

# Elektrina

Petr Heřman  
Ústav biofyziky, UK 2.LF

# Elektrostatika:

Souvislost a analogie s mechanikou.

Jak souvisí jantar s elektrinou:

Mechanické působení (tření)

=> nový fenomén (elektrina)

=> nová fyzikální disciplína

# Analogie elektřiny s mechanikou:

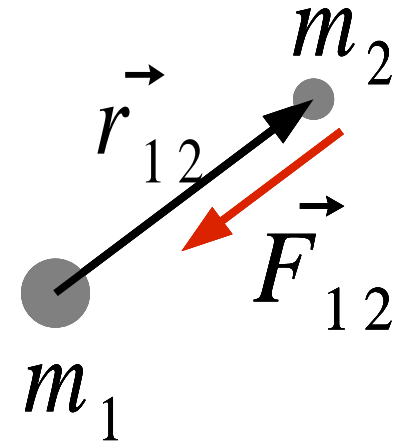
	Mechanika:	Elektřina:
částice:	hmotnost	náboj
zákon zachování:	hmoty	náboje
silová interakce:	Newtonův gravitační	Coulombův zákon
silové pole:	gravitační	<b>elektrostatické</b>

# Silové interakce mezi částicemi:

Newtonův  
gravitační  
zákon:

$$\vec{F}_{12} = -K \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{r}_{12}$$

$K$  = gravitační konstanta =  $6,670 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

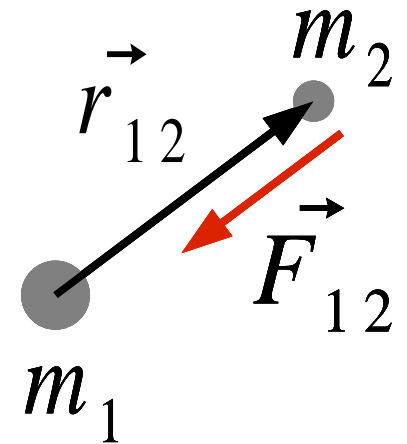


# Silové interakce mezi částicemi:

Newtonův  
gravitační  
zákon:

$$\vec{F}_{12} = -\kappa \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{1}_{12}$$

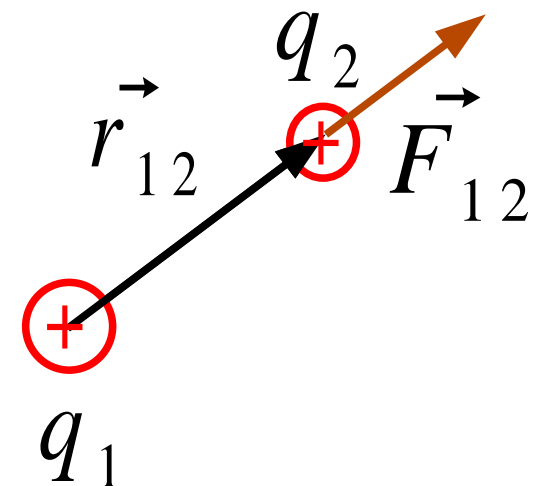
$\kappa$  = gravitační konstanta =  $6,670 \cdot 10^{-11} [N m^2 kg^{-2}]$



Coulombův  
zákon:

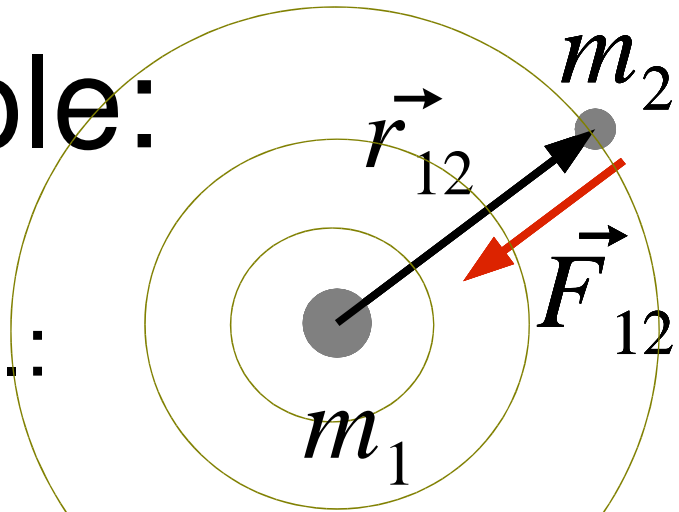
$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{1}_{12}$$

$\epsilon_0$  = permitivita vakua =  $8,854 \cdot 10^{-12} [F m^{-1}]$



Pole:

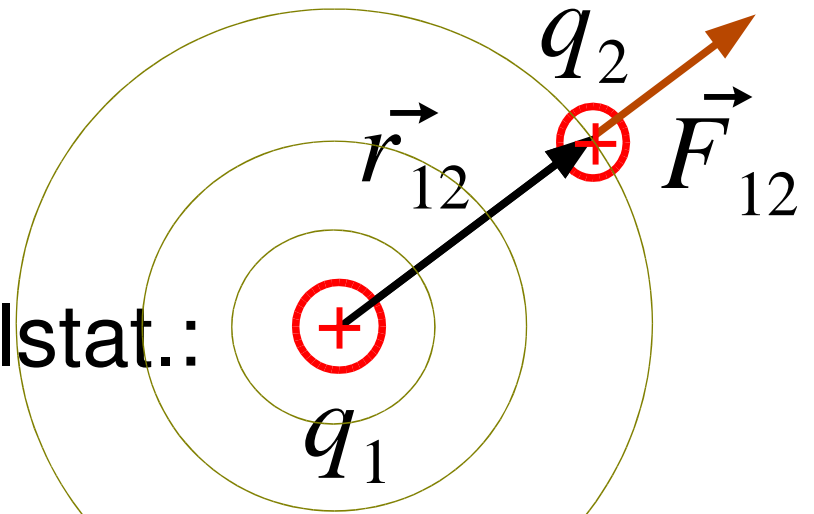
Grav.:



$$\vec{F}_{12} = -\kappa \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{1}_{12}$$

$$\vec{F}_{12} = \left( -\kappa \frac{m_1}{r^2} \vec{1}_{12} \right) \cdot m_2$$

Elstat.:



$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{1}_{12}$$

$$\vec{F}_{12} = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \vec{1}_{12} \right) \cdot q_2$$

Intenzita pole

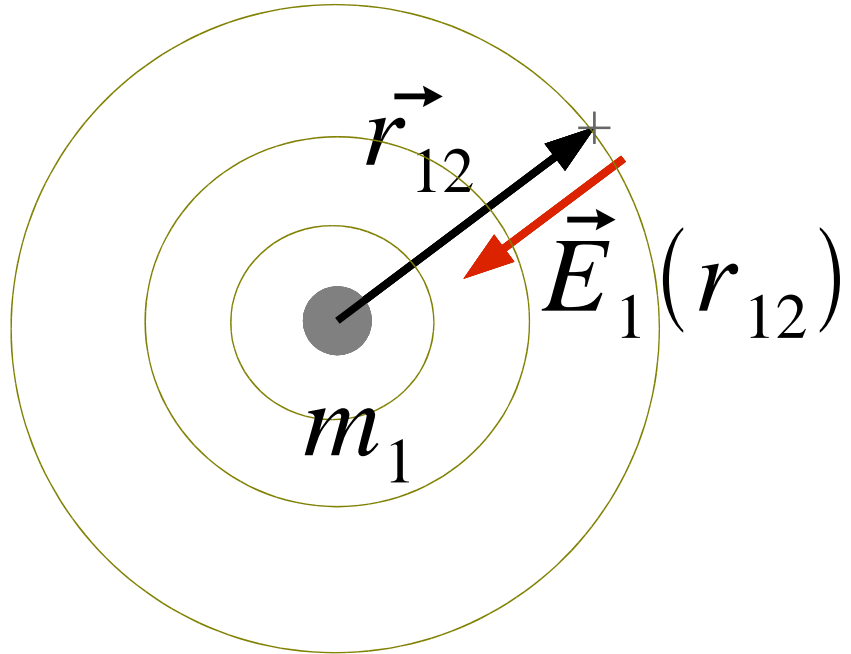
$$\vec{F}_{12} = \vec{E}_1(\vec{r}) \cdot m_2$$

Jak vypočtu  $\vec{E}_1(\vec{r})$  ??

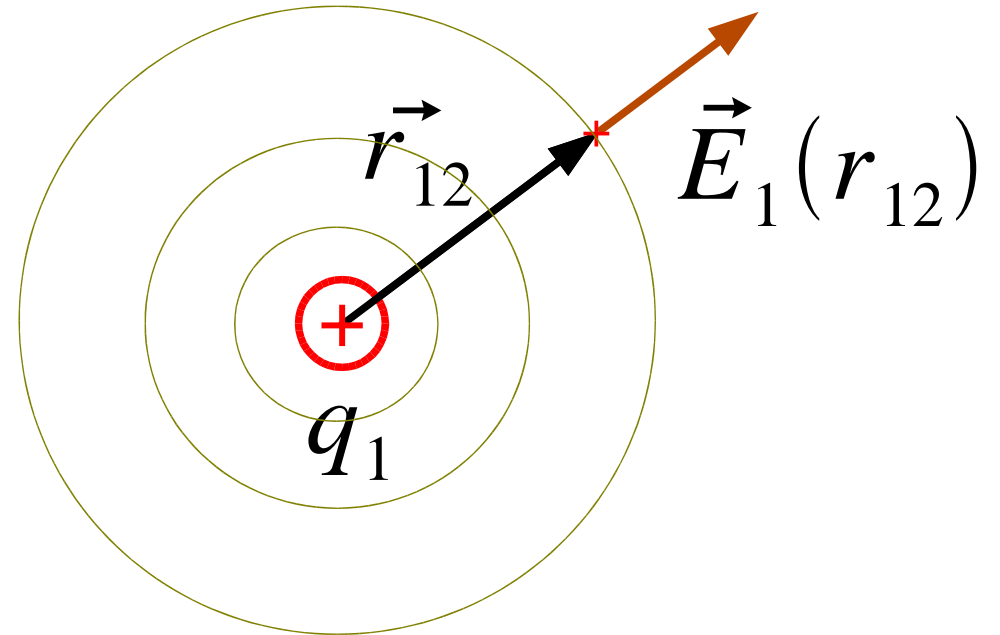
$$\vec{F}_{12} = \vec{E}_1(\vec{r}) \cdot q_2$$

# Intenzita pole:

Gravitační:



Elektrostatické:



Intenzita pole bodového zdroje:

$$\vec{E}_1(\vec{r}) = -\kappa \frac{m_1}{r^2} \vec{1}_{12} [N/kg]$$

$$\vec{E}_1(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \vec{1}_{12} [N/C]$$

# Pole více bodových zdrojů:

Nehomogenní:  $\vec{E}(\vec{r}) \neq konst(\vec{r})$

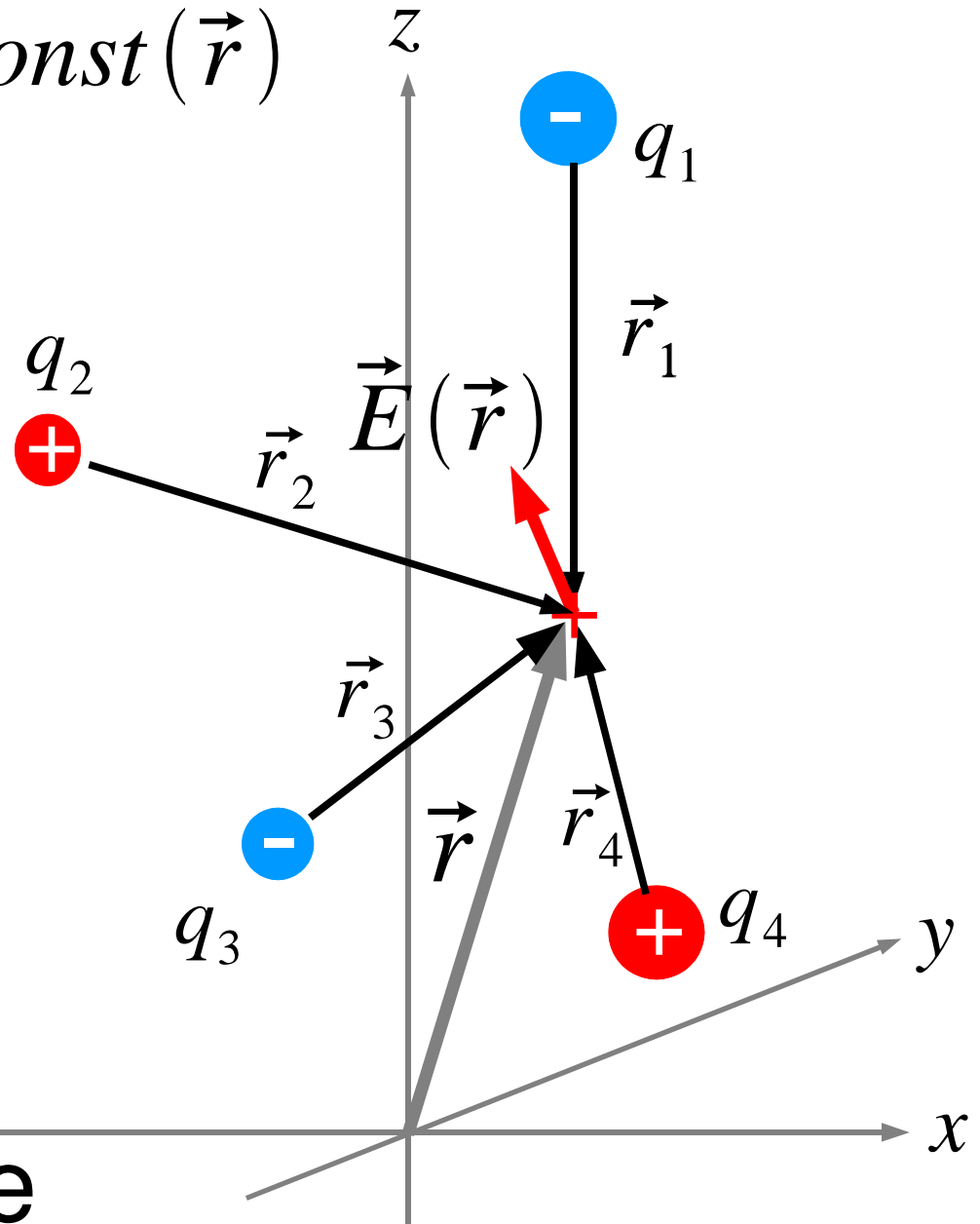
Gravitační:

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\kappa \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{r_i^2} \vec{1}_i$$

Elektrostatické:

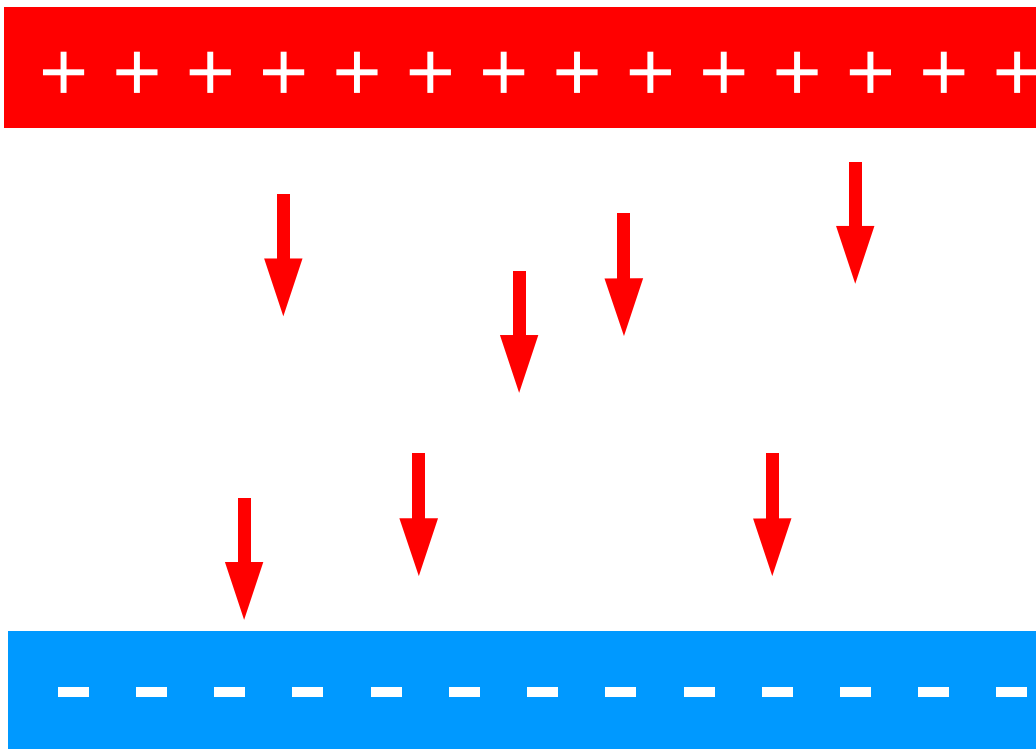
$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \vec{1}_i$$

Princip superposice





# Homogenní pole:



$$\vec{E}(\vec{r}) = \textit{konst}(\vec{r})$$

(pro libovolné  $\vec{r}$  )

(zvláštní případ principu superposice)

# Potenciál pole $V(\vec{r})$

Hledáme skalární funkci vektorové proměnné  $V(\vec{r})$  takovou, aby platilo:

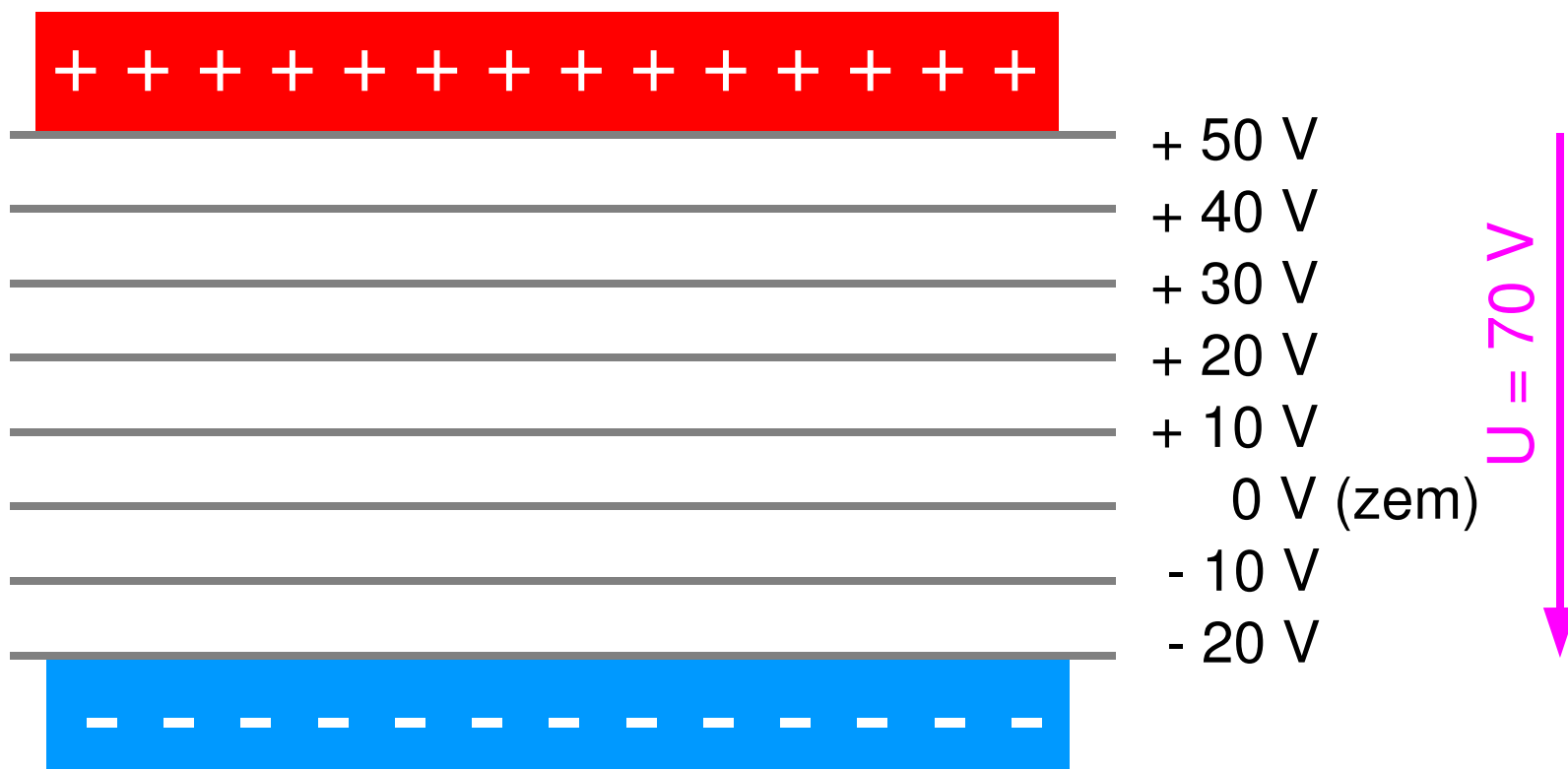
$$\vec{E}(\vec{r}) = -\mathit{grad} V(\vec{r})$$

# Potenciál homogenního pole:

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\text{grad } V(\vec{r}) \quad (\text{platí vřdycky})$$

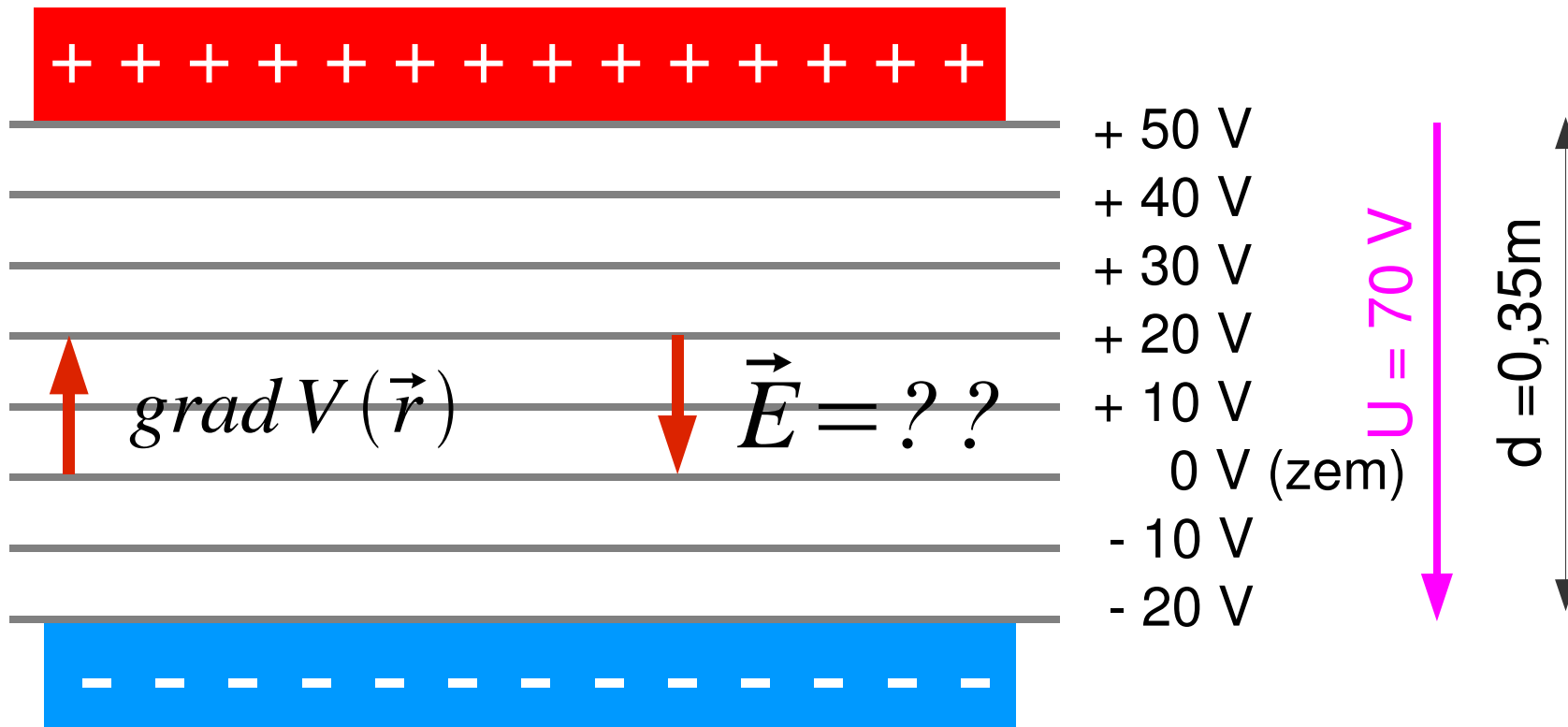
Pokud má být:  $\vec{E}(\vec{r}) = \textit{konst}(\vec{r})$

pak musí být  $V(\vec{r})$  lineární funkcí  $\vec{r}$



# Intenzita homogenního pole:

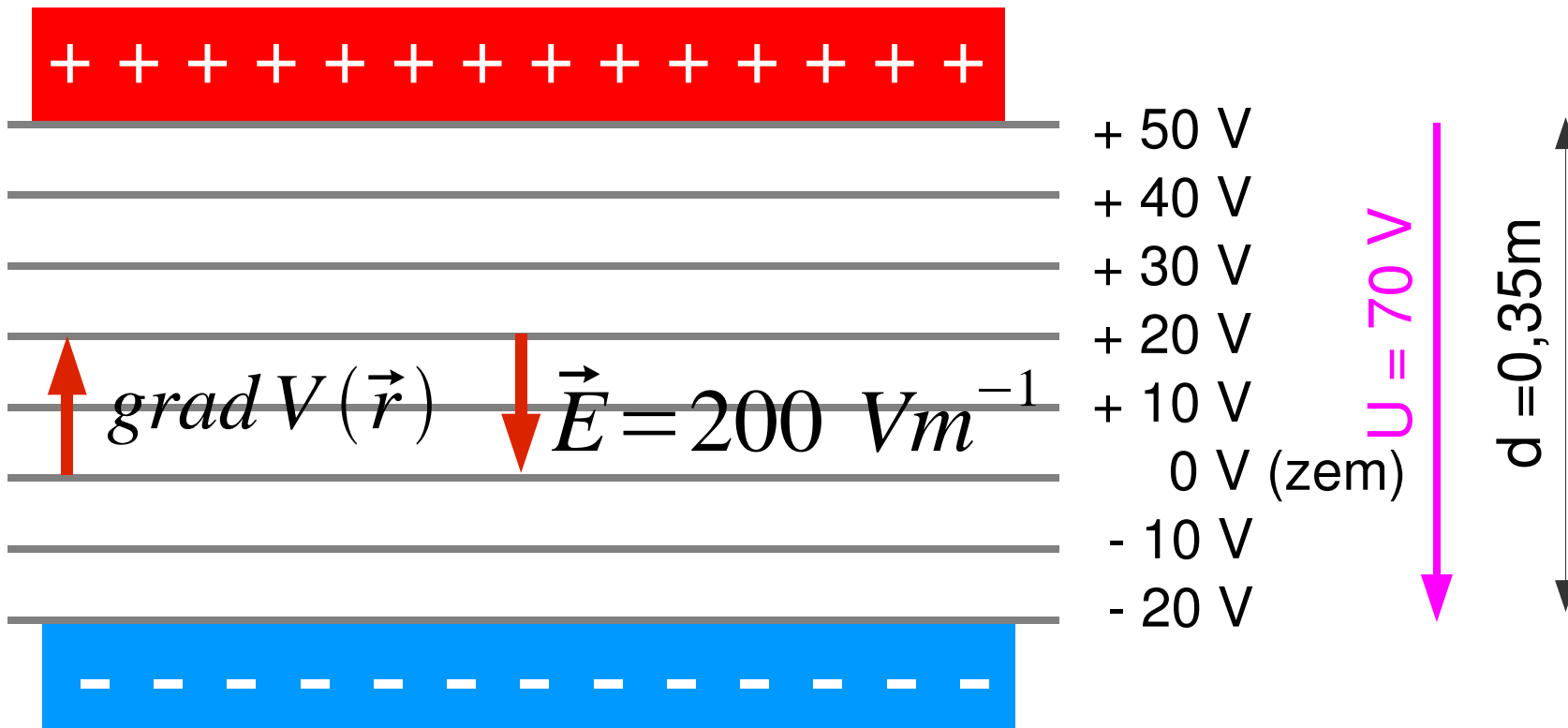
$$\vec{E}(\vec{r}) = -\text{grad } V(\vec{r}) \quad (\text{platí vždycky})$$



# Intenzita homogenního pole:

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\text{grad } V(\vec{r}) \quad (\text{platí v\u017edycky})$$

$$E = \frac{70 \text{ V}}{0,35 \text{ m}} = 200 \text{ Vm}^{-1} = 200 \text{ NC}^{-1} \quad ??$$



# Potenciální energie

gravitační pole:  $U(\vec{r}) = m \cdot V(\vec{r}) [J; kg, J kg^{-1}]$

elektrostat. pole:  $U(\vec{r}) = q \cdot V(\vec{r}) [J; C, J C^{-1}]$

Práce v potenciálním poli (jakémkoli)

potřebná k přemístění z bodu 1 do bodu 2:

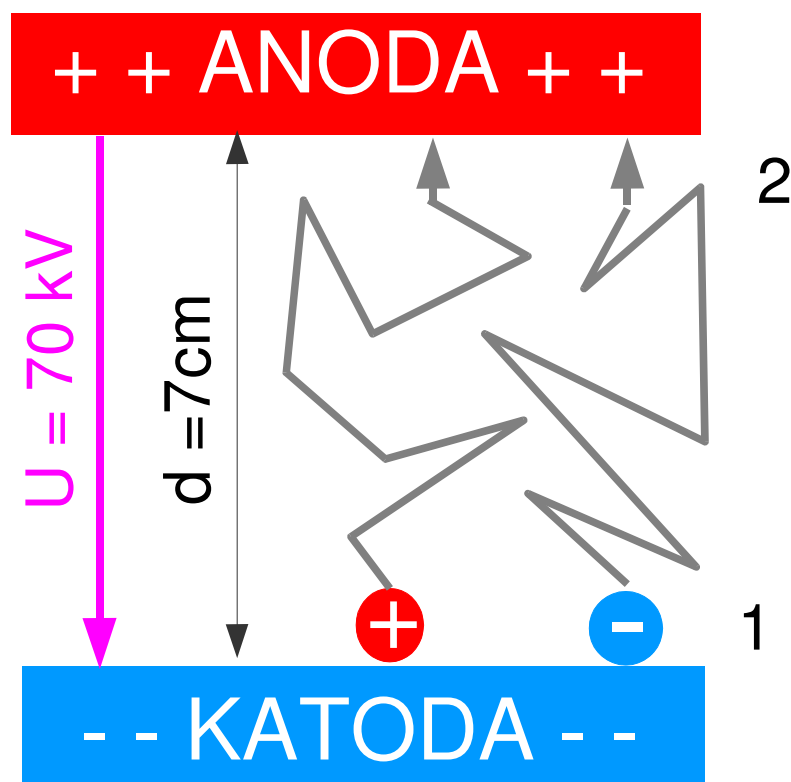
$$W_{12} = U(\vec{r}_2) - U(\vec{r}_1)$$

(To pro případ  $U(\vec{r}_2) > U(\vec{r}_1)$ . V opačném případě se energie uvolní a může být přeměněna např. v energii kinetickou).

Velikost spotřebované práce či uvolněná energie nezávisí na tvaru a délce dráhy, ale na rozdílu potenciálů. Platí i pro nehomogenní pole.

# Částice v elektrostatickém poli:

(Vedení el. proudu v kovech, elektrolytech, v plynech, plazmě a ve vakuu. Princip RTG, CT, urychlovačů, elektroosmózy, galvanoterapie, pohybu iontů přes membránu etc.)



elementární

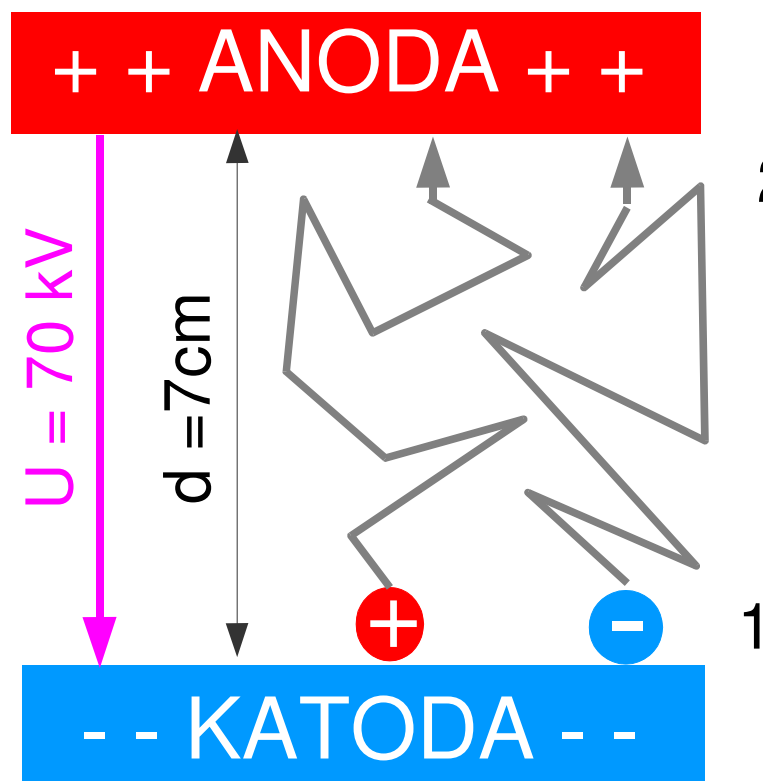
náboj:  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Jaká je práce  $W_{12}$ ,  
potřebná k přemístění  
jedné elementární částice  
z místa 1 (z katody)  
na místo 2 (na anodu) ??

Potřebná práce:  $W_{12} = U(\vec{r}_2) - U(\vec{r}_1) = q \cdot (V(\vec{r}_2) - V(\vec{r}_1))$

proton:  $W_{12} = 1,6 \cdot 10^{-19} [C] \cdot 7 \cdot 10^4 [V] = 11,2 \cdot 10^{-15} [J] > 0$

elektron:  $W_{12} = -1,6 \cdot 10^{-19} [C] \cdot 7 \cdot 10^4 [V] = -11,2 \cdot 10^{-15} [J] < 0$



Závěr:

2 Protonu je třeba dodat práci.

Elektron svým přemístěním může vykonat práci (v elektrolytu, v živém organismu apod.)

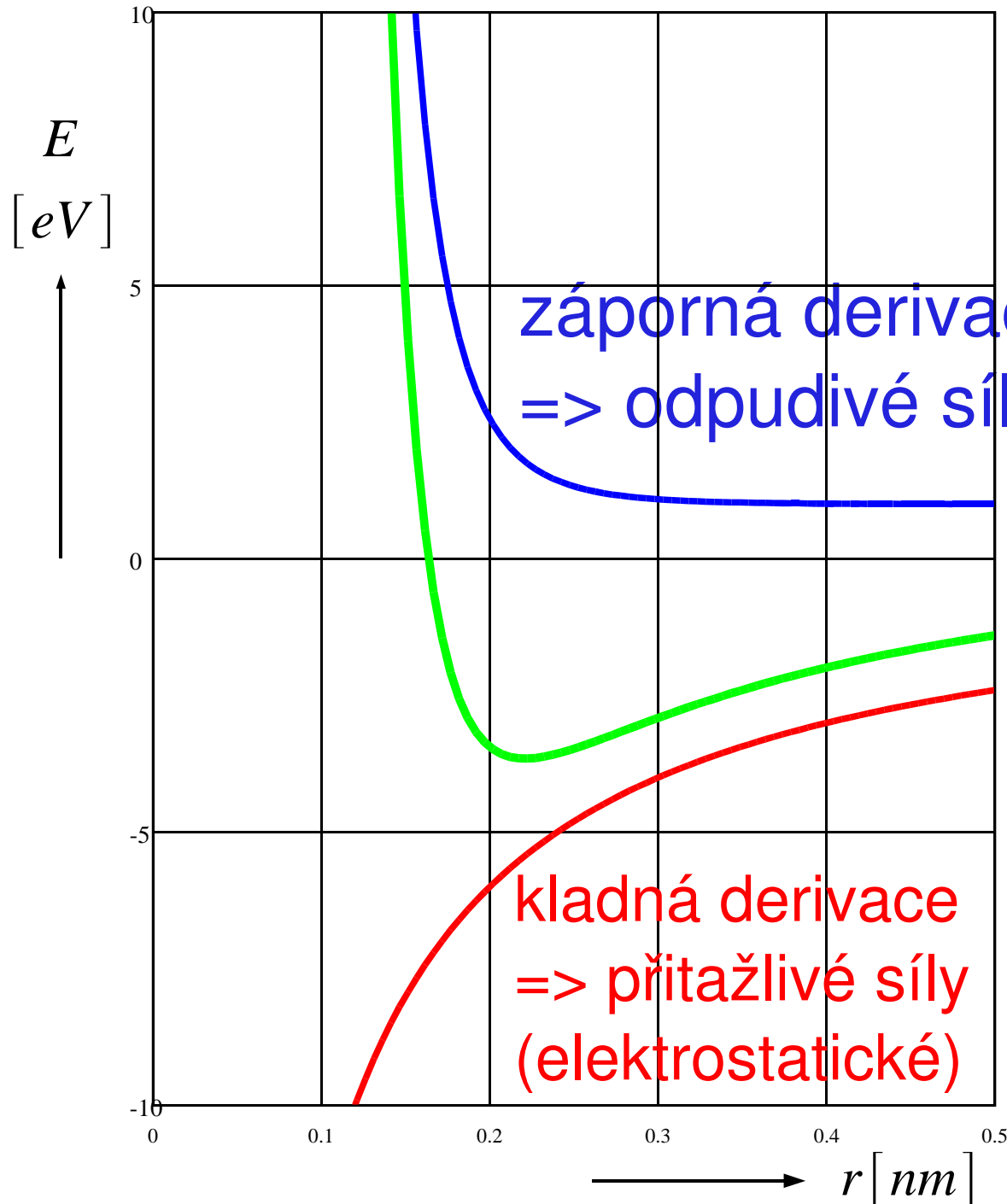
anebo (např. ve vakuu) se jeho potenciální energie změní na kinetickou.



## D.C.:

1. Spočtete si kinetickou energii a rychlost elektronu z uvedeného příkladu těsně před dopadem na anodu. (Hodnoty přibližně odpovídají situaci v rentgenové lampě.)
2. V praxi používáme vedlejší jednotky  $1 \text{ eV}$ , případně energii vztahujeme na jednotku látkového množství a pak uvádíme  $\text{kJ/mol}$ . Odvodte si vzájemné převodní vztahy. Předch. výsledek uveďte v různých jednotkách.

# Energie iontové vazby



výsledná síla = součet odpudivých (kladných) a přitažlivých (záporných) sil

??

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\text{grad } V(\vec{r})$$

$$\vec{F}(\vec{r}) = -\text{grad } U(\vec{r})$$

Jednorozměrný (zjednodušený) případ:

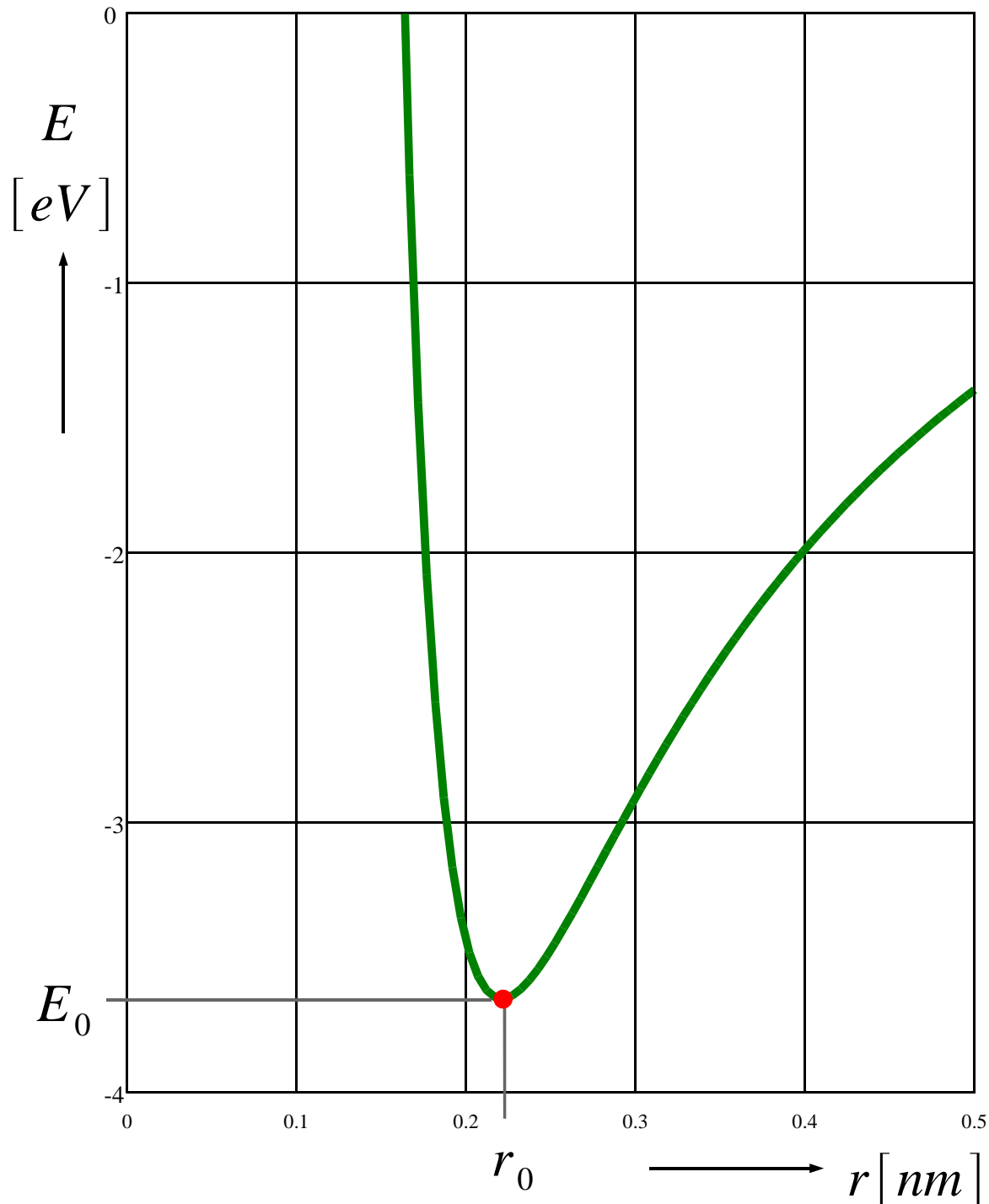
$$F(r) = \frac{-dU(r)}{dr} [N ; J, m]$$

klesající energie ... záporná derivace ...

=> kladná síla (odpudivá)

stoupající energie ... kladná derivace ...

=> záporná síla (přitažlivá)



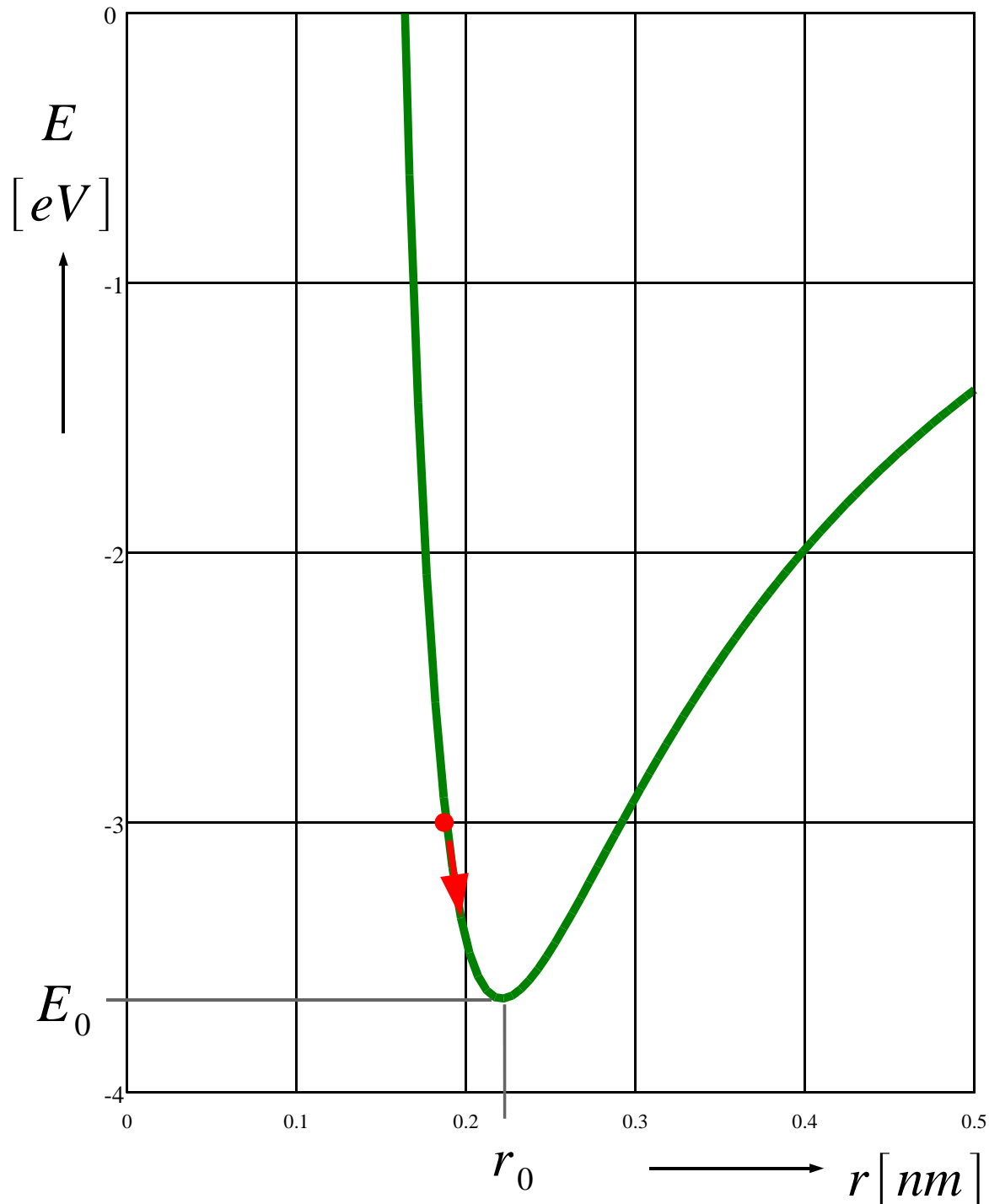
# Iontová vazba

(potenciálová jáma)

$E_0$  minimum  
potenciální  
energie

(energie interakce)

$r_0$  odpovídající  
rovnovážná  
vzdálenost  
(délka vazby)



# lontová vazba

působení vnějších sil  
(stlačení)

=> zmenší se  $r$

=> vzroste  $E$

=> záporná derivace

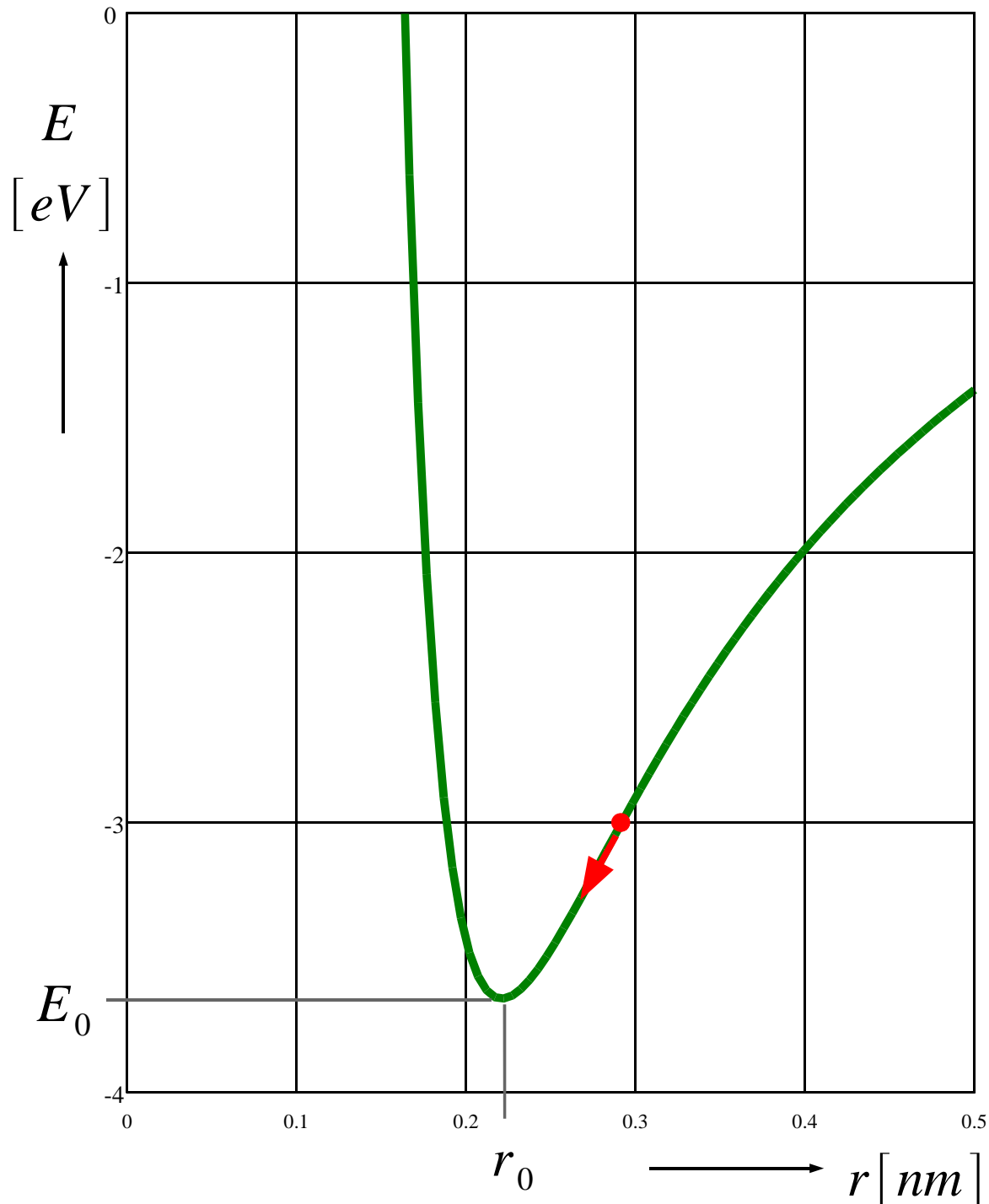
=> vznikne odpudivá

síla (reakce), snažící

se vrátit  $r$  do

rovnovážné polohy

(směrem ke dnu jámy).



# Iontová vazba

působení vnějších sil  
(natažení)

=> zmenší se  $r$

=> vzroste  $E$

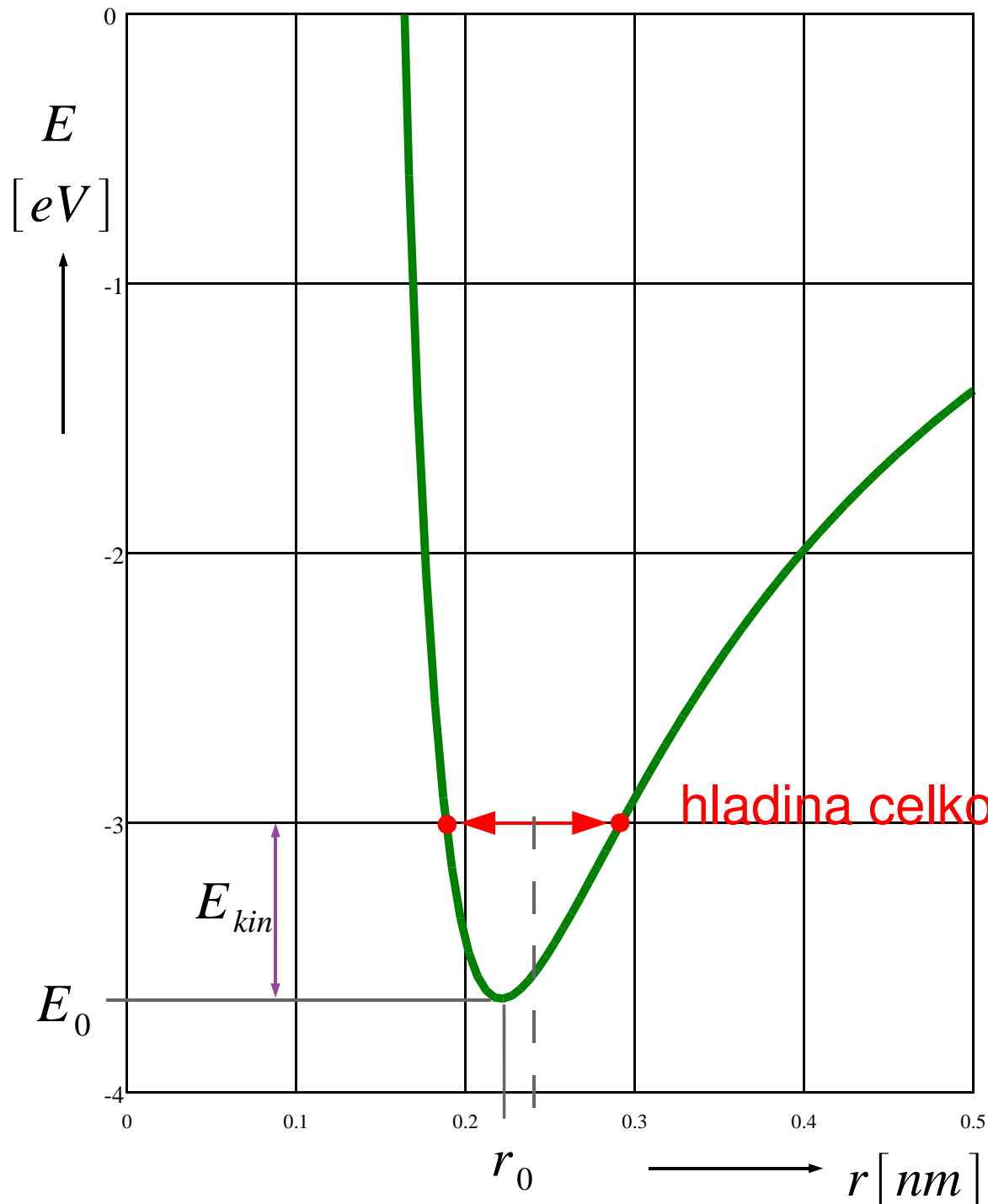
=> kladná derivace

=> vznikne přitažlivá  
síla (reakce), snažící

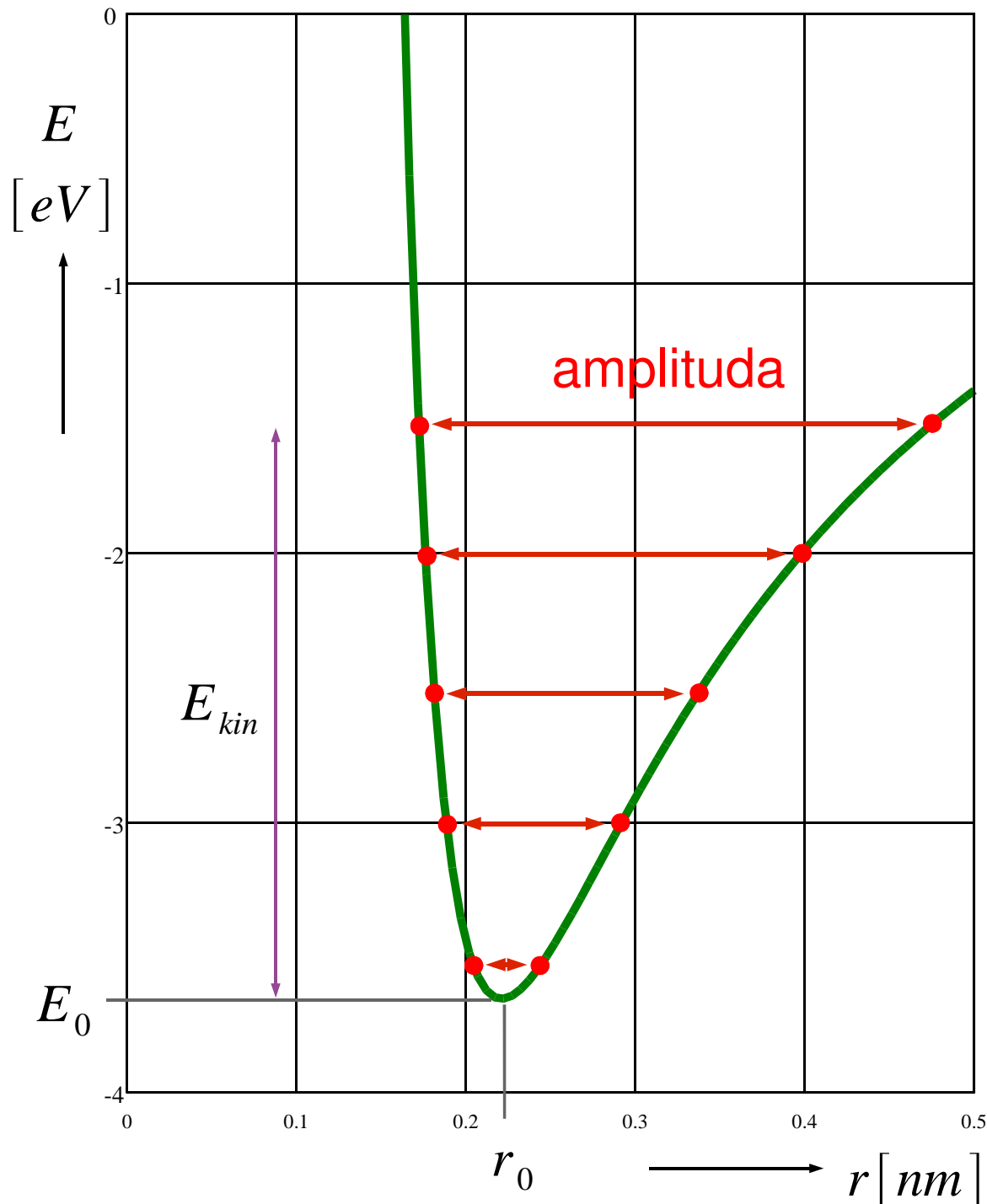
se vrátit  $r$  do

rovnovážné polohy

(podobně jak pružina)



Např. náraz dodá kinetickou energii  
 $\Rightarrow$  vychýlení částice  
 $\Rightarrow$  kmitání (tepelný pohyb)  
malý rozkmit ... harmonický (lineární) oscilátor  
větší rozkmit ...  
... anharmonické kmity (nelineární)  
 $\Rightarrow$  vychýlení rovnov. polohy  
 $\Rightarrow$  teplotní roztažnost



Postupným zvyšováním energie kmitů roste jejich rozkmit (amplituda) i střední poloha. Nakonec může dojít až k roztržení vazby (např. tání).

Ve skutečnosti se energie nemění spojitě, ale po kvantech - oscilátor kmitá na různých hladinách.

Kmitočet v oblasti IR. Využití: např. Ramanova spektroskopie.



Podobný průběh (potenciálová jáma)  
mají i ostatní vazby.

Liší se zejména velikostí vazebné energie.

Srovnání energií:

- ionizační energie      4 – 25 eV
- kovalentní vazby      4 – 8 eV
- iontové vazby      3 – 4 eV
- vodíkové můstky      cca 0,3 eV
- van der Waalsovy      0,01 – 0,1 eV
- stř. energie tepelného pohybu =  $kT$ :

Boltz. konst.  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} [J/K] = 86 [\mu eV/K]$

37 °C = 310 K ... 0,027 eV

90 °C = 362 K ... 0,031 eV

( => denaturace bílkovin)

# Elektrodynamika

Pohybem nábojů vzniká:

- elektrický proud
- magnetické pole (příští přednáška)
- elektromagnetické pole (optika, RTG, ...)

el. proud: 
$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} [A; C, s]$$

změna náboje: 
$$\Delta Q = \int di(t) dt \quad 1 C = 1 As$$

# Jak látky vedou elektrický proud:

- dobře: **vodiče**
- hůře (kladou průchodu proudu odpor): **odporové materiály**
- různě, podle okolností: **polovodiče**
- nevedou: **izolanty**

# Jaké látky vedou/nevedou el. proud:

- vodiče: kovy (Ag, Au, Pt, Cu, Al, Zn, ...)
- odporové materiály: C, slitiny kovů, ...
- polovodiče: Ge, Si, ...
- izolanty: sklo, guma, umělé hmoty, parafín, tuk, ...  
- ale pozor, nelze na to vždy spoléhat!

# Při vedení proudu se nabité částice mohou pohybovat:

- v pevných látkách – jakých ??:
  - ??
  - ??
- v kapalinách – jakých ??:
  - ??
  - ??
  - ??
- v plynech:
  - kde ještě ??

# Co je to za nabité částice, které se mohou pohybovat:

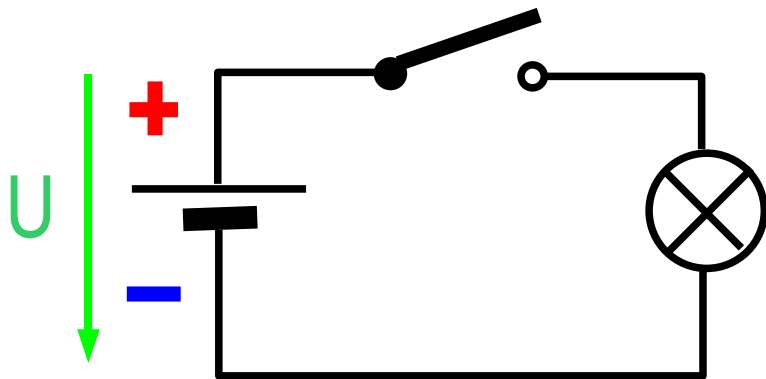
- v pevných látkách:
  - kovy: ??
  - polovodiče: ??
- v kapalinách:
  - elektrolyty: ??
  - voda, alkohol: ??
  - organická rozpouštědla: ??
- v plynech: ??
- ve vakuu: ??

# Co je to za nabité částice, které se mohou pohybovat:

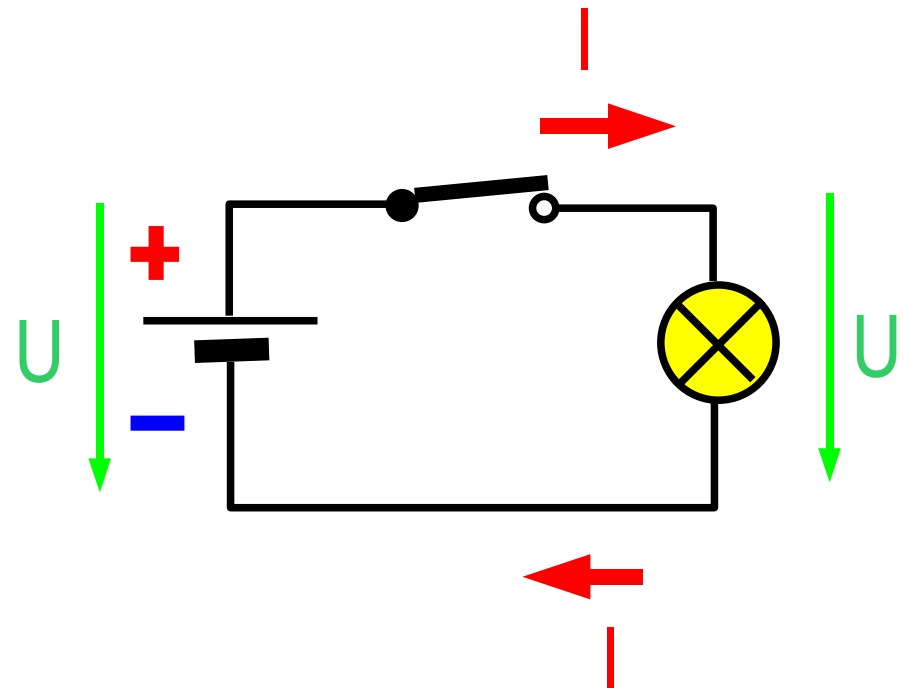
- v pevných látkách:
  - kovy: elektrony
  - polovodiče: elektrony, díry
- v kapalinách:
  - elyty: ionty: + kationty (ke katodě -), - anionty (k anodě +)
  - dest. voda, alkohol: špatně vedou (málo disociovaných částic)
  - organická rozpouštědla: žádné (prakticky nevedou)
- v plynech: ionizované částice plynu (ionty)
- ve vakuu: **elektrony, protony, ionty, alfa-částice**

# Obvod elektrického proudu:

Aby mohl protékat elektrický proud, musí být uzavřený obvod:



$U =$  elektrické napětí

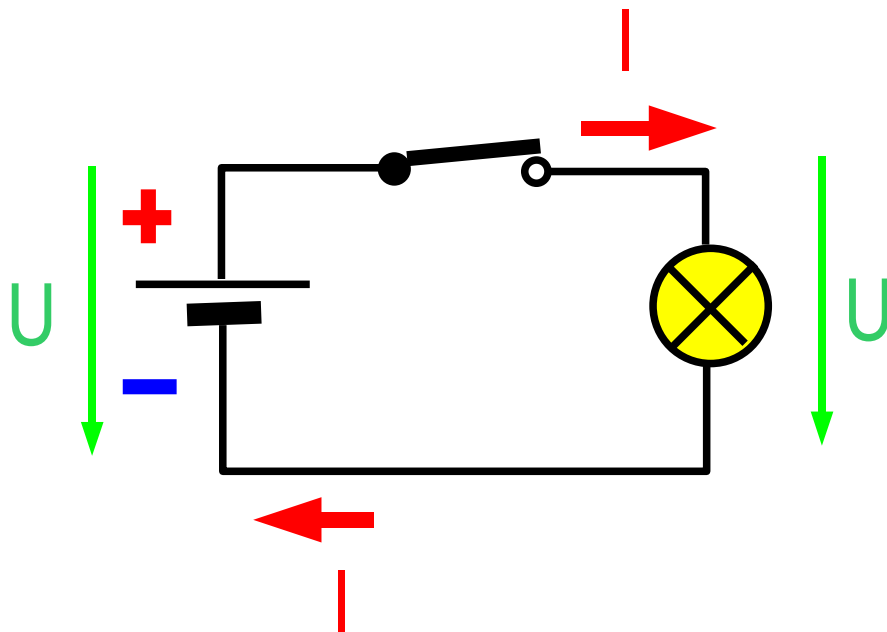


$I =$  elektrický proud



# Elektrický výkon a příkon:

Pokud zanedbáme ztráty ve vedení, pak podle zákona o zachování energie bude výkon zdroje a příkon spotřebiče stejný.



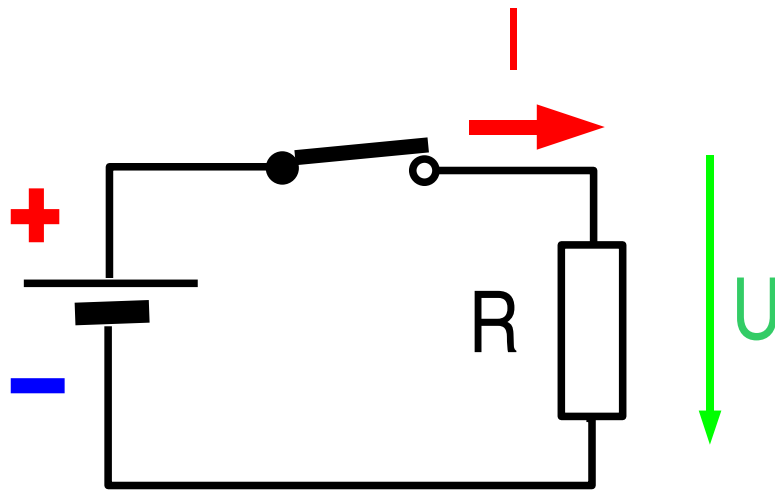
$$P = U \cdot I$$

výkon = napětí · proud

příkon přeměněný na teplo = Jouleovo teplo

# Ohmův zákon:

Napětí na odporu je úměrné procházejícímu proudu.  
Konstantou úměrnosti je velikost tohoto odporu.



$$U = R \cdot I \quad [V = A \cdot \Omega]$$

$$U = \frac{I}{R} \quad [U = \frac{A}{\Omega}]$$

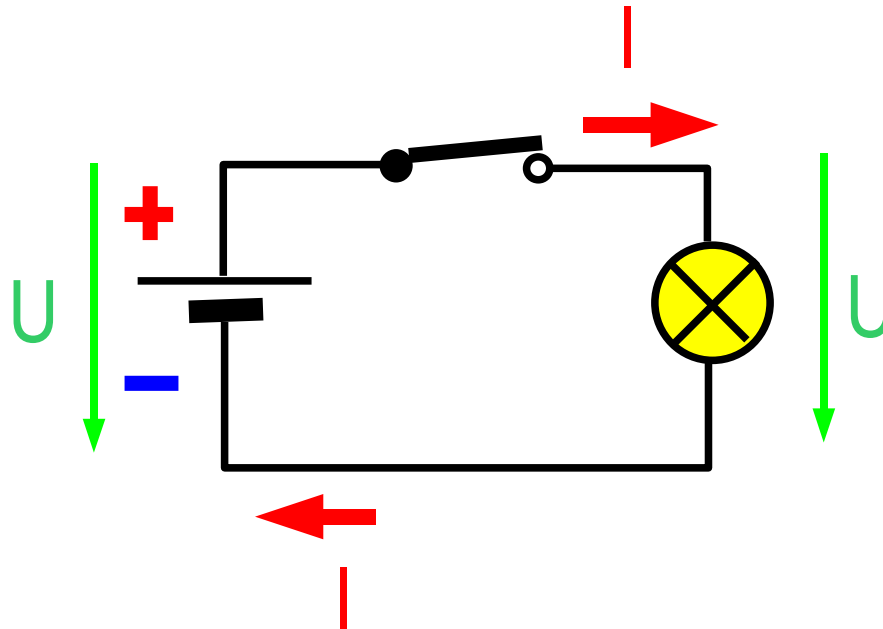
$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega = \frac{V}{A}]$$

Jednotkou elektrického odporu je 1 Ohm.

# Kirchhoffovy zákony:

I. Kirchhoffův (uzly):  $\sum_i U_i = 0$

II. Kirchhoffův (smyčky):  $\sum_i I_i = 0$

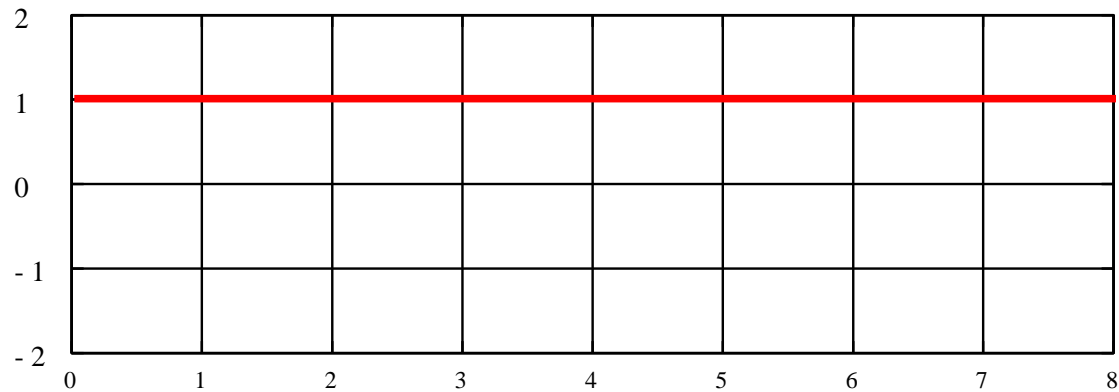


# Elektrický proud:

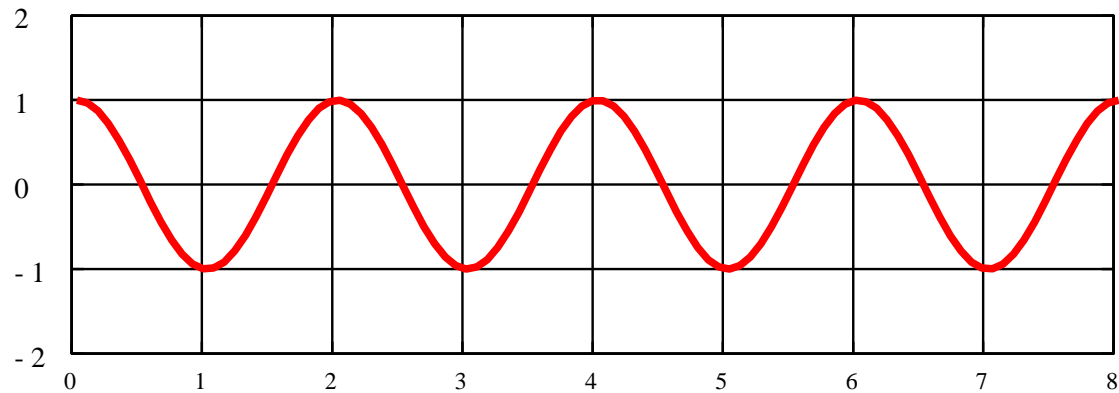
- stejnosměrný
- střídavý
- pulsní
- quasiperiodický
- nepravidelný průběh

# Superposice stejnosměrného a střídavého proudu:

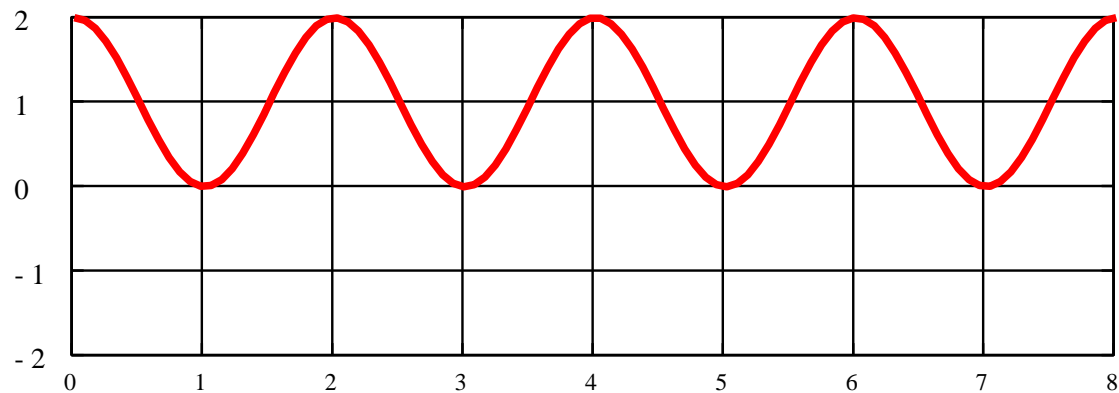
stejnosměrný proud:



střídavý proud:



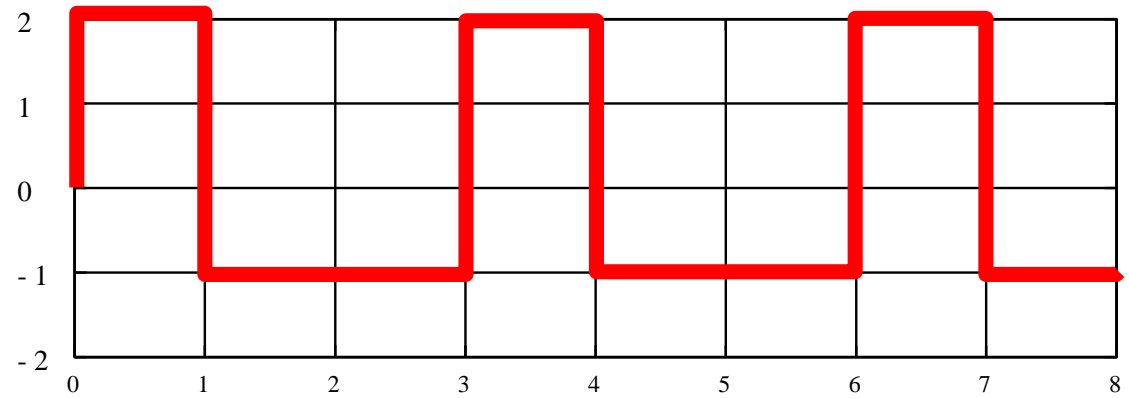
superponované složky  
ss a st proudu:



→  $t$

# Pulsní proudy:

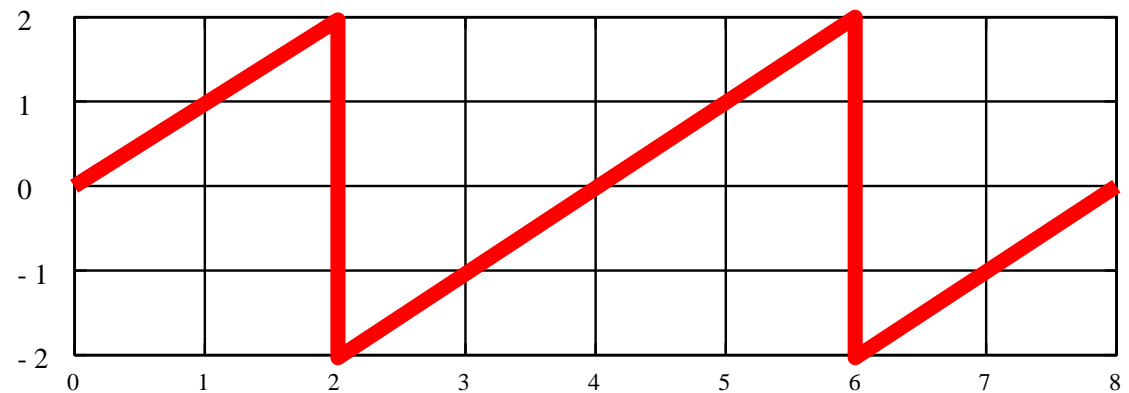
obdélníkový:



trojúhelníkový:



pilovitý:



... a spousta dalších.

→  $t$

# Využití elektřiny v medicíně:

- diagnostika:
  - RTG lampy, NMR atd. atd.
  - biosignály (EKG, EEG atd. atd.)
  
- terapie:
  - pohon všeho možného
  - elektroterapie

# Účinky el. proudu na organismus:

- stejnosměrný:
  - vedení: elektrolyticky, zejména mezibuněčnými prostory
  - účinky: přesun iontů, změna dráždivosti
  - využití: galvanoterapie, iontoforéza
- střídavý:
  - nízkofrekvenční:
    - vedení: elektrolyticky + kapacitně
    - účinky: dráždivé, hyperemizační
    - využití: většinou impulsní elektroterapie
  - vysokofrekvenční:
    - šíření: elektromagnetické vlnění
    - účinky: tepelné
    - využití: diatermie