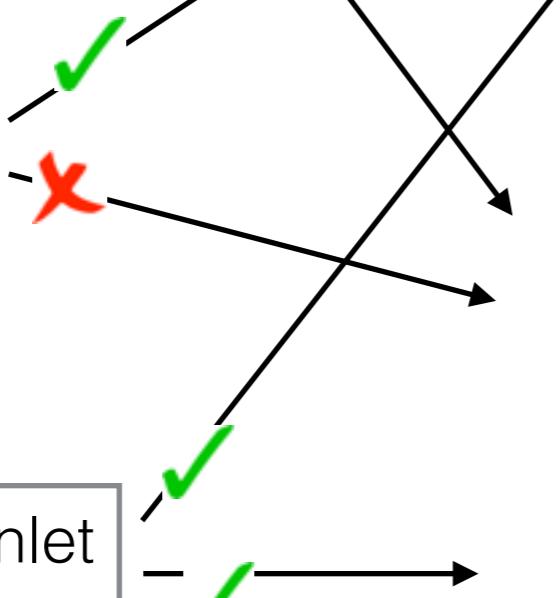
Modern Fizika Gépészsmérnököknek / Fizika M1

4. előadás, 2019.október 1

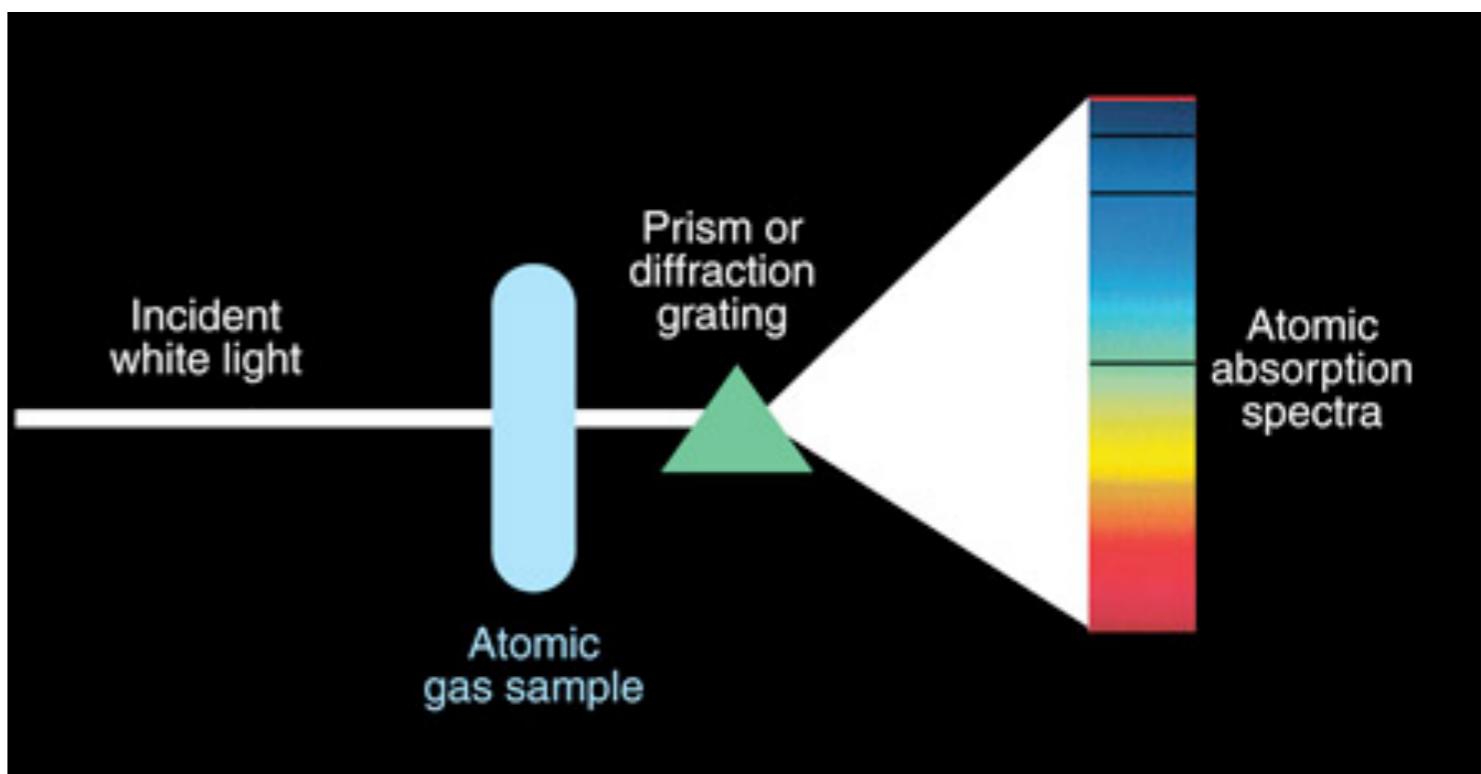
Rutherford-atommodell
(klasszikus)



Bohr-atommodell
(félklasszikus)



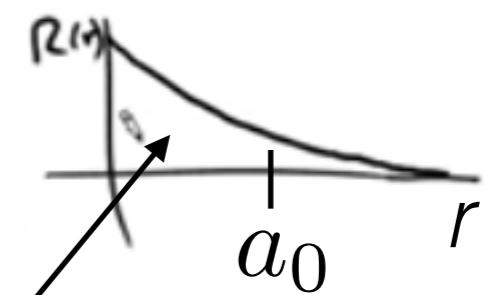
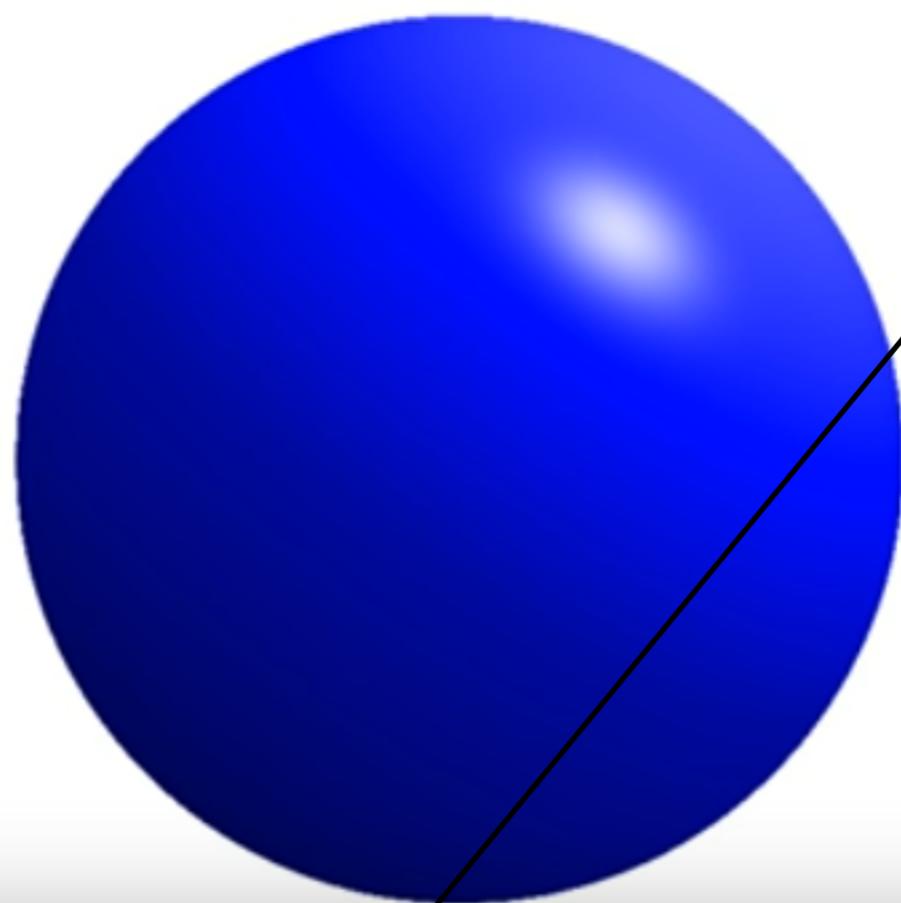
Schrödinger-egyenlet
(kvantumos)



Dense Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18				
1	1 H																2 He					
2	3 Li	4 Be															5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg															13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
6	55 Cs	56 Ba	57 La	* 72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn				
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	* 104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og				
				* 58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu					
				* 90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr					

II Elektronállapotok hidrogénatomban

Visualizations: $(n, l, m) = (1, 0, 0)$



Z : elem rendszáma

hidrogénatom rendszáma: $Z = 1$

$$R_{10} = 2 \left(\frac{Z}{a_0} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-Zr/a_0}$$

$$^2 \text{ Bohr-sugár: } a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e e^2} \approx 0.53 \text{ Å}$$

I/J A periódusos rendszer

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Period ↓	1																		
1	1 H																2 He		
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	57 La	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	*	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
	*	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu				
	*	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr				

I/J A periódusos rendszer

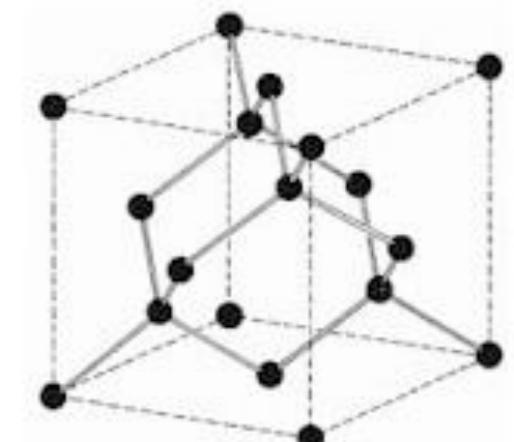
Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Period ↓	1																		
	1 H															2 He			
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	57 La	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	*	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
	*	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu				
	*	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr				

Megfigyelés: különböző atomok sokszor hasonlóan viselkednek

Például:

- nemesgázok (He, Ne, Ar, ...) - nem vesznek részt kémiai kötésekben
- C, Si, Ge, ... - gyémánt-szerkezetben kristályosodnak

Periódusos rendszer oszlopai (a *csoportok*):
hasonló 'elektronszerkezetű' atomok

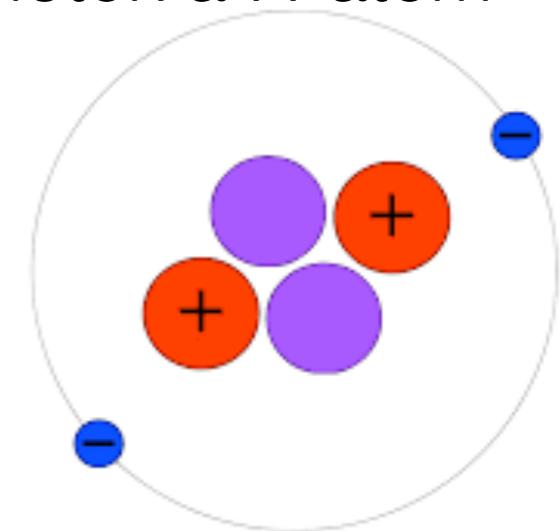


I/J A periódusos rendszer

Állítás: A periódusos rendszer szabályosságai megérthetők a H-atom kvantummechanikai modelljéből.

Kell még hozzá:

- (1) energiaminimum elve
- (2) Pauli-féle kizárási elv (= Pauli-elv)



Példa: He-atom (2 elektron + atommag: 2 proton, 2 neutron)

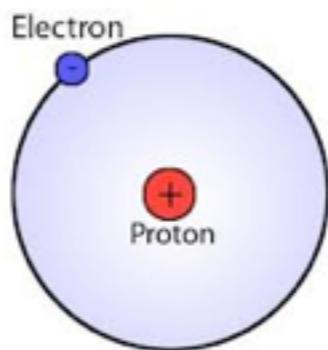
Kérdések:

- (1) Mi az alapállapoti elektronszerkezet?
- (2) Mennyi az alapállapoti energia?
- (3) Hányszorosan degenerált az alapállapot energiaszint?
- (4) Mennyi az első gerjesztett nívó energiája?
- (5) Hányszorosan degenerált az első gerjesztett nívó?

I/J A periódusos rendszer

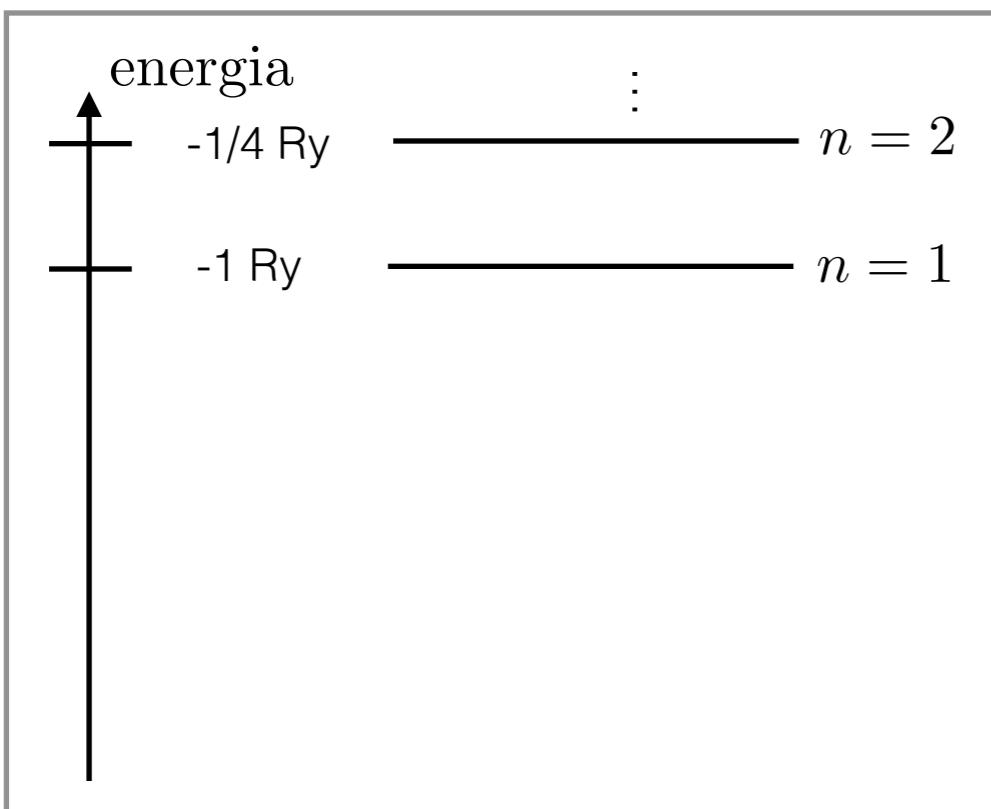
(1) Mi a He-atom alapállapoti elektronszerkezete?
 (Tegyük fel, hogy a két elektron nem hat kölcsön.)

hidrogén (H)

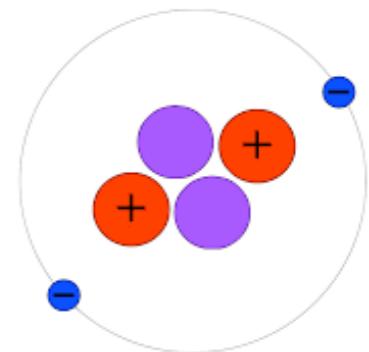


$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \Delta\psi(x, y, z) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \psi(x, y, z) = E\psi(x, y, z)$$

$$E_n^{(\text{H})} = -\frac{1}{2} \frac{m_e^2 (e^2)^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2} = -1 \text{ Ry} \frac{1}{n^2} \approx -13.6 \text{ eV} \frac{1}{n^2}$$

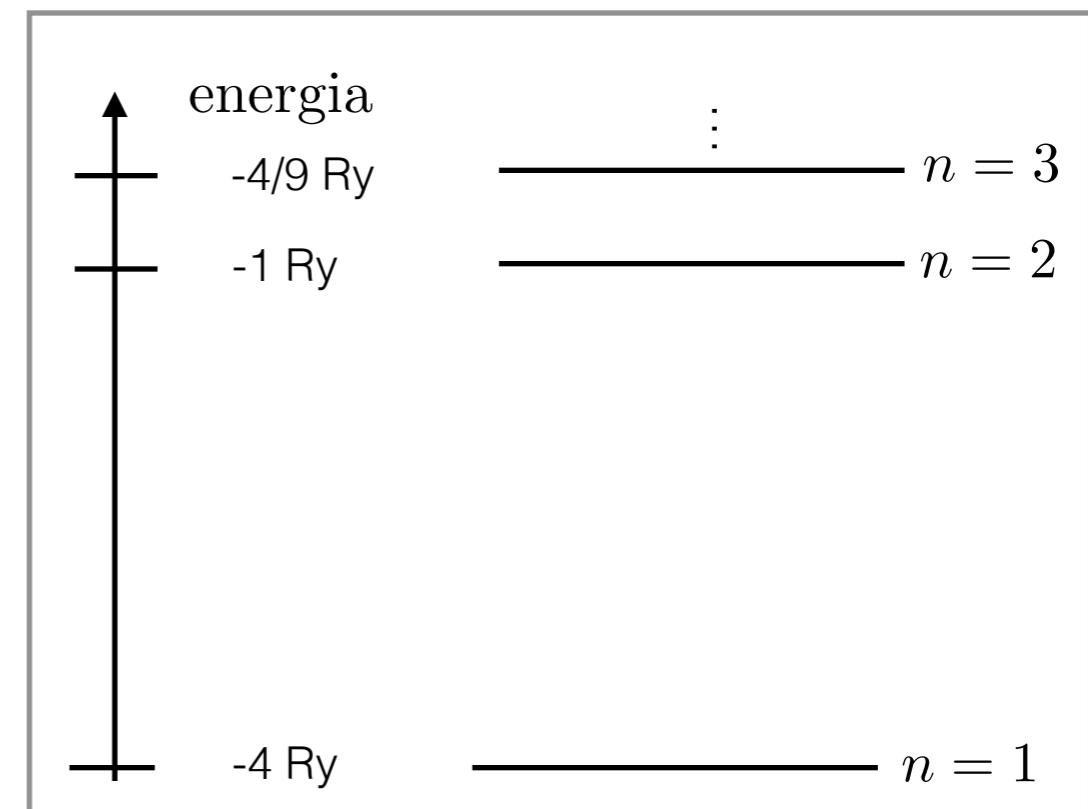


hélium (He)



$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \Delta\psi(x, y, z) - \frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \psi(x, y, z) = E\psi(x, y, z)$$

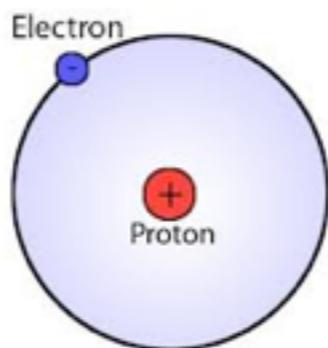
$$E_n^{(\text{He})} = -\frac{1}{2} \frac{m_e^2 (2e^2)^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2} = -4 \text{ Ry} \frac{1}{n^2}$$



I/J A periódusos rendszer

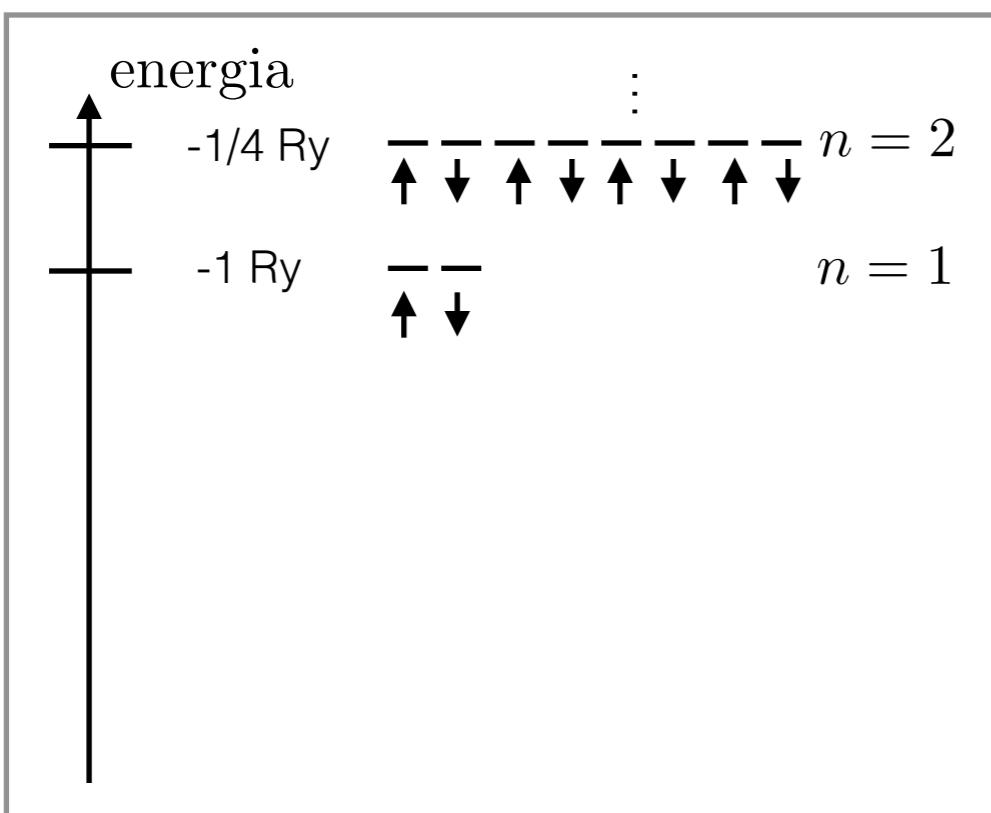
(1) Mi a He-atom alapállapoti elektronszerkezete?
 (Tegyük fel, hogy a két elektron nem hat kölcsön.)

hidrogén (H)

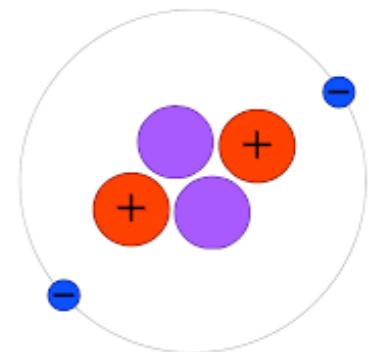


$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \Delta\psi(x, y, z) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \psi(x, y, z) = E\psi(x, y, z)$$

$$E_n^{(\text{H})} = -\frac{1}{2} \frac{m_e^2 (e^2)^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2} = -1 \text{ Ry} \frac{1}{n^2} \approx -13.6 \text{ eV} \frac{1}{n^2}$$

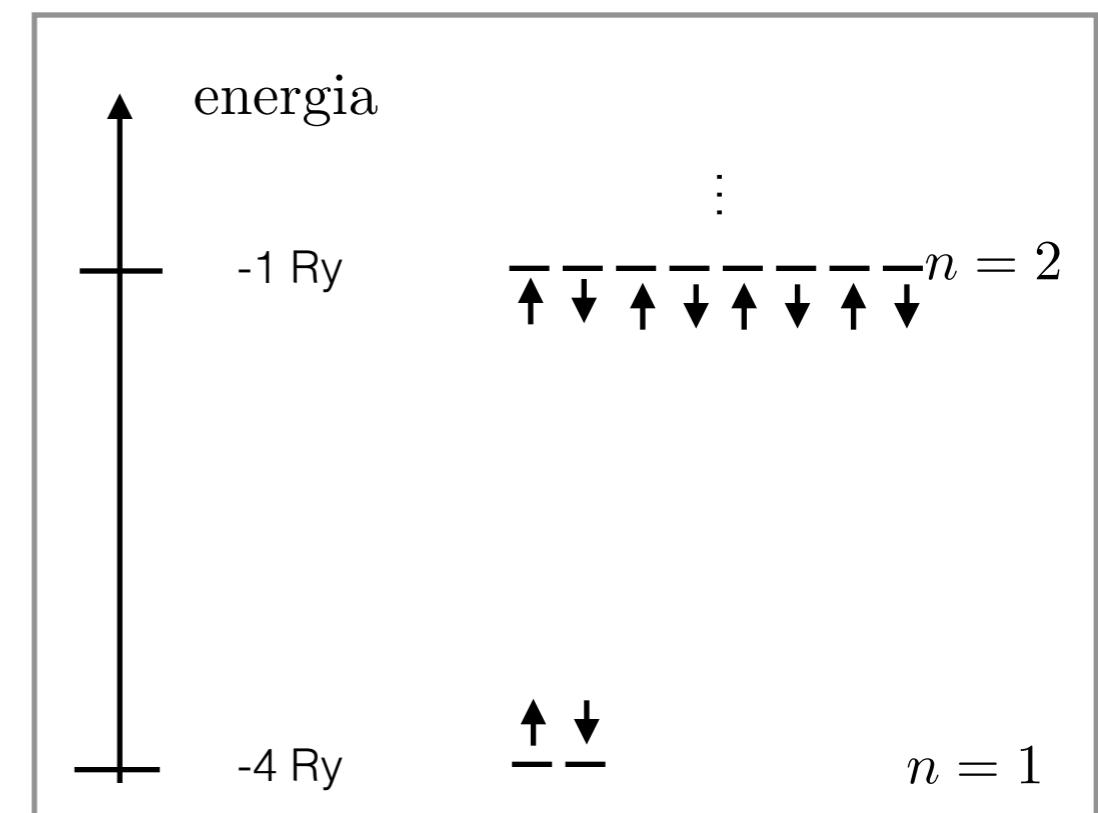


hélium (He)



$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \Delta\psi(x, y, z) - \frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \psi(x, y, z) = E\psi(x, y, z)$$

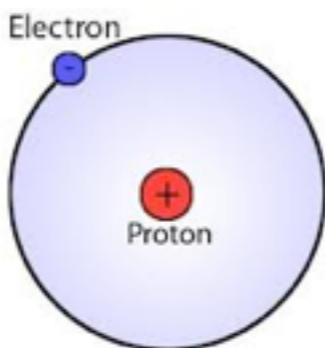
$$E_n^{(\text{He})} = -\frac{1}{2} \frac{m_e^2 (2e^2)^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2} = -4 \text{ Ry} \frac{1}{n^2}$$



I/J A periódusos rendszer

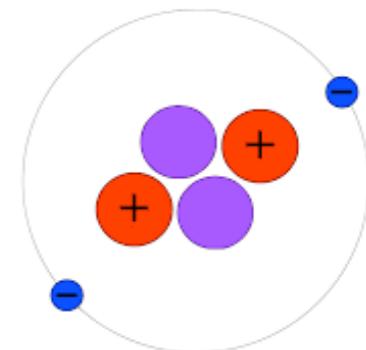
(1) Mi a He-atom alapállapotú elektronszerkezete?
(Tegyük fel, hogy a két elektron nem hat kölcsön.)

hidrogén (H)

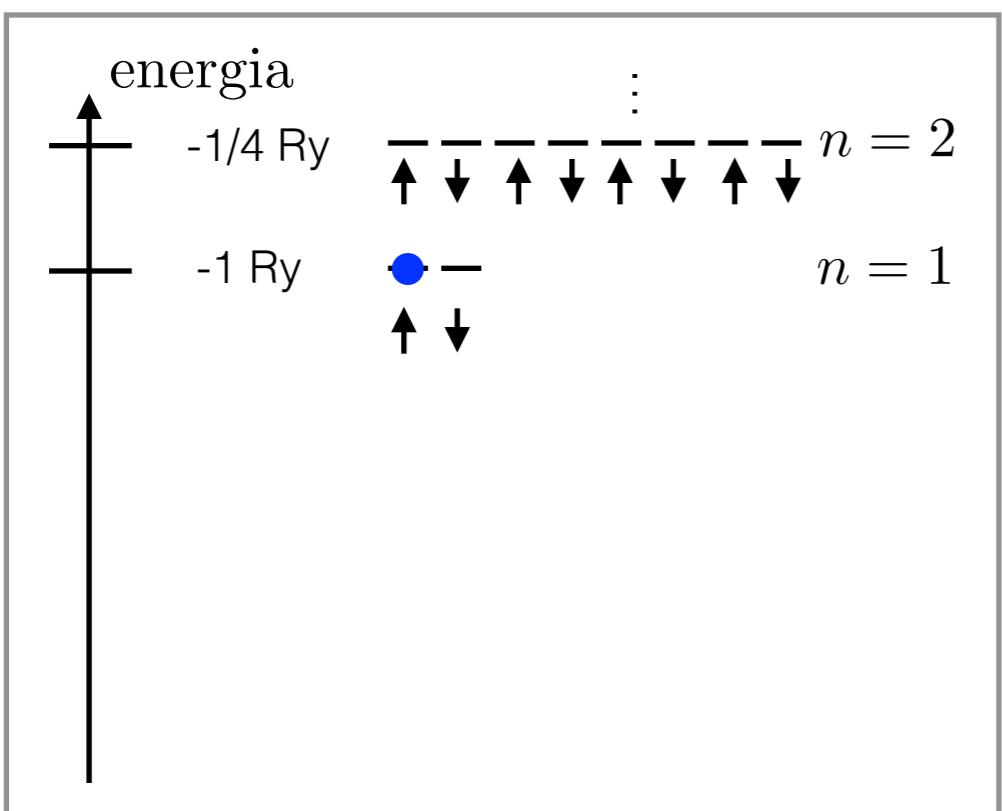


energiaminimum elve:
az elektron(ok) nulla hőmérsékleten
a legkisebb energiájú állapotot hozzák létre

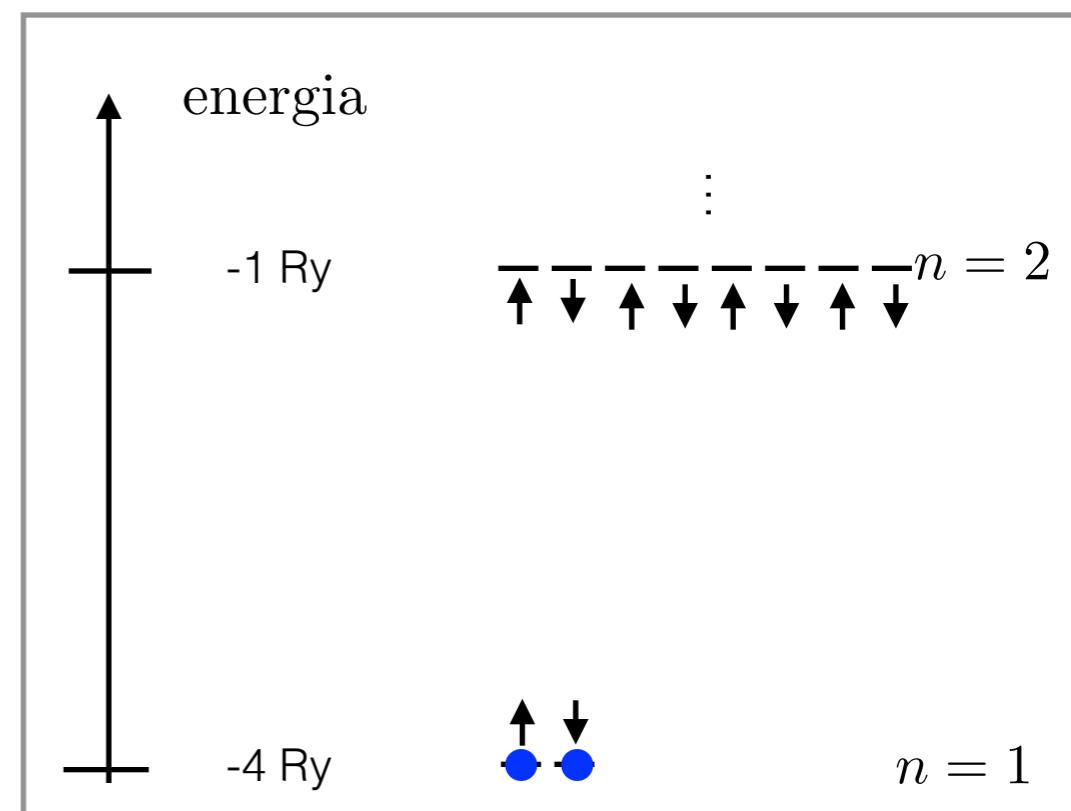
hélium (He)



(energiaminimum elve +)
Pauli-féle kizárási elv:
egy állapotban max. 1 elektron lehet



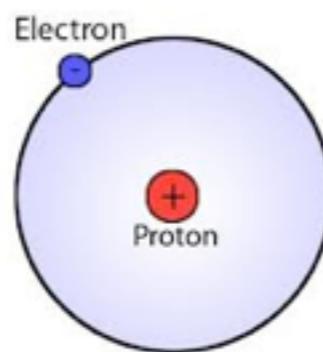
8



I/J A periódusos rendszer

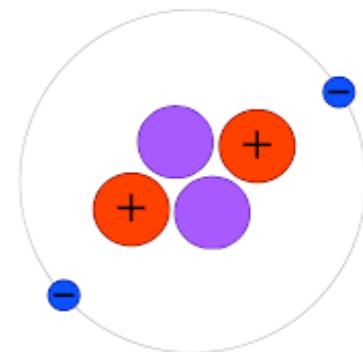
(2) Mennyi az alapállapot energiája?
(Tegyük fel, hogy a két elektron nem hat kölcsön.)

hidrogén (H)

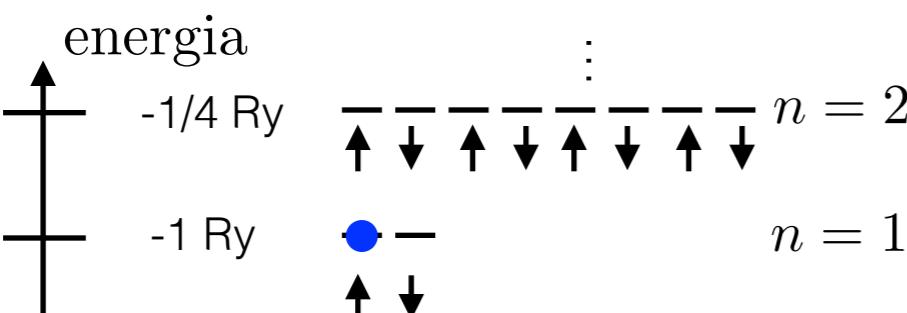


$$E = -1 \text{ Ry}$$

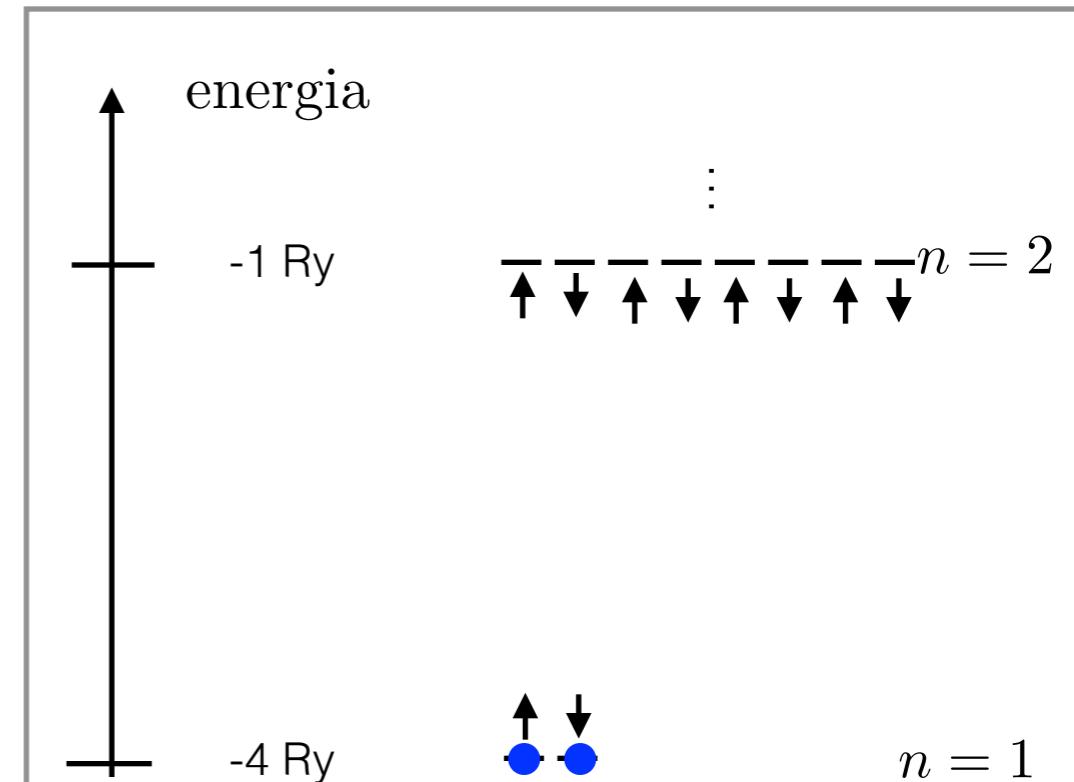
hélium (He)



$$E = -8 \text{ Ry}$$



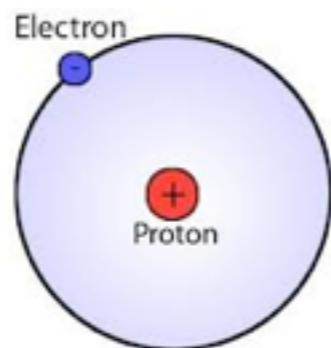
9



I/J A periódusos rendszer

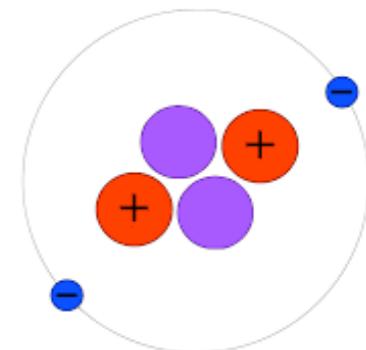
(3) Hányszorosan degenerált az alapállapot energiaszint?
(Tegyük fel, hogy a két elektron nem hat kölcsön.)

hidrogén (H)

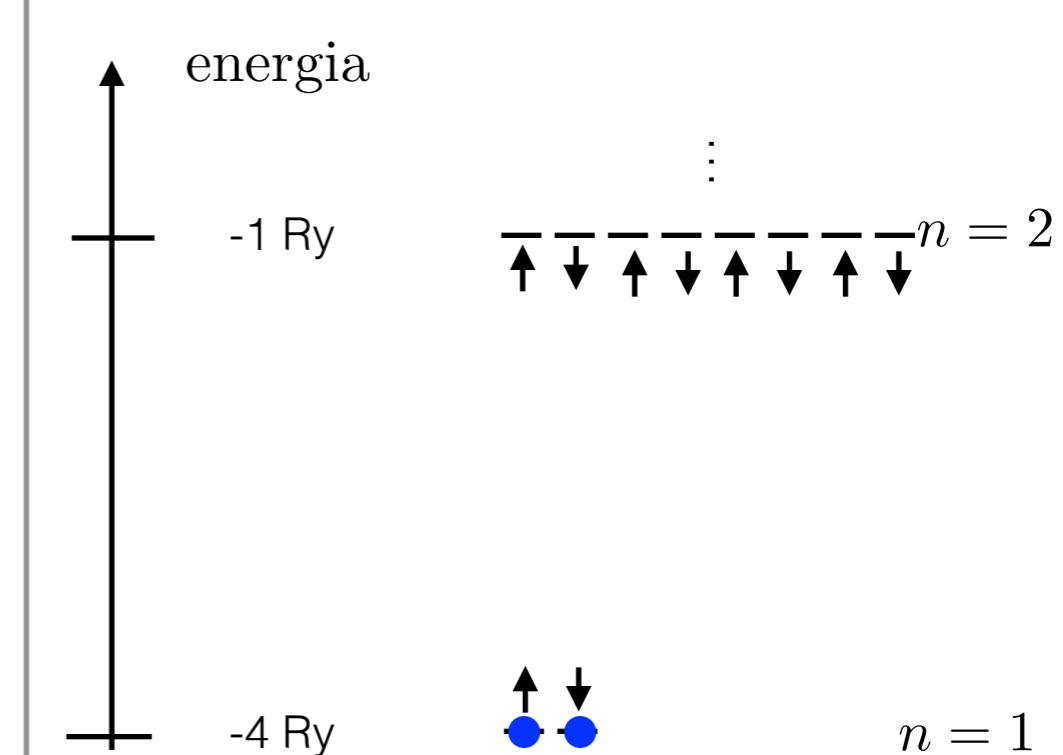
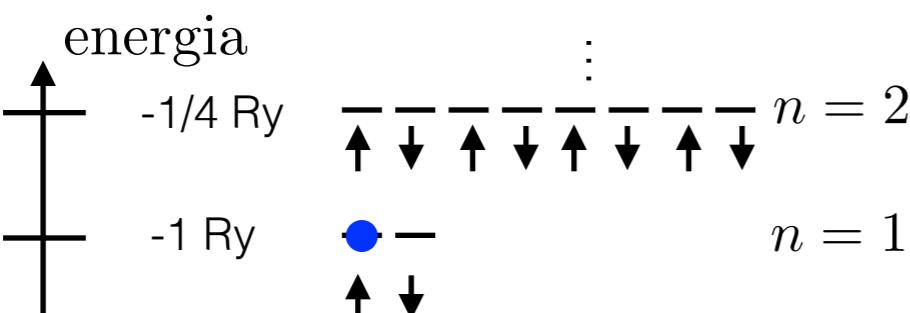


kétszeresen

hélium (He)



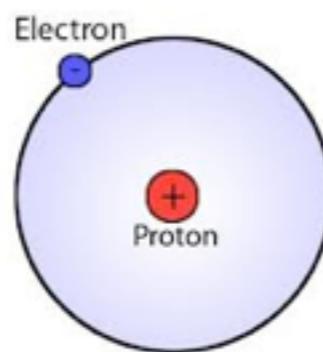
egyszeresen
(azaz nem degenerált)



I/J A periódusos rendszer

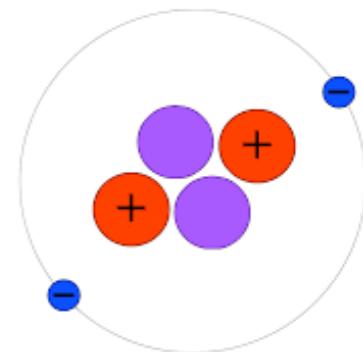
(4) Mennyi az első gerjesztett nívó energiája?
(Tegyük fel, hogy a két elektron nem hat kölcsön.)

hidrogén (H)

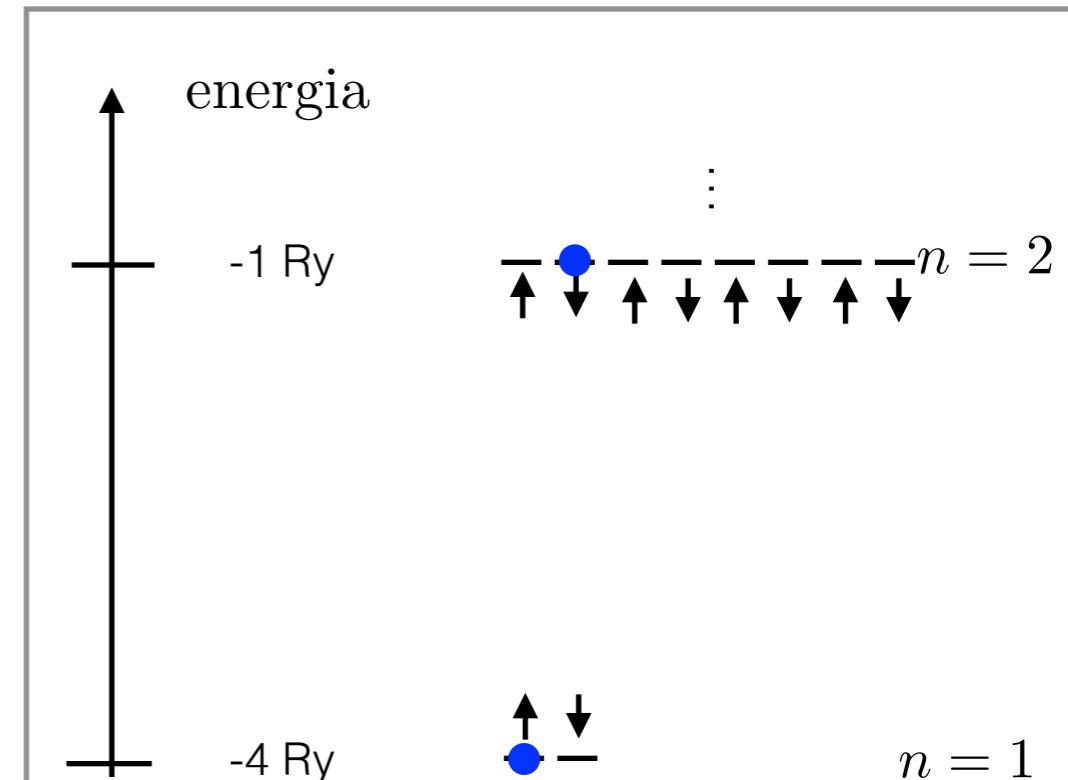
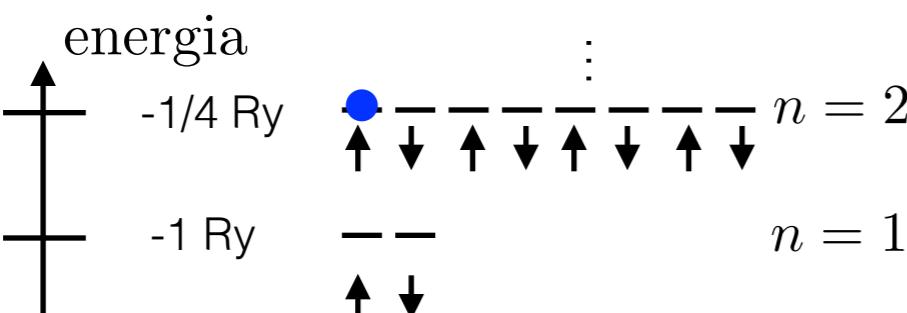


$$E = -1/4 \text{ Ry}$$

hélium (He)



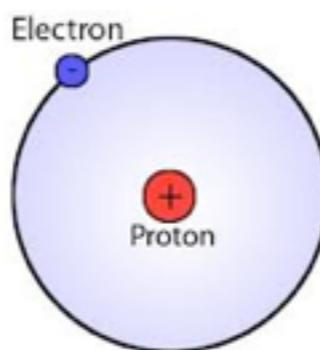
$$E = -5 \text{ Ry}$$



I/J A periódusos rendszer

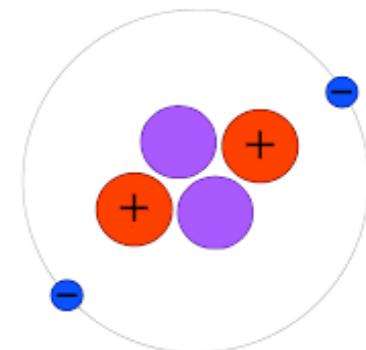
(5) Hányszorosan degenerált az első gerjesztett nívó?
(Tegyük fel, hogy a két elektron nem hat kölcsön.)

hidrogén (H)

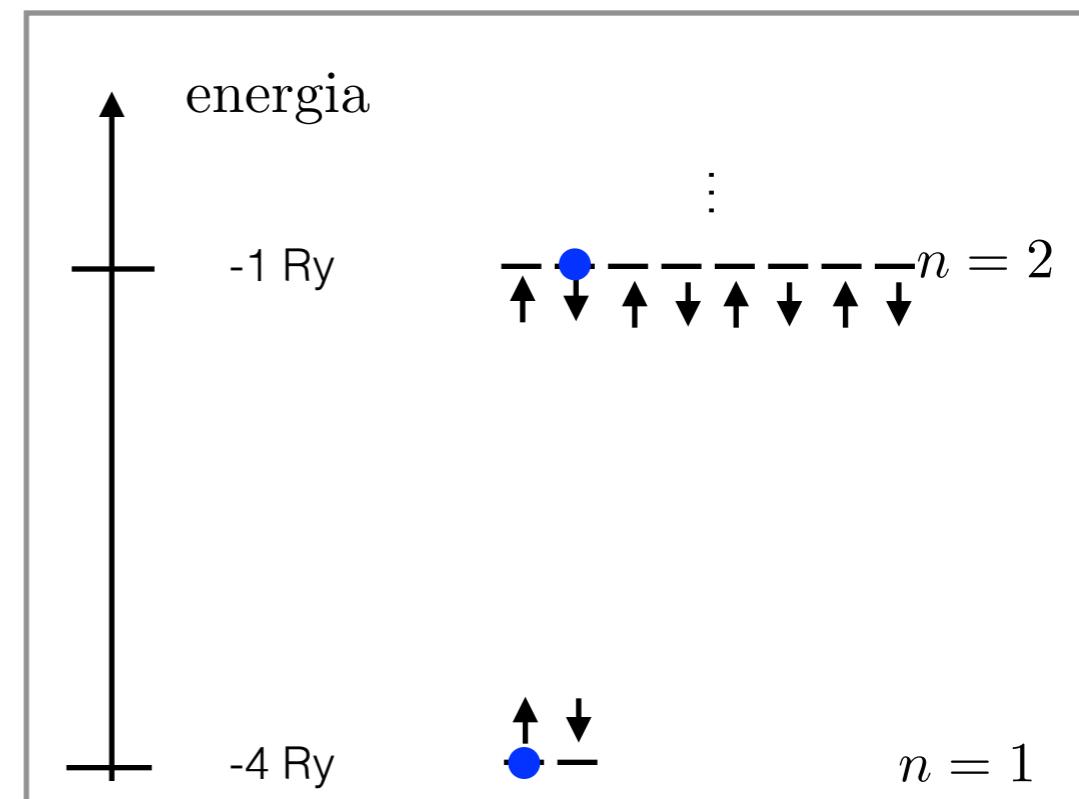
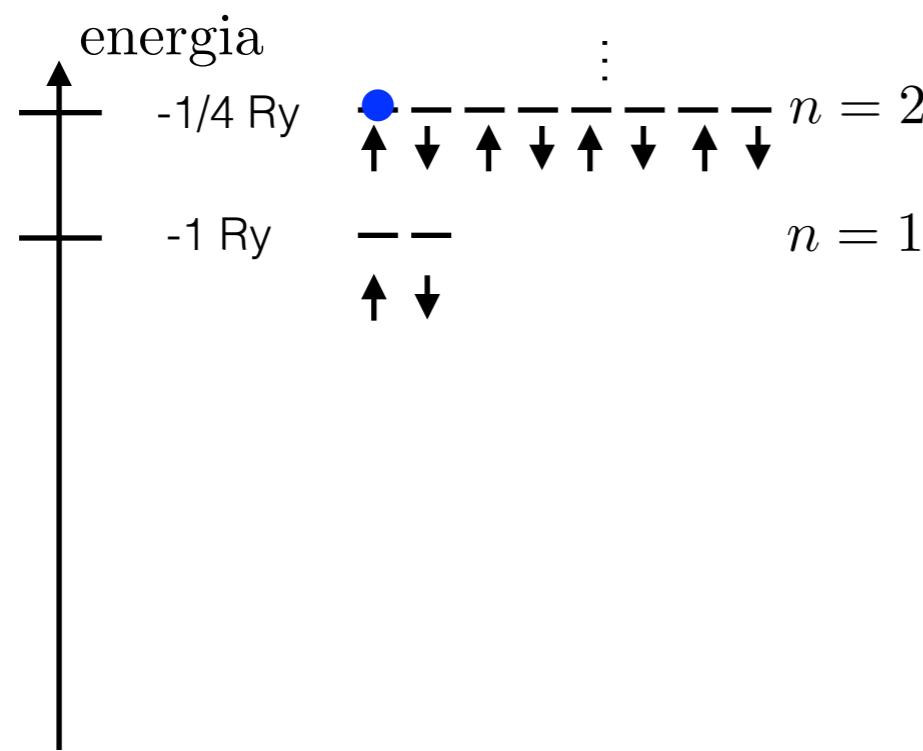


nyolcszorosan

hélium (He)

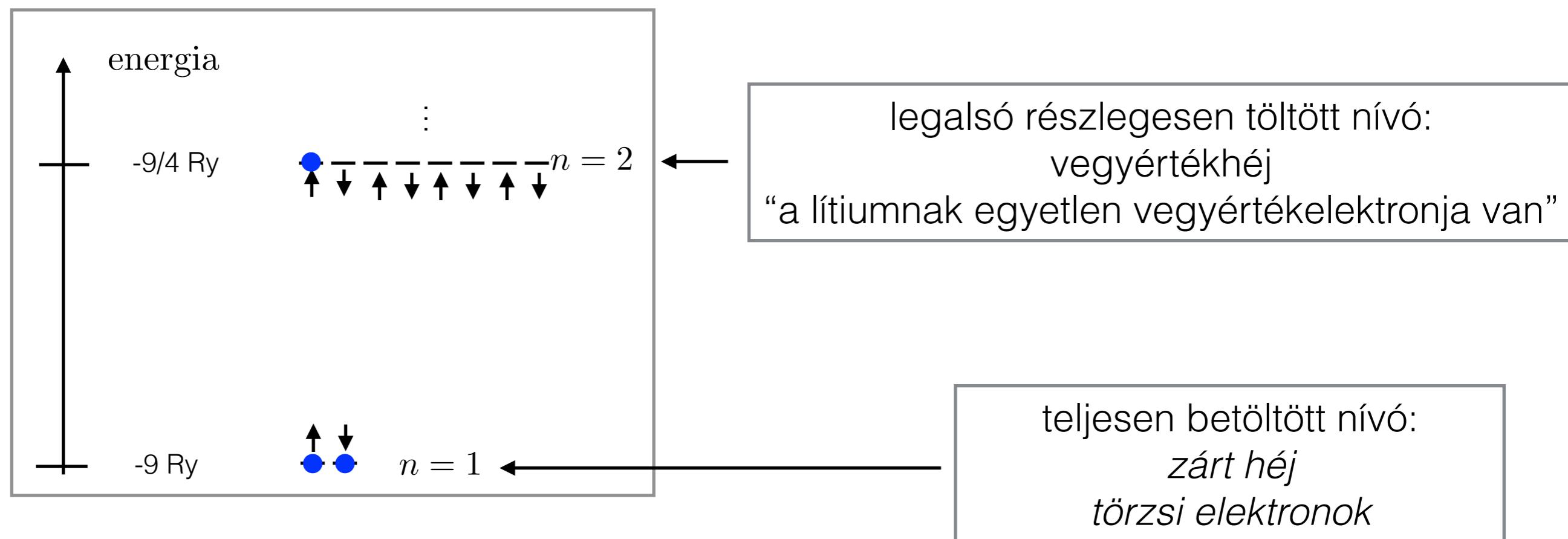


tizenhatszorosan
(2×8 , bármelyik párosítás lehet)



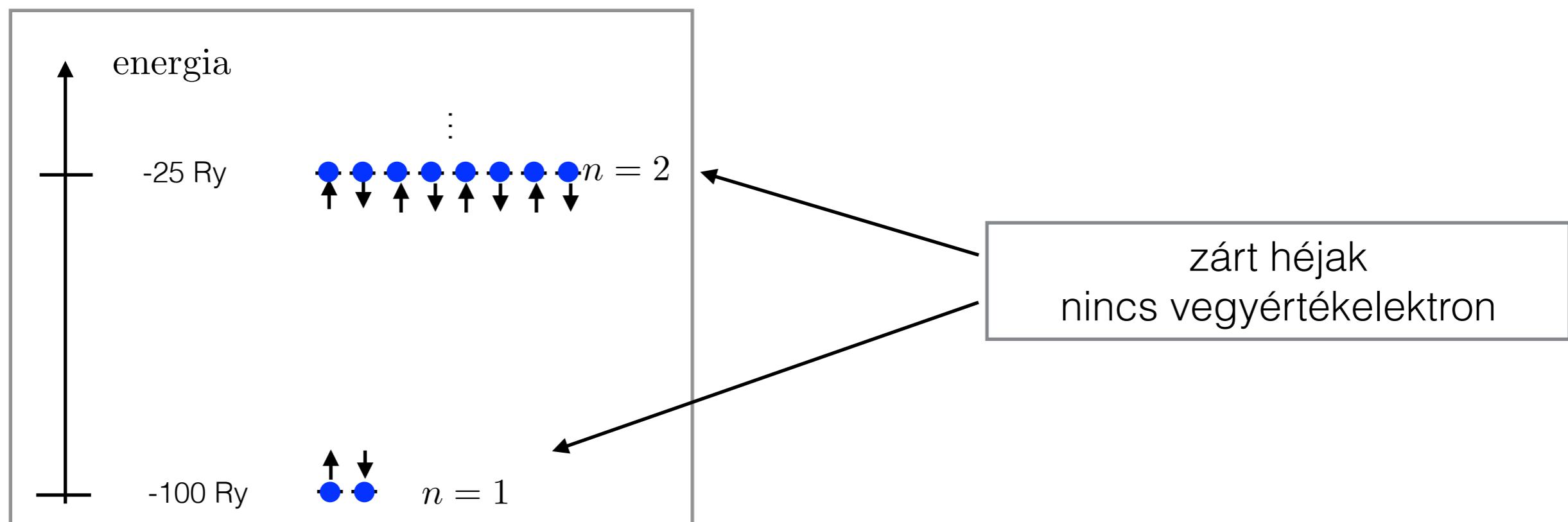
I/J A periódusos rendszer

Még egy példa: lítium-atom (Li, 3 elektron, 3 proton, valahány neutron)



I/J A periódusos rendszer

Még egy példa: neon-atom (Ne, 10 elektron, 10 proton, valahány neutron)



I/J A periódusos rendszer

Következtetés:

H és Li hasonlók, mert 1 vegyértékelektronjuk van.
He és Ne hasonlók, mert nincs vegyértékelektronjuk.
stb.

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Period ↓	1 H																2 He		
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	57 La	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	*	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
	*	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu				
	*	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr				

I/J A periódusos rendszer

Héjak betöltésének sorrendje
(e-e kölcsönhatás nélkül; hibás)

~~1s →~~
~~2s 2p →~~
~~3s 3p 3d →~~
~~4s 4p 4d 4f →~~
~~5s 5p 5d 5f ... →~~
~~6s 6p 6d ... →~~

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Period ↓	1																		
	1 H															2 He			
2	3 Li	4 Be																	
3	11 Na	12 Mg																	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	36 Kr		
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	54 Xe		
6	55 Cs	56 Ba	57 La	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	*	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
	*	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu				
	*	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr				

Héjak betöltésének sorrendje
(e-e kölcsönhatással; átlósszabály; igaz)

~~1s~~
~~2s 2p~~
~~3s 3p 3d~~
~~4s 4p 4d 4f~~
~~5s 5p 5d 5f ...~~
~~6s 6p 6d ...~~

I/J A periódusos rendszer

Megjegyzés: e-e kölcsönhatást elhanyagoltunk; ez egy durva becslés, de a periódusos rendszer első két periódusának (sorának) leírásához kielégítő

Megjegyzés: egyes elemeknek vannak különböző izotópjai, de adott elem különböző izotópjai kémiai szempontból ugyanúgy viselkednek.

Main isotopes of helium ($_2\text{He}$)

Isotope		Decay		
	abundance	half-life ($t_{1/2}$)	mode	product
^3He	0.0002%	stable		
^4He	99.9998%	stable		

Main isotopes of lithium ($_3\text{Li}$)

Isotope		Decay		
	abundance	half-life ($t_{1/2}$)	mode	product
^6Li	7.59%	stable		
^7Li	92.41%	stable		

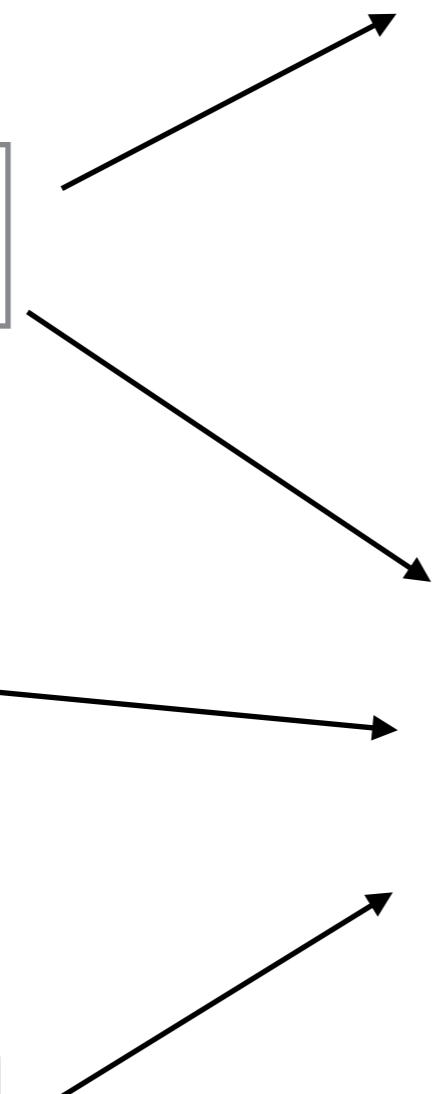
Main isotopes of neon ($_{10}\text{Ne}$)

Isotope		Decay		
	abundance	half-life ($t_{1/2}$)	mode	product
^{20}Ne	90.48%	stable		
^{21}Ne	0.27%	stable		
^{22}Ne	9.25%	stable		



I/J A periódusos rendszer

Schrödinger-egyenlet
(kvantumos)



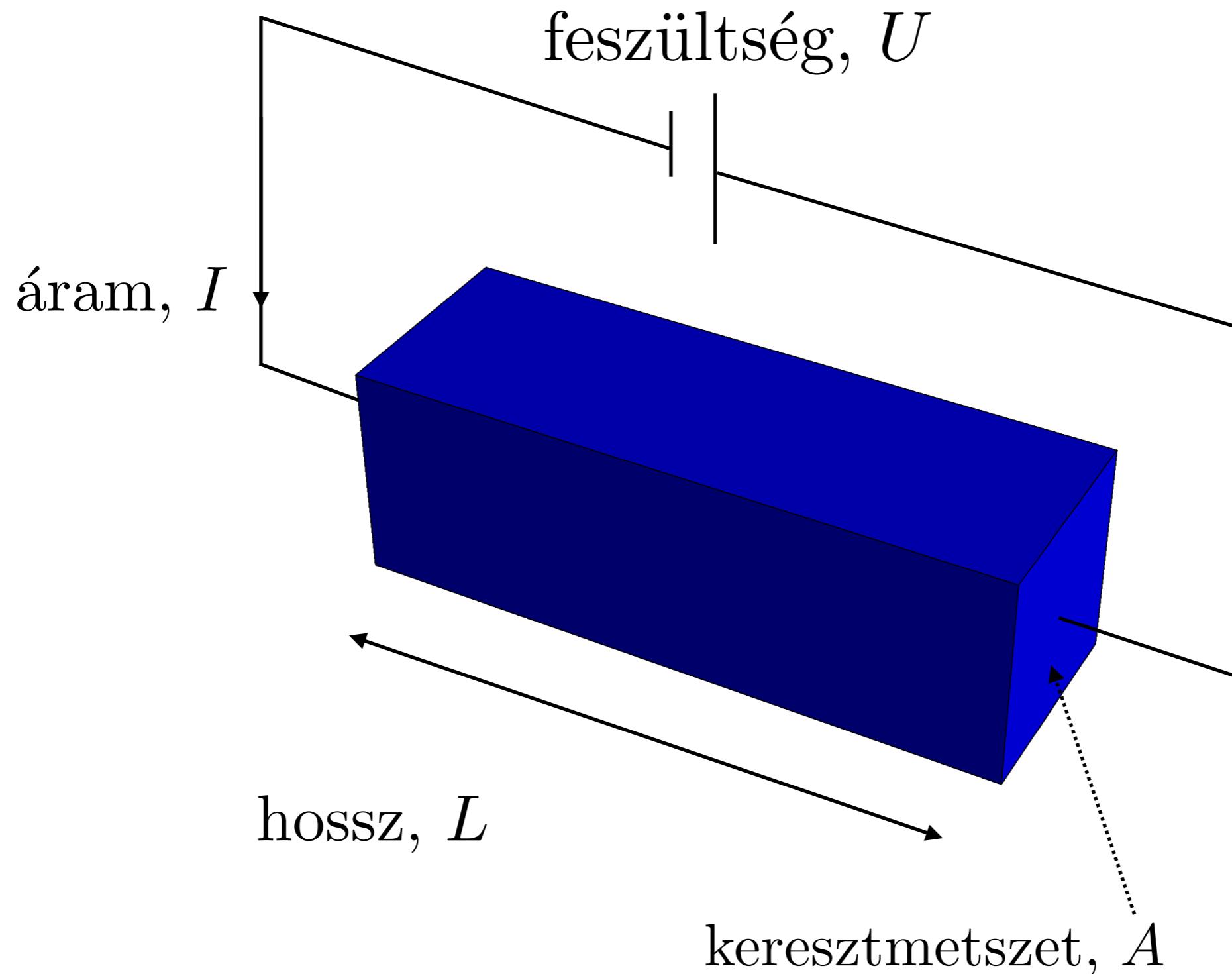
Pauli-elv

energiaminimum elve

Dense Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be																10 Ne
3	11 Na	12 Mg																18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La	* 72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	* 104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
				* 58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
				* 90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

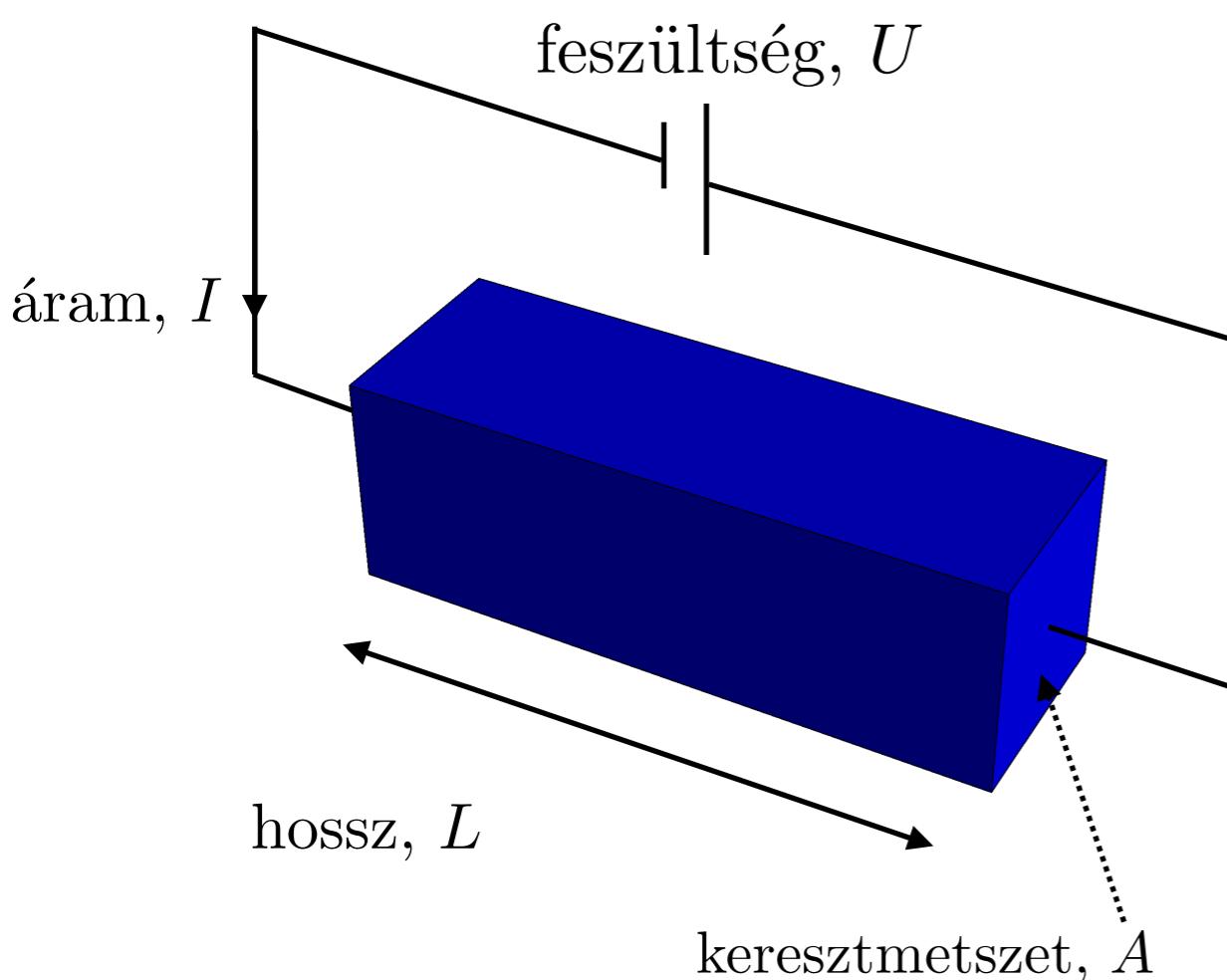
II. Elektronok kristályos szilárdtestekben

II/A Elektromos vezetés fémekben: a klasszikus Drude-modell



II. Elektronok kristályos szilárdtestekben

II/A Elektromos vezetés fémekben: a klasszikus Drude-modell



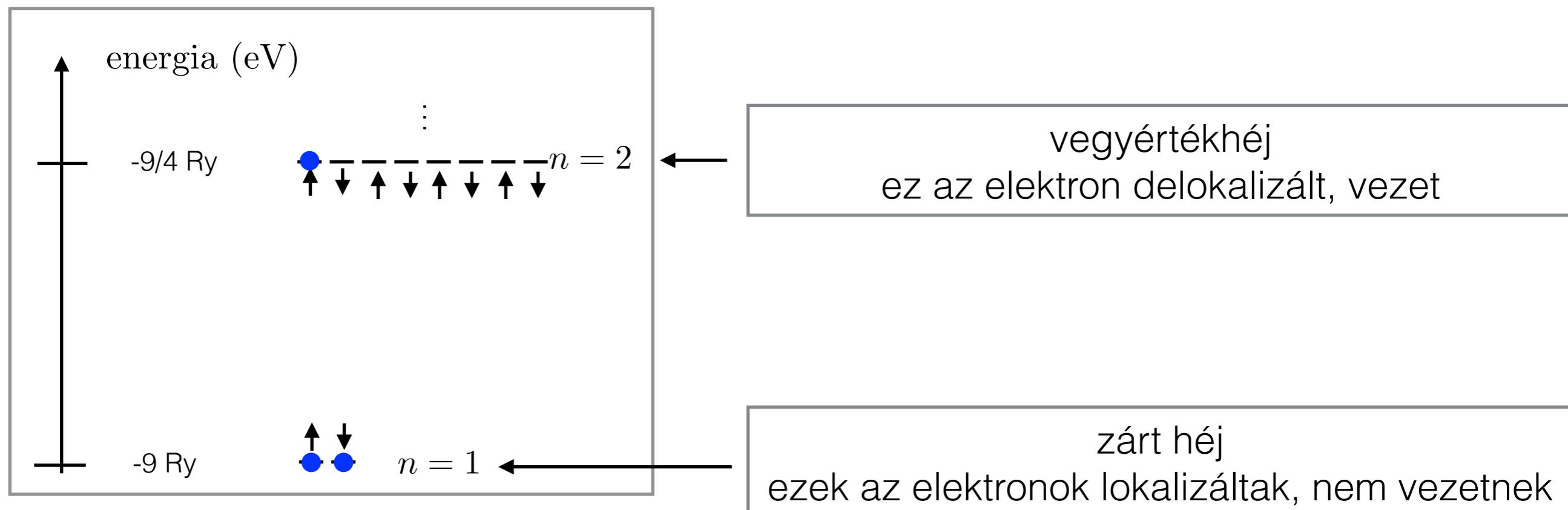
- makroszkopikus (integrális) Ohm-törvény: $R = U/I$
- geometriai Ohm-törvény: $R = \rho \frac{L}{A}$
- j : áramsűrűség, 3D-ben $[j] = \text{A/m}^2$
- áram-áramsűrűség kapcsolat: $j = I/A$
- feszültség-térerősség kapcsolat: $E = U/L$
- mikroszkopikus (differenciális) Ohm-törvény: $j = \sigma E$
- σ : fajlagos vezetőképesség
- fajlagos ellenállás, $\rho = 1/\sigma$
- példa: réz (Cu): $\rho \approx 17 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$

II. Elektronok kristályos szilárdtestekben

II/A Elektromos vezetés fémekben: a klasszikus Drude-modell

Mi viszi az áramot?

Példa: egy elemi fém: Lítium (Li)

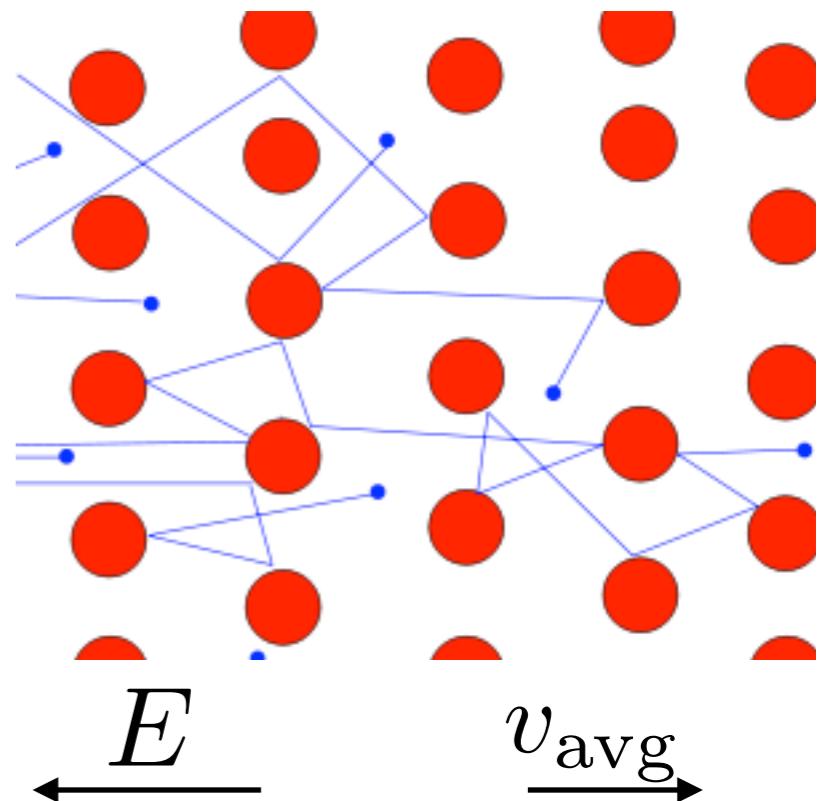


II. Elektronok kristályos szilárdtestekben

II/A Elektromos vezetés fémekben: a klasszikus Drude-modell

Drude-modell feltevései:

1. vezetési elektronok klasszikus mechanika szerint mozognak
2. vezetési elektronokat az elektromos tér gyorsítja
3. vezetési elektronok sűrűsége: n_e . $[n_e] = \text{m}^{-3}$
4. vezetési elektronok átlagosan τ időnként ütköznek a kristályrács atomtörzseivel
5. ilyenkor véletlenszerűen irányt váltanak, átlagsebességük randomizálódik



(elnevezés: τ : *relaxációs idő, ütközési idő*)

$$j = \sigma E$$

Kérdés #1: A Drude-modell visszaadja a mikroszkopikus Ohm-törvényt? Igen.

Kérdés #2: Hogyan függ a fajlagos vezetőképesség a paramétereiktől?

$$\sigma = \frac{n_e e^2 \tau}{m_e}$$

II. Elektronok kristályos szilárdtestekben

II/A Elektromos vezetés fémekben: a klasszikus Drude-modell

Bizonyítás:

1. ütközések \approx csillapítás \Rightarrow mozgásegyenlet:

$$m_e a = F \Rightarrow m_e \dot{v}(t) = -eE - \gamma v$$

2. stacionárius állapot: $\dot{v} = 0$, amiből

$$0 = -eE - \gamma v \Rightarrow v_{\text{avg}} = -\frac{eE}{\gamma}$$

3. vezetőképesség definíciója:

$$\sigma = \frac{j}{E} = \frac{-en_e v_{\text{avg}}}{E} = \frac{n_e e^2}{\gamma}$$

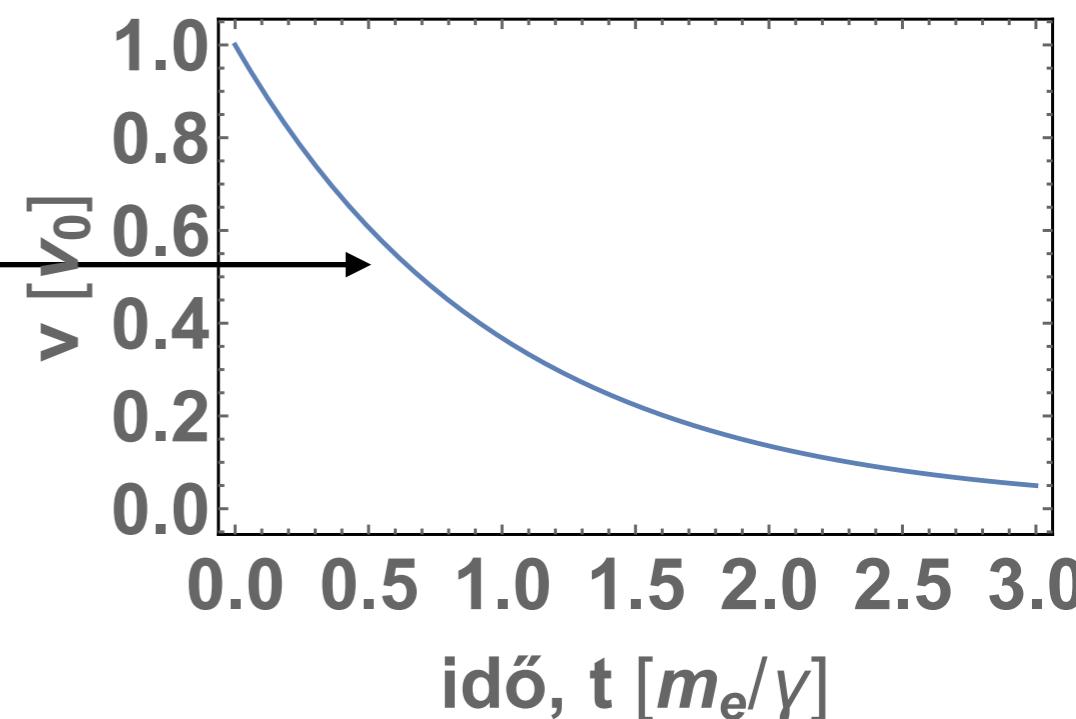
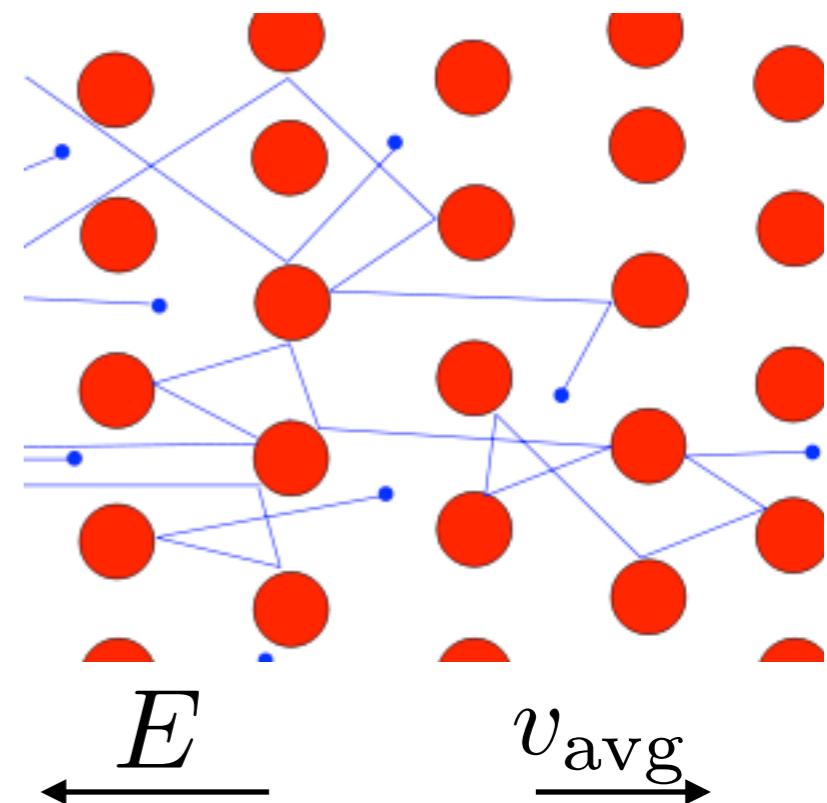
4. γ és τ kapcsolata?

csillapított mozgás:

$$m_e \dot{v}(t) = -\gamma v \Rightarrow v(t) = v_0 \exp\left(-\frac{\gamma}{m_e} t\right)$$

5. tehát $\tau = m_e / \gamma$, amiből

$$\boxed{\sigma = \frac{n_e e^2 \tau}{m_e}}$$



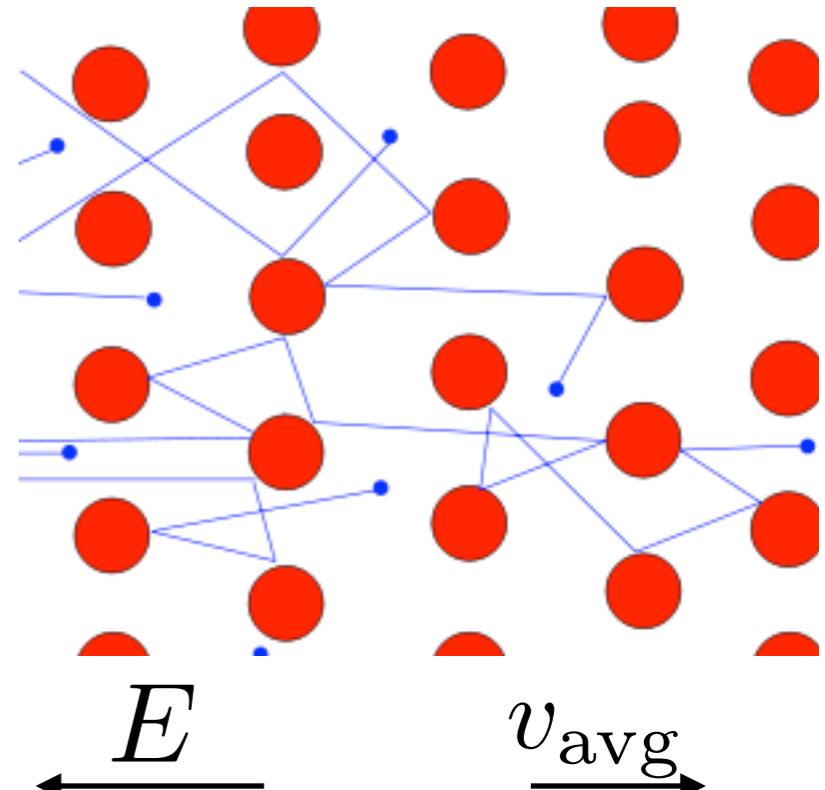
II. Elektronok kristályos szilárdtestekben

II/A Elektromos vezetés fémekben: a klasszikus Drude-modell

$$\sigma = \frac{n_e e^2 \tau}{m_e}$$

Megjegyzések:

1. $\sigma \propto n_e$: több elektron, jobb vezetőképesség
2. $\sigma \propto \tau$: ritkább ütközés, jobb vezetőképesség
3. hőmérsékletfüggés? például τ -n keresztül:
magasabb hőmérséklet \Rightarrow intenzívebb rácsrezgések \Rightarrow
 \Rightarrow erősebb szóródás \Rightarrow rövidebb τ \Rightarrow rosszabb vezetőképesség
4. példa: réz (Cu): $\rho(77\text{ K}) \approx 2 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$, de $\rho(273\text{ K}) \approx 17 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$
5. félvezetőkben n_e is hőmérsékletfüggő
6. Drude-modell: egyszerű, szemléletes, de sok tekintetben nem realisztikus
7. a félvezetők viselkedésének leírásához kvantummechanikai leírás kell

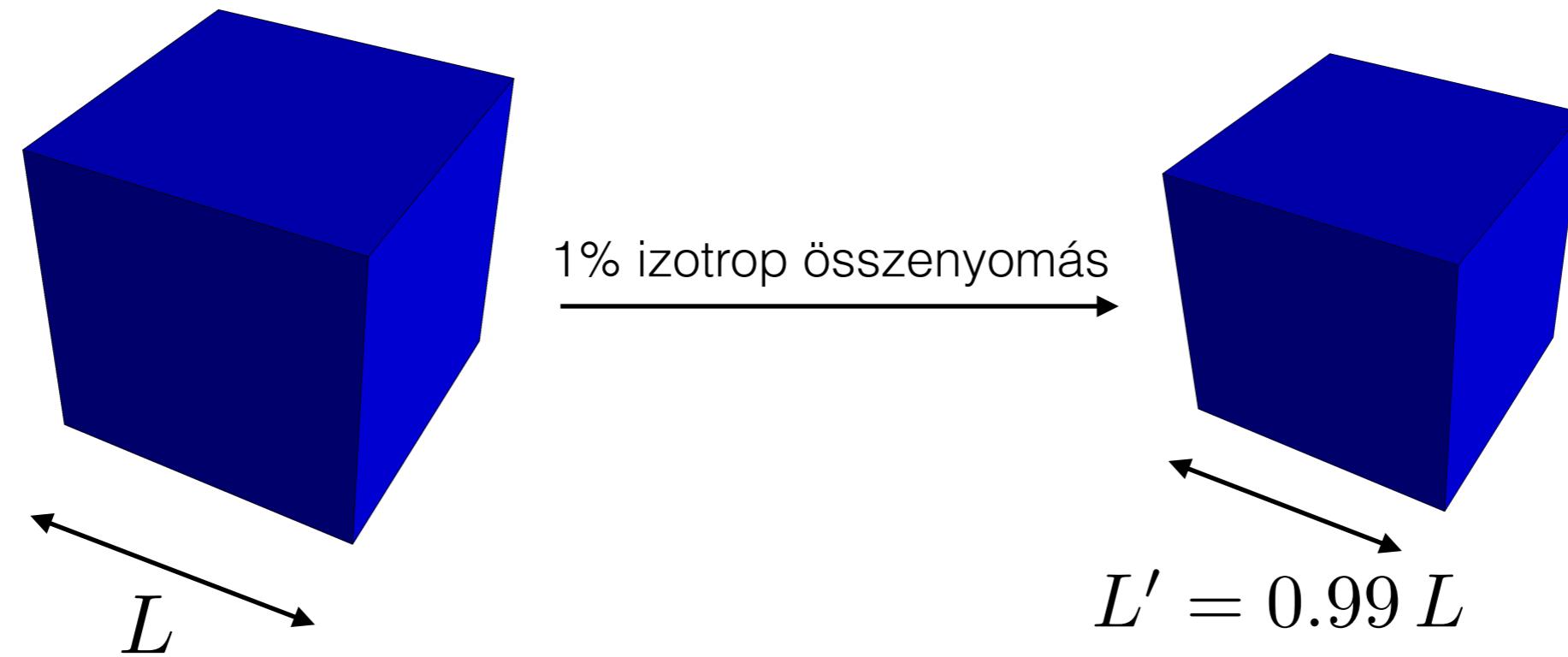


II. Elektronok kristályos szilárdtestekben

II/B Geometriai piezorezisztivitás fémekben

Piezorezisztivitás: mechanikai deformáció hatására a fém ellenállása megváltozik.

Piezorezisztív anyag szenzorként alkalmazható:
mechanikai jelet (pl. nyomás vagy erő) elektromos jellé alakít

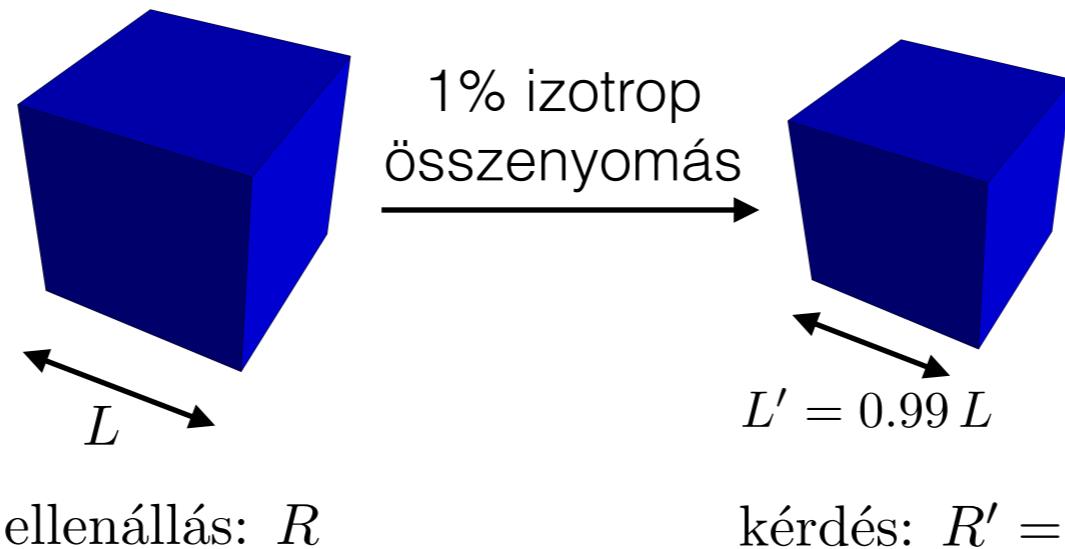


ellenállás: R

kérdés: $R' = ?$

II. Elektronok kristályos szilárdtestekben

II/B Geometriai piezorezisztivitás fémekben



Egy lehetséges válasz: (geometriai Ohm-törvény alapján)

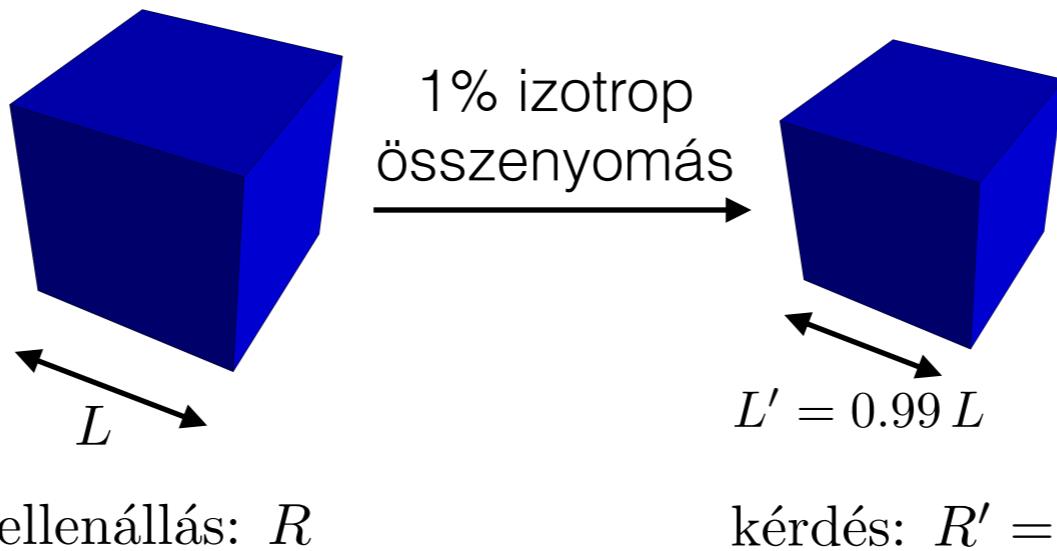
$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{L^2} = \frac{\rho}{L}$$

$$R' = \frac{\rho}{L'} = \frac{\rho}{(1 - \epsilon)L} \approx \frac{\rho}{L} (1 + \epsilon) \approx 1.01R$$

... azaz az ellenállás 1% összenyomás hatására 1%-kal megnő.

II. Elektronok kristályos szilárdtestekben

II/B Geometriai piezorezisztivitás fémekben



Egy másik lehetséges válasz: (geometriai Ohm-törvény és Drude-modell alapján)

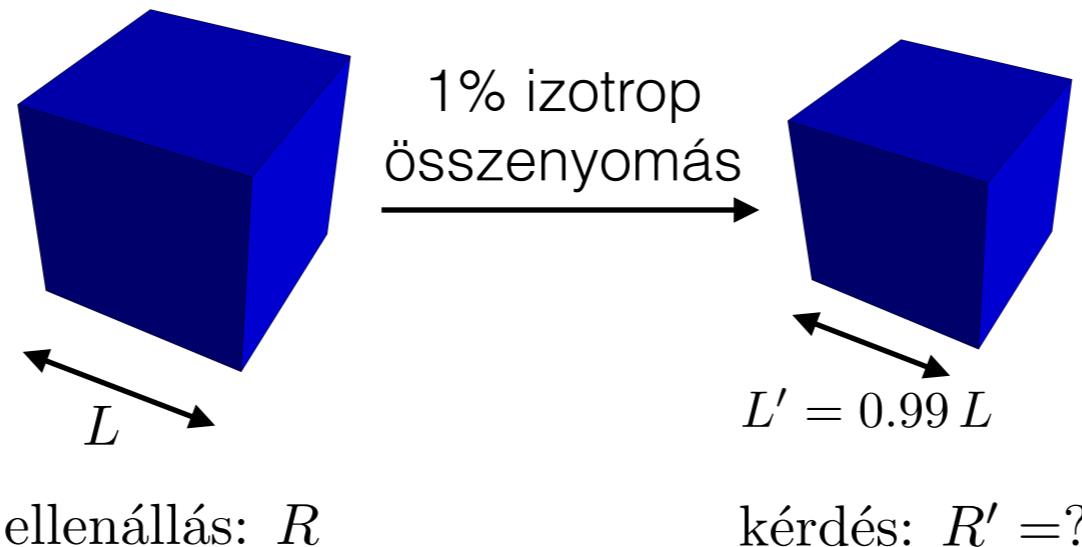
$$R = \rho \frac{L}{A} = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{A} = \frac{1}{\frac{n_e e^2 \tau}{m_e}} \frac{L}{A} = \frac{m_e L}{\frac{N_e}{L \cdot A} e^2 \tau A} = \frac{m_e L^2}{N_e e^2 \tau}$$

$$R' = \frac{m_e L^2 (1 - \epsilon)^2}{N_e e^2 \tau} \approx \frac{m_e L^2 (1 - 2\epsilon)}{N_e e^2 \tau} = R(1 - 2\epsilon) = 0.98R$$

... azaz az ellenállás 1% összenyomás hatására 2%-kal lecsökken.

II. Elektronok kristályos szilárdtestekben

II/B Geometriai piezorezisztivitás fémekben



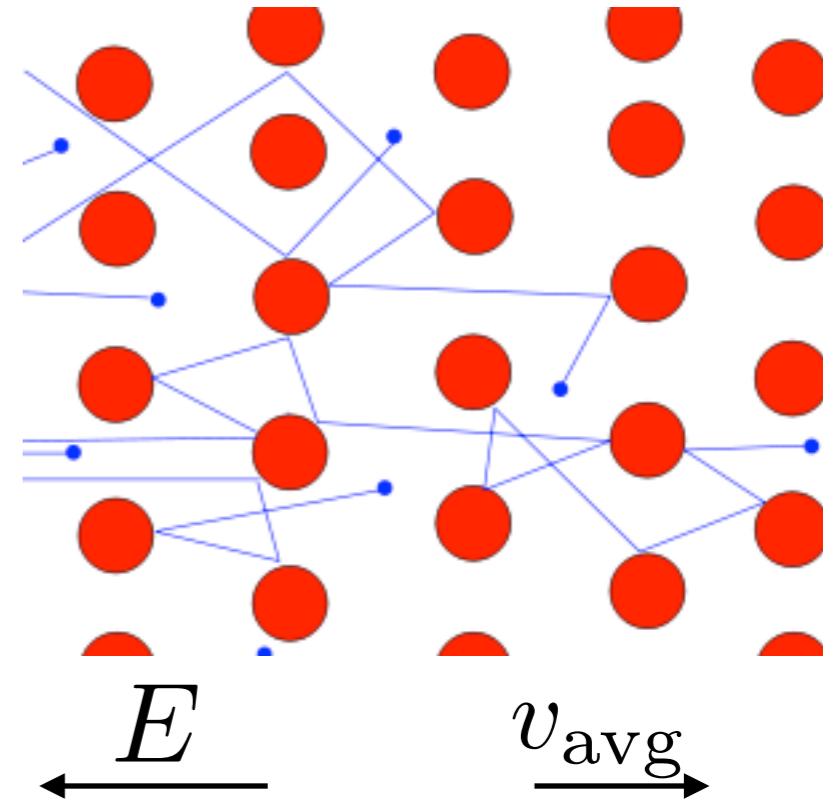
Következtetések:

- a geometriai piezorezisztivitás valószínűleg létezik
- a geometriai piezorezisztivitás mértéke függ a részletektől
- adott fém esetén érdemes utánanézni az irodalmi értéknek

Összefoglalás

Elektromos vezetés fémekben:
a klasszikus Drude-modell

$$\sigma = \frac{n_e e^2 \tau}{m_e}$$



Geometriai piezorezisztivitás fémekben

