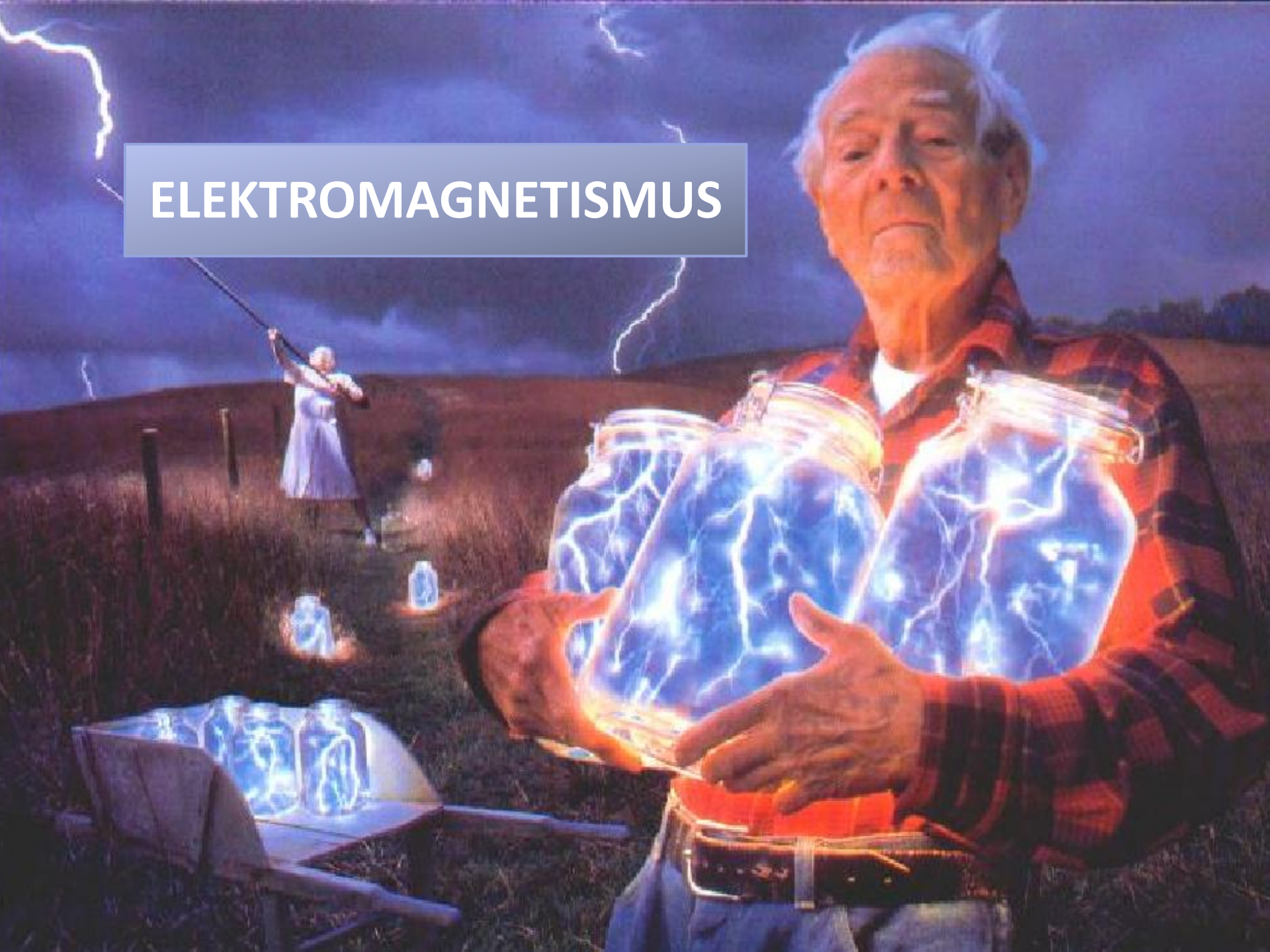


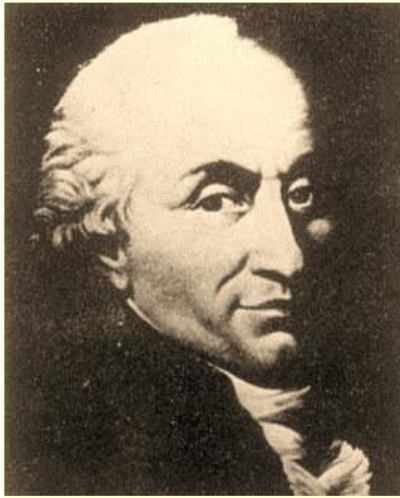
# ELEKTROMAGNETISMUS



# úvodní poznámky

- **klasický elektromagnetismus:** ve smyslu „nekvantový“, tj. všechny veličiny měřitelné s libovolnou přesností
- klasická teorie měla dnešní podobu již před Planckovým objevem
- kvantové modifikace elektromagnetických sil nepodstatné až do vzdáleností  $10^{-10}$  cm, tj. 100x menších, než velikost atomu: stejné zákony platí pro velká tělesa i částice (chování částic je však nutno předpovídat kvantovou teorií)
- vznik **speciální teorie relativity** si nevyžádal žádnou revizi klasického elektromagnetismu: Maxwellovy rovnice jsou zcela kompatibilní s relativitou
- historicky vzato, speciální teorie relativity vyrostla z klasické elektromagnetické teorie

# Charles Augustin de Coulomb



(1736 - 1806)

## silové působení mezi elektrickými náboji:

- na spojnici bodových nábojů
- „působení na dálku“
- **1785 měřil síly** mezi nabitými tělesy torzními vahami:

$$F \sim Q_1 \cdot Q_2$$

$$F \sim r^{-2}$$

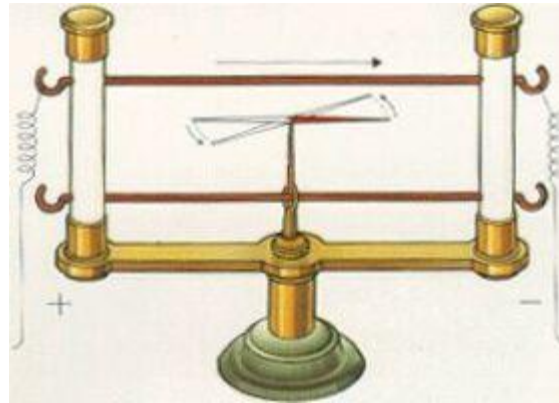
- 1785 - 1791: „7 statí o elektřině a magnetismu“
- (mnoho let před Coulombem zdůvodňoval úměrnost  $r^{-2}$  Priestley na základě absence elektrických sil uvnitř duté koule)



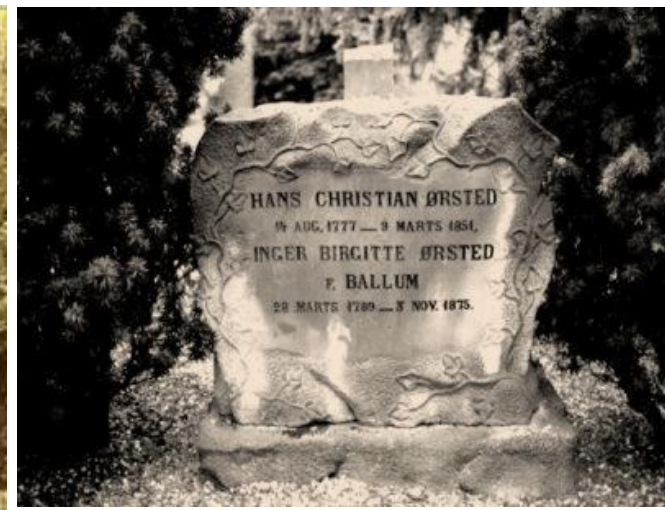
# Hans Christian Oersted



(1777 - 1851)



1820, pokusy se zahříváním vodiče při průchodu proudem: magnetická strelka se vychyluje, prochází-li blízkým vodičem proud!

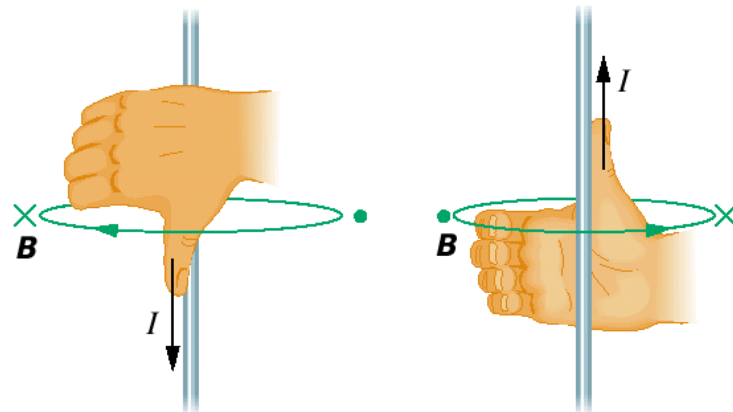


# André Marie Ampère



(1775 - 1836)

- cívka, kterou protéká elektrický proud, působí na střelku kompasu
- cívka, kterou protéká elektrický proud, a která je volně zavěšená nad vodičem, **se orientuje jako střelka**
- **matematické vyjádření velikosti a směru magnetické síly** – příspěvky elementů vodiče – zákon Biotův-Savartův

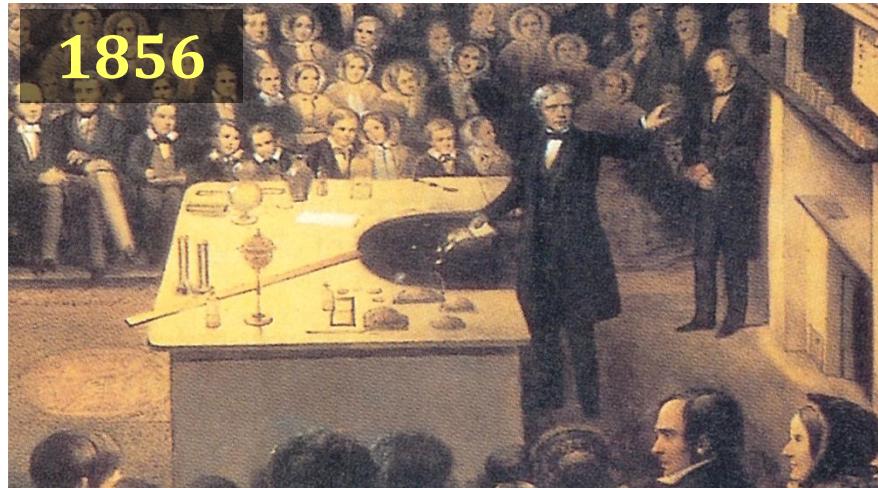


# Michael Faraday



(1791-1867)

- dielektrika zmenšují elektrickou sílu nikoli v důsledku stínění, ale **polarizace**
- 1845: **koncept pole** v jinak zdánlivě prázdném prostoru - popis magnetických a elektrických sil, **siločáry pole**
- magnetismus má charakter „kruhové síly“
- magnetická optická rotace (Faradayův efekt)
- 1831: **elektromagnetická indukce**





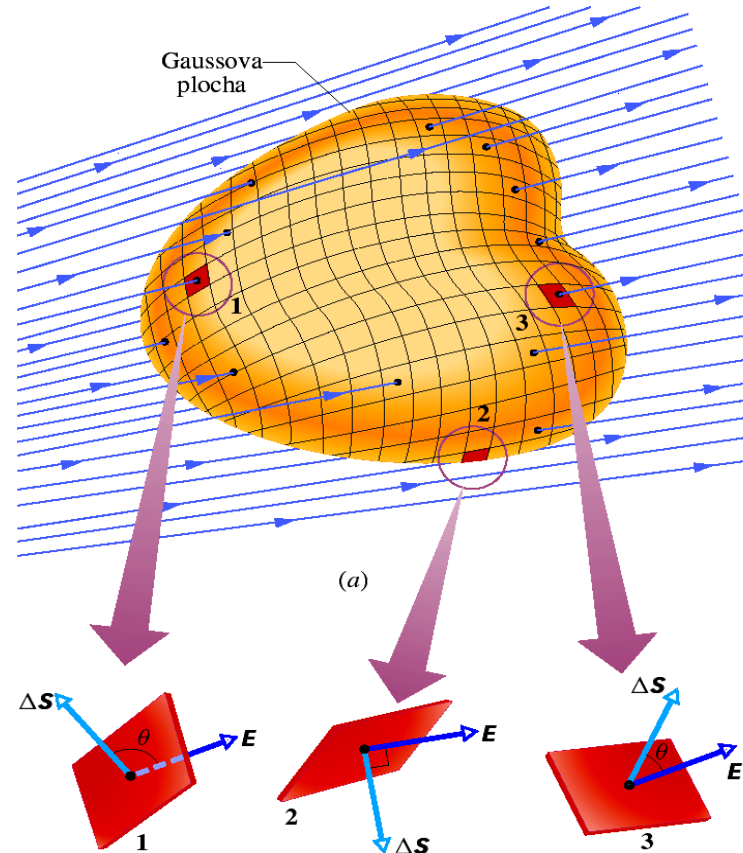
# Carl Friedrich Gauss



(1777 – 1855)

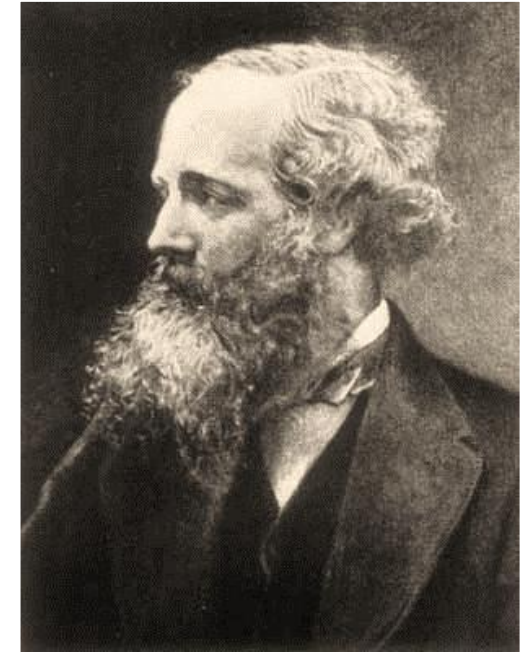
- první **matematická formulace teorie pole:**
- **siločáry, tok, Gaussův zákon**

$$\epsilon_0 \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = Q \quad (\text{Gaussův zákon}).$$

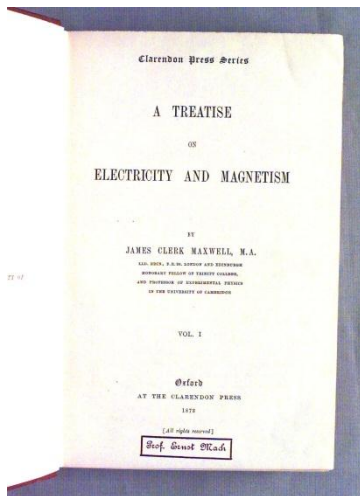


# James Clerk Maxwell

- matematická formulace Faradayových objevů
- **elektrické a magnetické pole: základní entity**; popisují je parciální diferenciální rovnice
- základ: práce Gaussovy, Laplaceovy, Poissonovy (gravitační teorie, potenciál ...)
- **důležitý matematický výsledek: elektromagnetický rozruch se šíří jako vlna, a to rychlostí světla**



(1831-1879)



**1865:** „A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field“: rovnice pro 20 proměnných pole

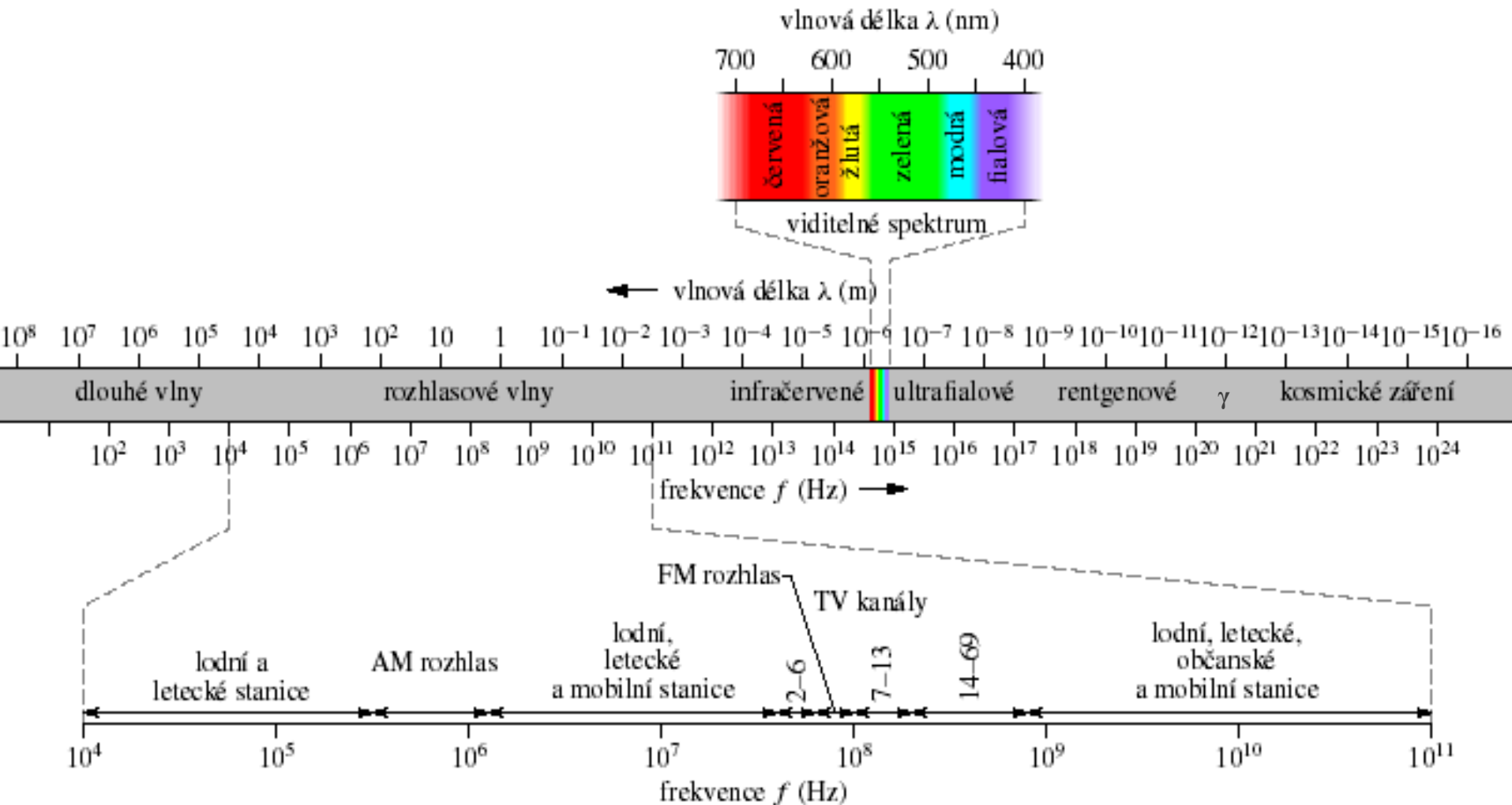
**1873:** „A Treatise on Electricity And Magnetism“: formulace rovnic pole pomocí kvaternionů (čtyřrozměrné proměnné) a potenciálu pole

**1892, Oliver Heaviside:** „On the Forces, Stresses and Fluxes of Energy in the Electromagnetic Field“: transformace rovnic do dnešní vektorové podoby



# Maxwellovy rovnice

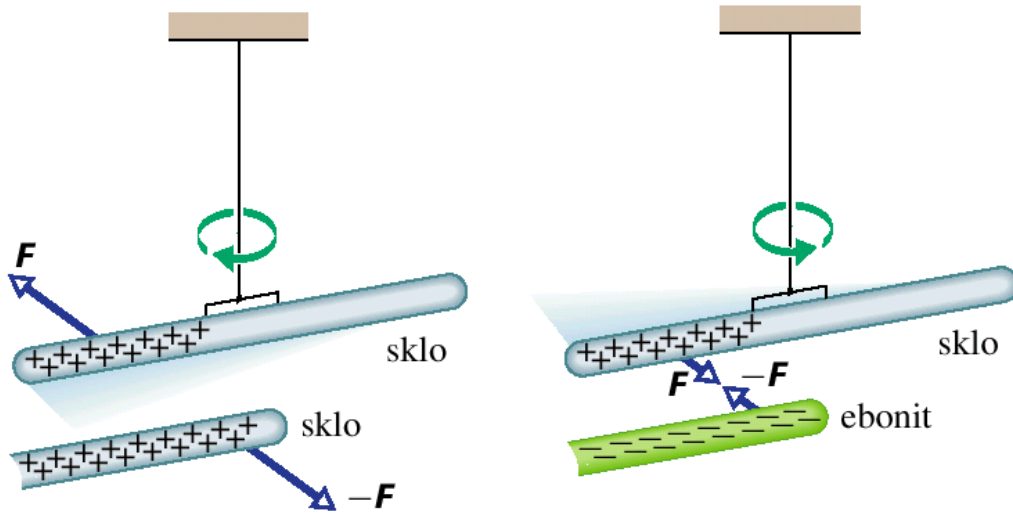
popisují celé spektrum elektromagnetických vln



# elektrický náboj



# kladný a záporný náboj

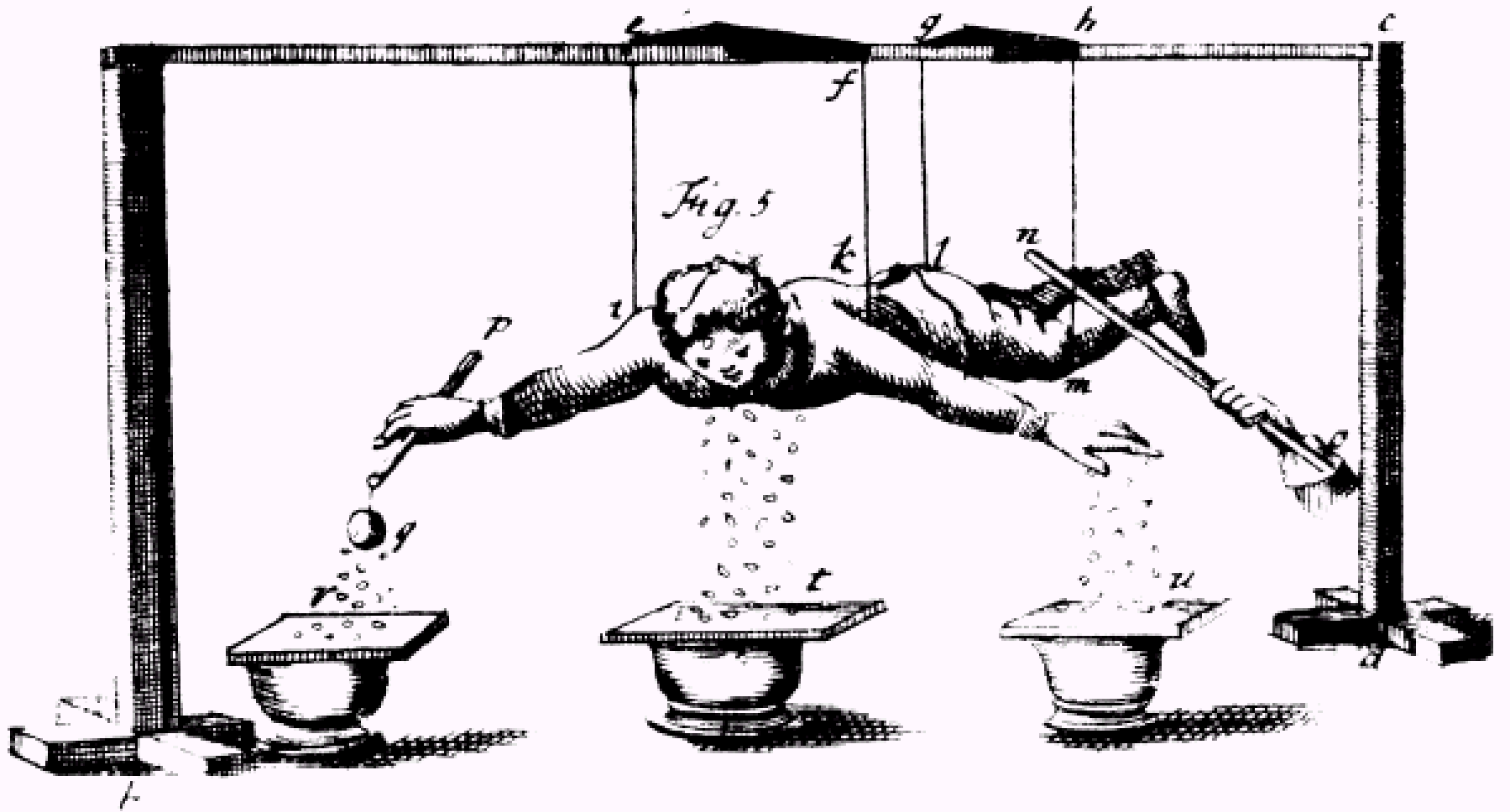


náboj existuje ve dvou variantách, historicky označených jako kladný a záporný

náboje téhož znaménka se **odpuzují**  
náboje opačného znaménka se **přitahují**

(když se nabitá tělíska A, B odpuzují a A přitahuje další tělíska C, pak vždy také B přitahuje C)





# Benjamin Franklin



(1706 - 1790)

- americký státník, diplomat, vydavatel, přírodovědec a spisovatel
- experimentoval s drakem v bouři – blesky mají elektrickou povahu
- zavedl označení náboje



# zákon zachování náboje

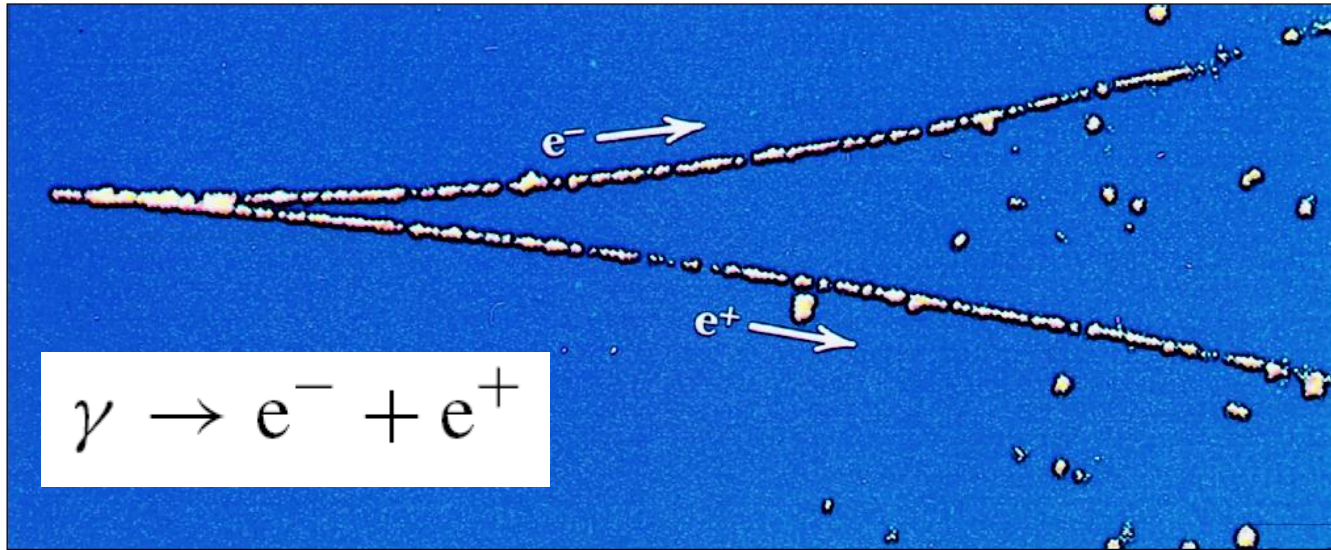
**Celkový elektrický náboj v izolovaném systému** (tj. algebraický součet kladného a záporného náboje přítomného v libovolném okamžiku) **se nemění**.

*Izolovaným systémem* míníme, že žádná látka neprochází přes hranice systému (například fotony však ano).

**Velikost náboje je relativisticky invariantní.**  
Zákon zachování náboje platí v libovolné inerciální soustavě a pozorovatelé v různých soustavách naměří týž náboj.



# příklad zachování náboje



**Stopy elektronu a pozitronu v bublinkové komoře.** Dvojice částic vznikla z fotonu gama záření. Foton není nabit, a proto nezanechává v přehřáté kapalině stopu bublinek.

[HRW]

# kvantování náboje

**Elektrický náboj**  $Q$  se v přírodě objevuje pouze jako **celistvý násobek základního množství náboje** – náboje elektronu  $e$ .

$$Q = ne, \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots,$$

elementární náboj:

$$e = 1,602\,176\,565(35) \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

podle údajů The National Institute of Standards and Technology (NIST), 2010

<http://physics.nist.gov/cuu/Constants>

v závorce směrodatná odchylka (68% interval spolehlivosti)

jednotka náboje: **1 Coulomb** (definice pomocí 1 Ampéru)

# elektrický náboj

**Elektrický náboj** je základní vlastnost elementárních částic, z nichž je svět sestaven, je s nimi spojen(a) za jakékoli situace.

J. J. Thomson  
(1897)

elektron	$e^-$ (nebo jen $e$ )	$-e$
proton	$p$	$+e$
neutron	$n$	$0$

**elektricky neutrální** (předmět)

obsahuje shodná množství obou typů náboje  
elektricky neinteraguje

**elektricky nabitý** (předmět)

obsahuje rozdílná množství obou typů náboje  
elektricky interaguje



# příklad

## PŘÍKLAD 22.4

Elektricky neutrální měděná mince o hmotnosti  $m = 3,11$  g obsahuje stejné množství kladného a záporného náboje.

(a) Jaká je velikost  $Q$  celkového kladného (nebo záporného) náboje obsaženého v minci?

Cu:  $Z = 29$  (protonové číslo)

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

$M_m = 63,5$  g/mol (molární hmotnost)

$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  (Avogadrova konstanta)

# další pojmy

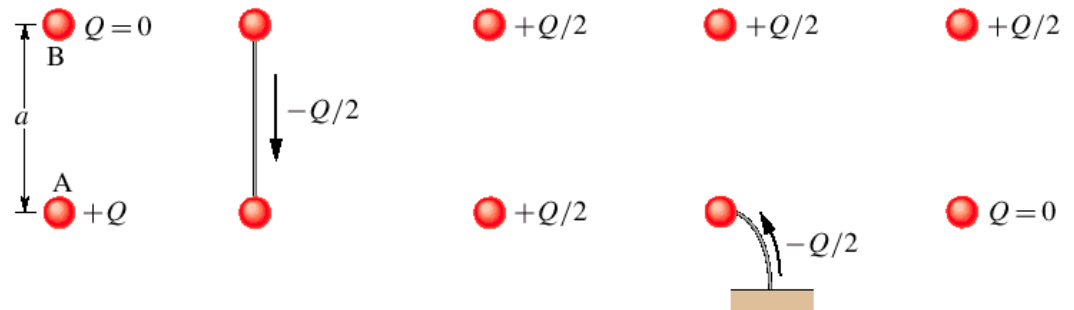
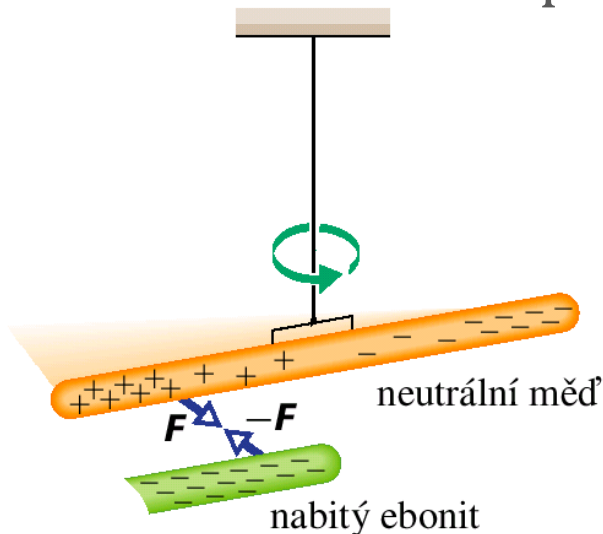
**elektrický vodič/ nevodič (izolant):** část náboje se může uvnitř materiálu téměř volně pohybovat/ podstatná část náboje se nemůže uvnitř materiálu pohybovat

**elektrický proud:** uspořádaný pohyb náboje

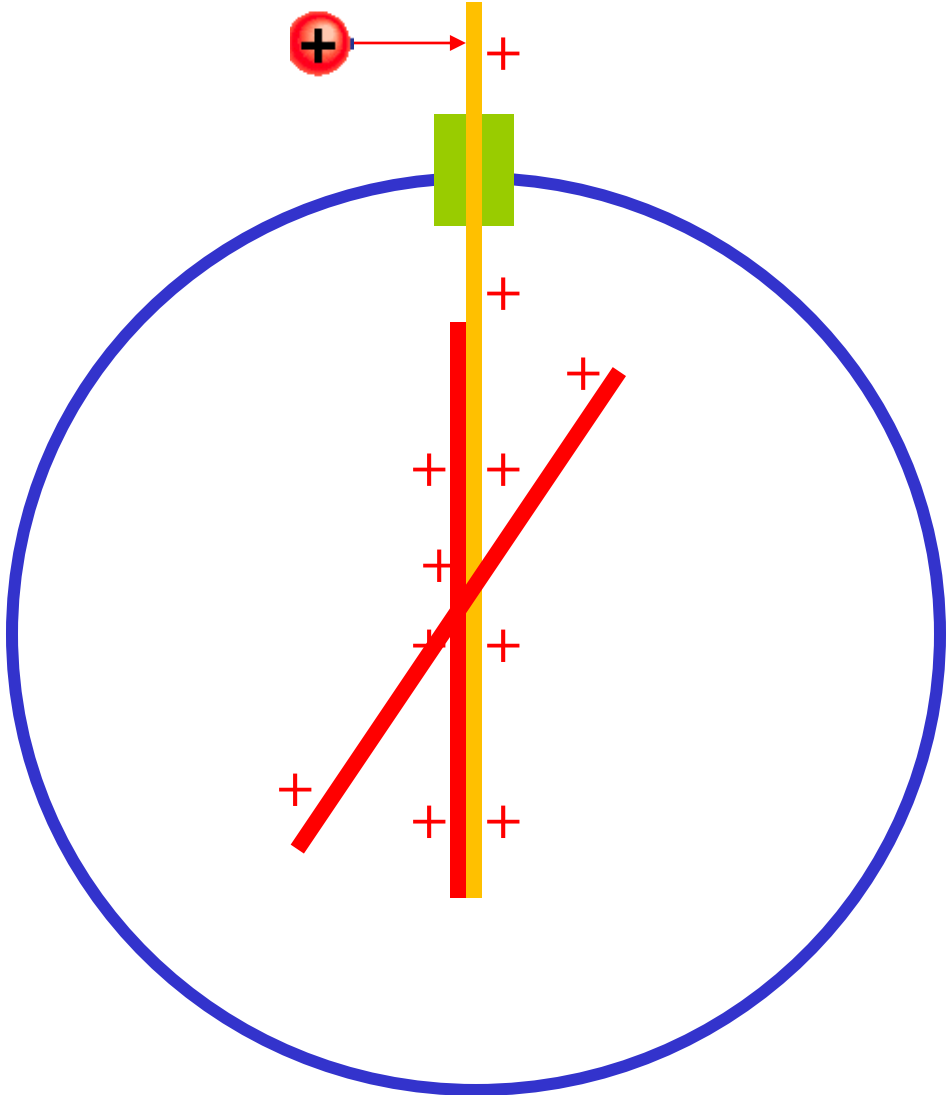
**vybít:** elektricky zneutralizovat

**nabít:** přivést/ odvést část náboje určitého znaménka

**uzemnit:** vodivě spojit se zemským povrchem



# elektrometr

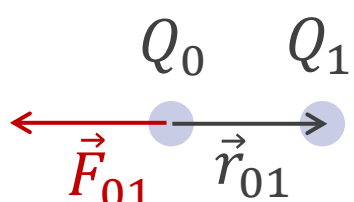


# elektrostatická síla



# Coulombův zákon

Elektrostatická síla mezi dvěma nabitými částicemi je úměrná jejich nábojům, nepřímo úměrná čtverci jejich vzdálenosti a směřuje podél jejich přímkové spojnice.

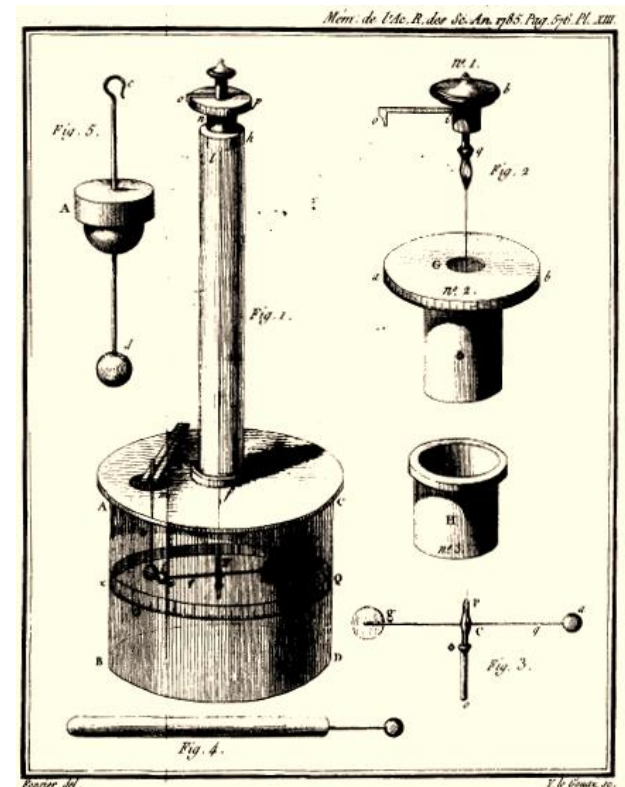

$$|\vec{F}_{01}| = k \frac{|Q_0 Q_1|}{r_{01}^2}$$
$$\vec{F}_{01} = k \frac{Q_0 Q_1}{r_{01}^3} (-\vec{r}_{01})$$

$$k = c^2 \cdot 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1} \cong 9 \cdot 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

$$\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} \cong 8,85 \cdot 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

(permitivita vakua)



Coulombovy torzní váhy



# příklad

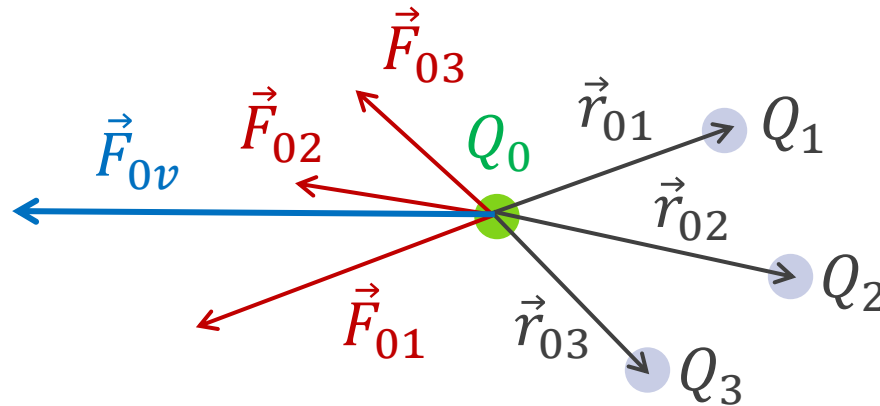
## PŘÍKLAD 22.4

Elektricky neutrální měděná mince o hmotnosti  $m = 3,11$  g obsahuje stejné množství kladného a záporného náboje.

(a) Jaká je velikost  $Q$  celkového kladného (nebo záporného) náboje obsaženého v minci?

(b) Předpokládejme, že kladný a záporný náboj v minci by mohly být soustředěny do dvou oddělených „balíčků“ vzdálených 100 m. Jak velká přitažlivá síla by působila na každý balíček?

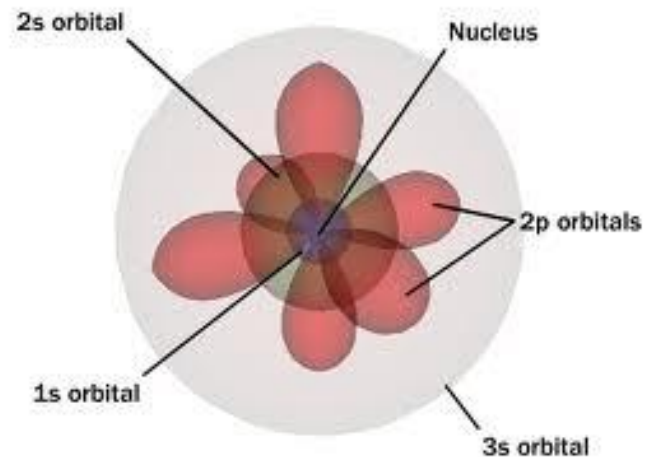
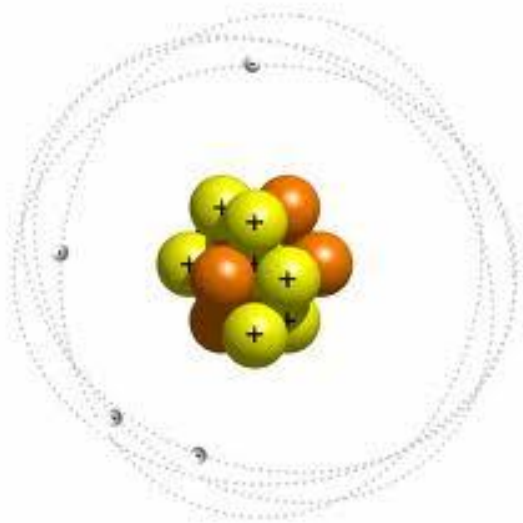
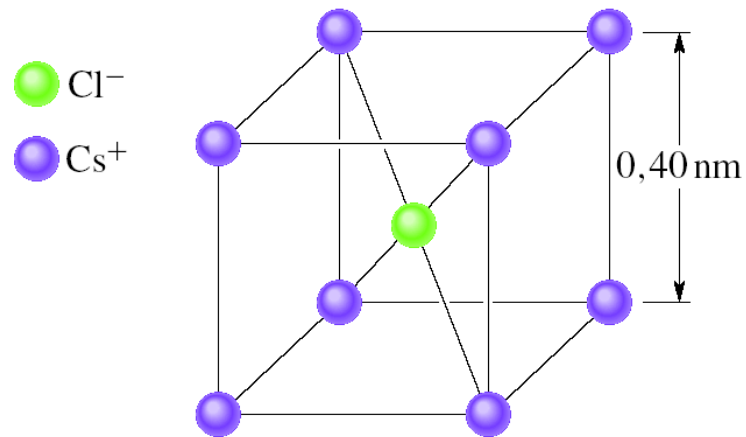
# princip superpozice



výsledná síla působící na náboj  $Q_0$ :

$$\vec{F}_{0v} = \sum_{i=1}^3 \vec{F}_{0i} = Q_0 k \sum_{i=1}^3 \frac{Q_i}{r_{0i}^3} (-\vec{r}_{0i})$$

# vše drží pohromadě díky elektrostatické interakci...

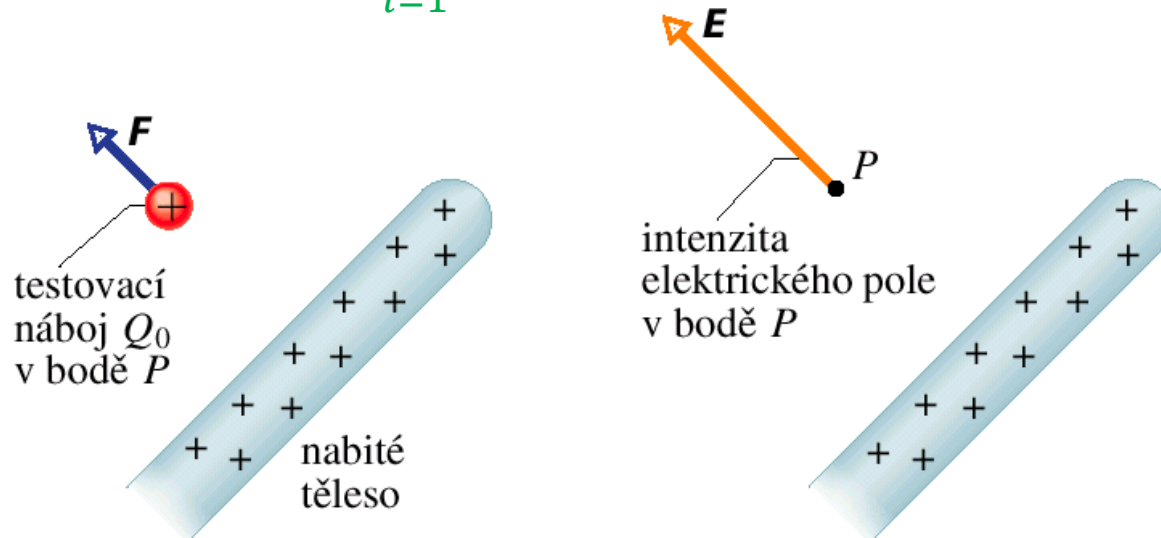


# elektrické pole



# intenzita elektrického pole

motivace... 
$$\vec{F}_{0v} = Q_0 k \sum_{i=1}^3 \frac{Q_i}{r_{0i}^3} (-\vec{r}_{0i}) = Q_0 \vec{E}$$



intenzita elektrického pole:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0}$$



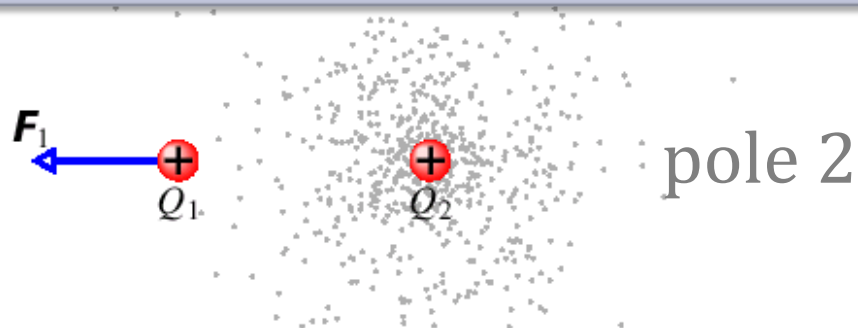
# příklady elektrické intenzity

ELEKTRICKÉ POLE	VELIKOST INTENZITY ( $\text{N}\cdot\text{C}^{-1}$ )
Na povrchu jádra uranu	$3\cdot 10^{21}$
Uvnitř atomu vodíku (Bohrův poloměr, úloha 56 z kap. 24)	$5\cdot 10^{11}$
Při elektrickém průrazu ve vzduchu	$3\cdot 10^6$
V blízkosti nabitého válce fotokopírovacího stroje	$10^5$
V blízkosti nabitého plastického hřebenu	$10^3$
V dolní vrstvě atmosféry	$10^2$
Uvnitř měděného vodiče v elektrických obvodech v domácnosti	$10^{-2}$

# interakce dvou částic



1. první náboj budí ve svém okolí *elektrické pole*
2. elektrické pole se šíří prostorem
3. druhý náboj interaguje s polem (prvního náboje), ve kterém se nachází
4. (nebo naopak)

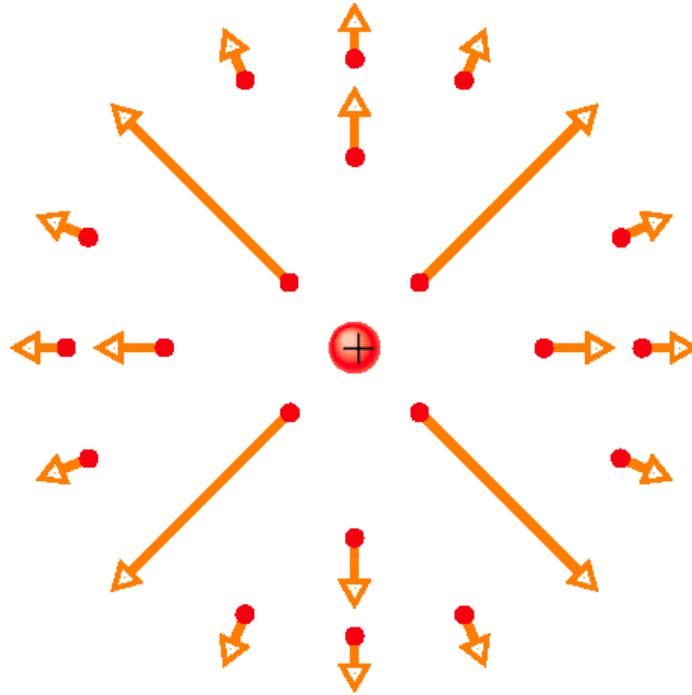


# postup při výpočtu

při popisu interakce nabitých těles zpravidla řešíme **dvě úlohy**:

1. výpočet **intenzity pole** vytvářeného nějakým rozložením nábojů  $\vec{E}(\vec{r})$
2. výpočet **síly**, kterou dané pole působí na (další) náboj umístěný do pole  
$$\vec{F}(\vec{r}) = Q\vec{E}(\vec{r})$$

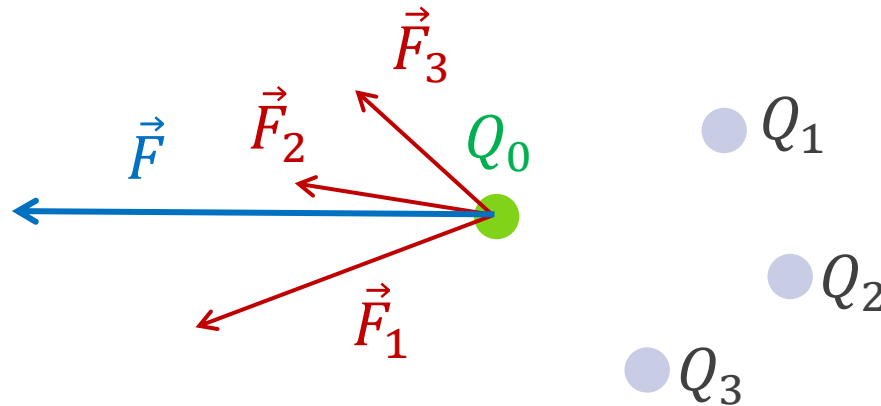
# elektrické pole bodového náboje



$$E = \frac{F}{Q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q|}{r^2}$$

# elektrické pole soustavy nábojů

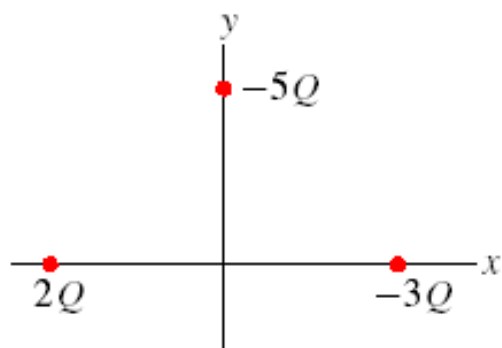
princip  
superpozice:



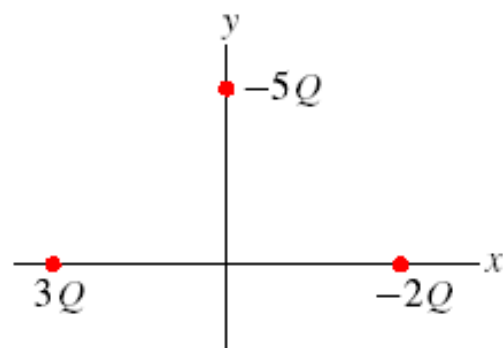
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0} = \sum_{i=1}^p \frac{\vec{F}_i}{Q_0} = \sum_{i=1}^p \vec{E}_i$$



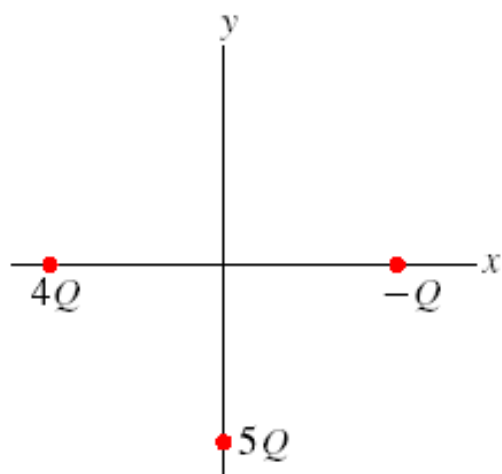
**KONTROLA 2:** Obrázek znázorňuje čtyři situace, v nichž jsou nabité částice ve stejné vzdálenosti od počátku. Seřadte tyto případy sestupně podle velikosti intenzity výsledného elektrického pole v počátku souřadnic.



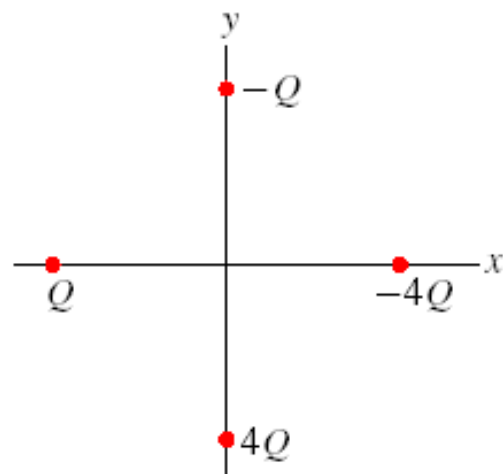
(a)



(b)

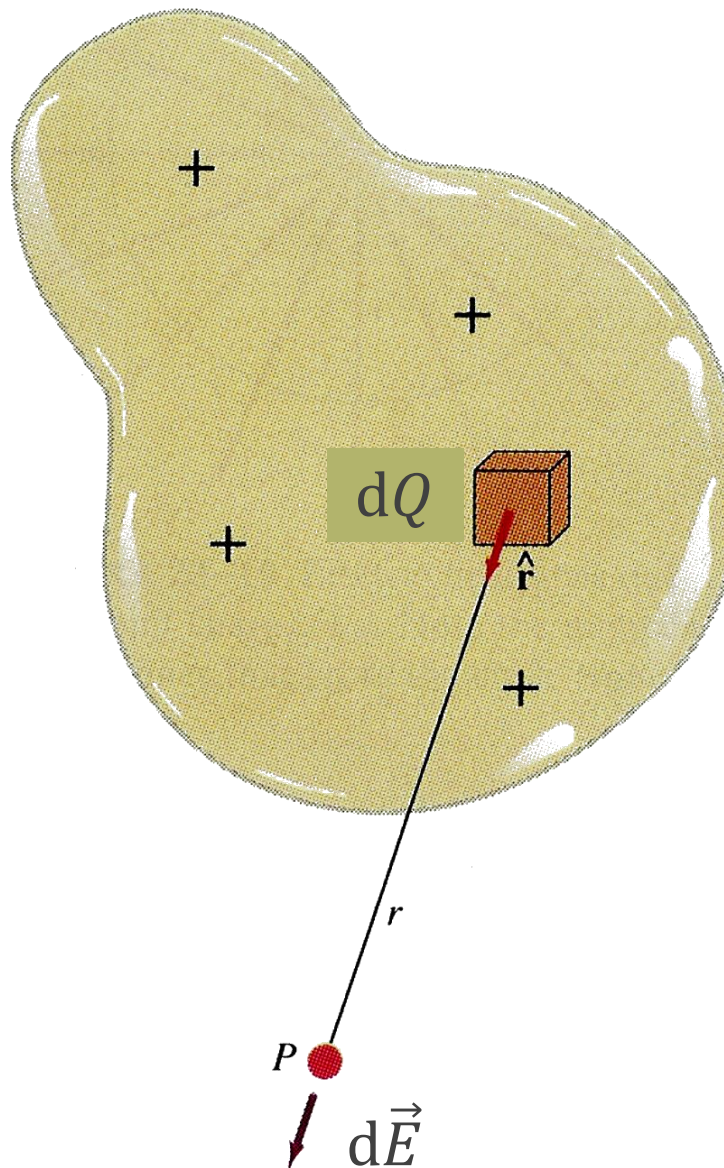


(c)



(d)

# pole složitější soustavy nábojů



$$\vec{E} = \iiint d\vec{E}$$

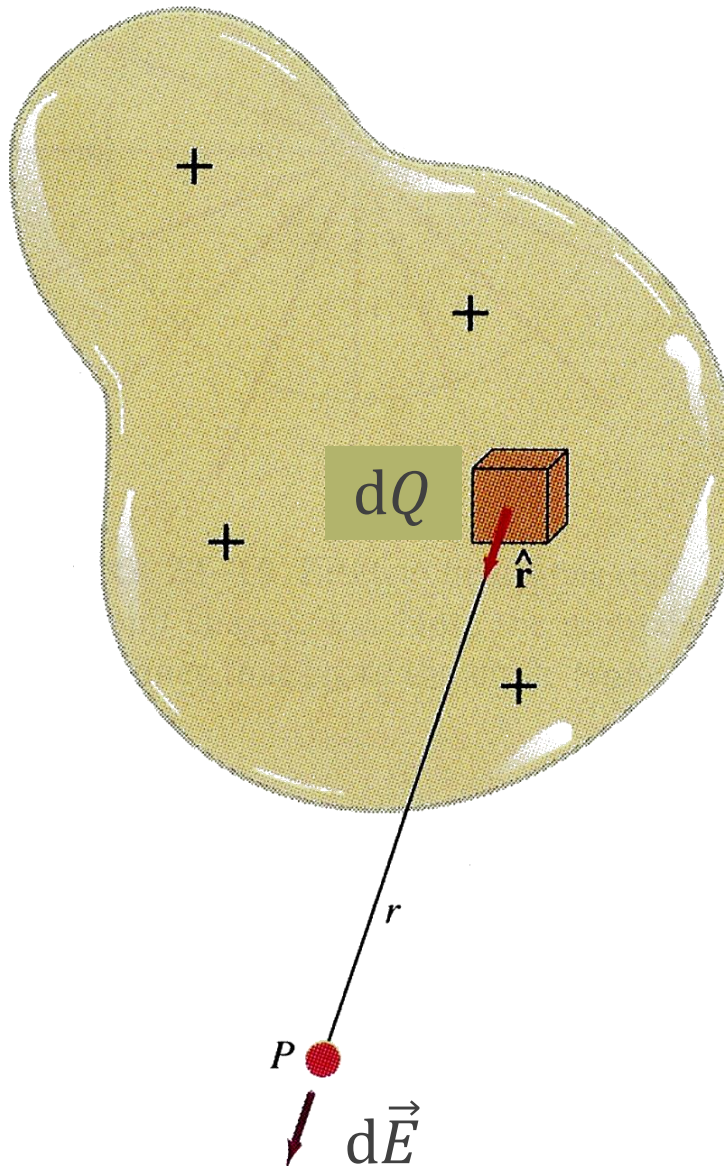
$$dE = k \frac{dQ}{r^2}$$

$$dQ = \rho dV \dots$$

**Tabulka 23.2** Některé charakteristiky popisující rozložení elektrického náboje

NÁZEV	ZNAČKA	JEDNOTKA SI
Náboj	$Q$	C
Délková hustota náboje	$\tau$	$C \cdot m^{-1}$
Plošná hustota náboje	$\sigma$	$C \cdot m^{-2}$
Objemová hustota náboje	$\rho$	$C \cdot m^{-3}$

# postup výpočtu pro složitější soustavu



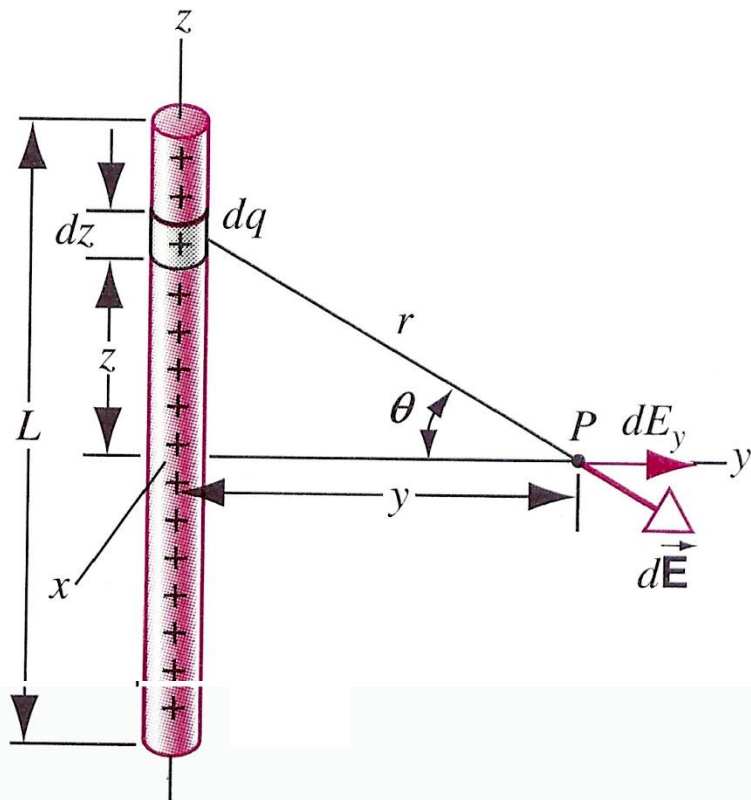
$$dE = k \frac{dQ}{r^2} \quad dQ = \rho dV \quad \dots$$

$$dE_{x,y,z} = kdQ \dots$$

**symetrie úlohy:** možnost předem bez výpočtu vyloučit některé souřadnice

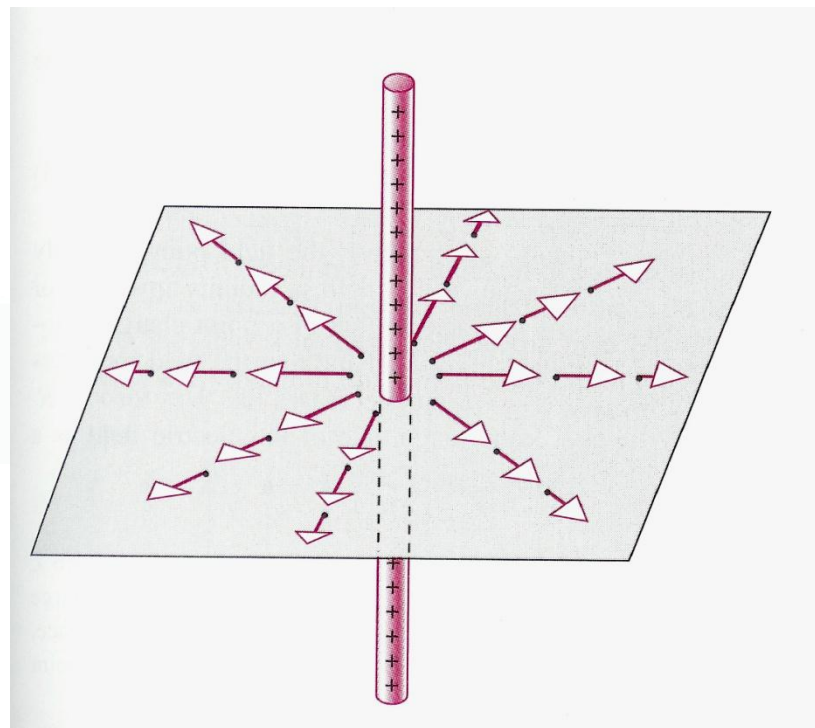
$$E_{x,y,z} = \iiint dE_{x,y,z}$$

# přímé nabité vlákno

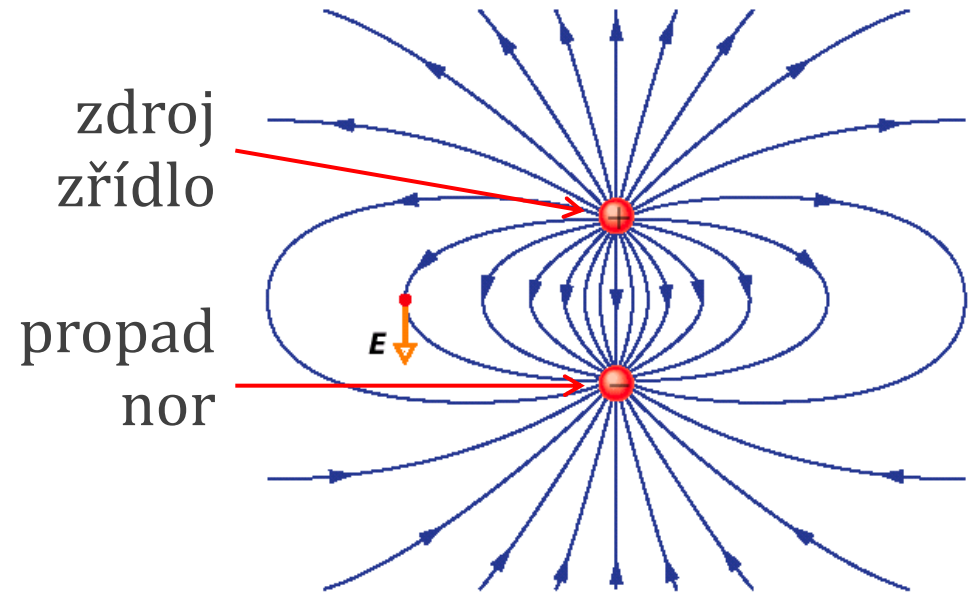
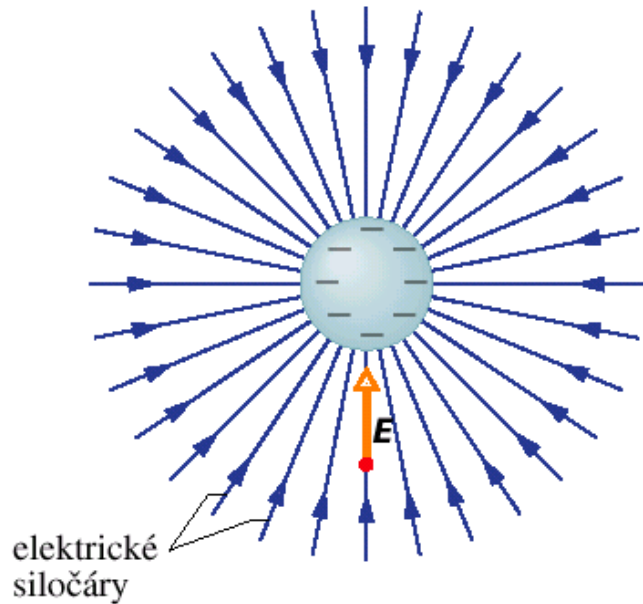


$$E_{x,z} = 0$$

$$E_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\tau L}{y\sqrt{y^2 + L^2/4}}$$

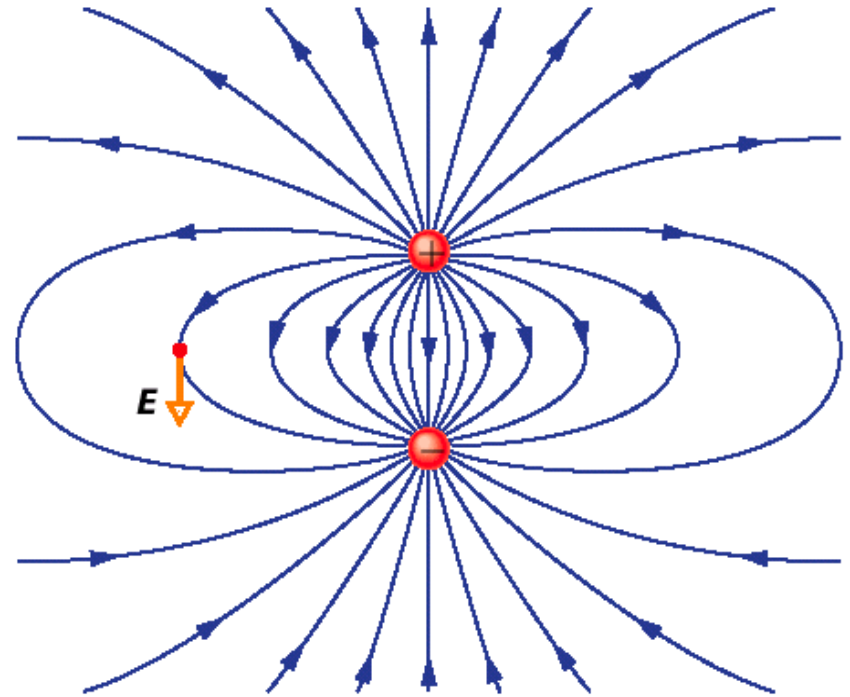
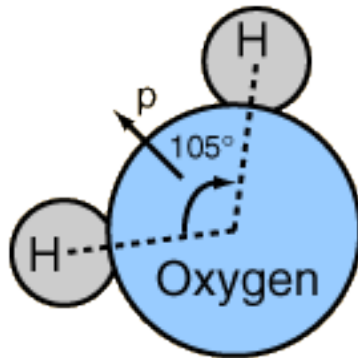
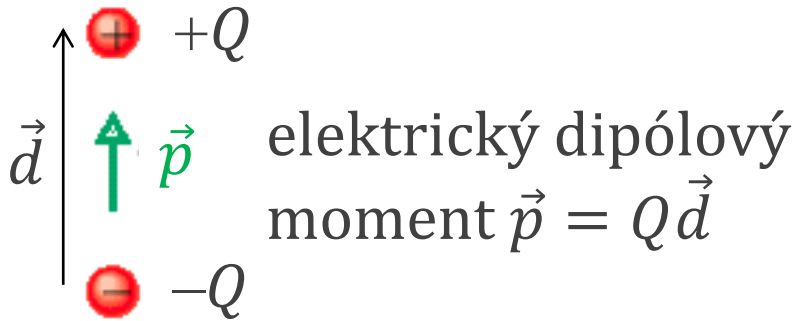


# elektrické siločáry



1. vektor intenzity pole  $\vec{E}(\vec{r})$  je v každém bodě **tečnou siločáry**
2. **počet siločar na jednotku plochy** kolmé k siločarám je v každém místě úměrný velikosti intenzity  $E(\vec{r})$

# elektrické pole dipólu



molekula vody:

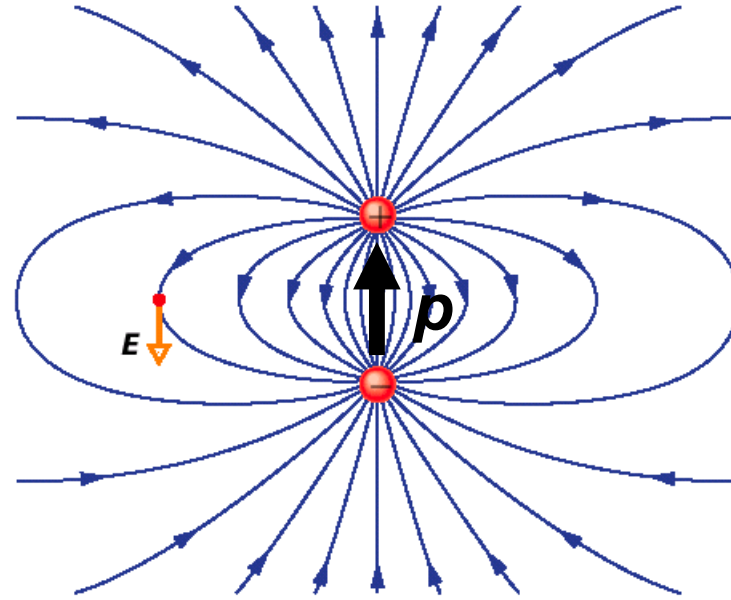
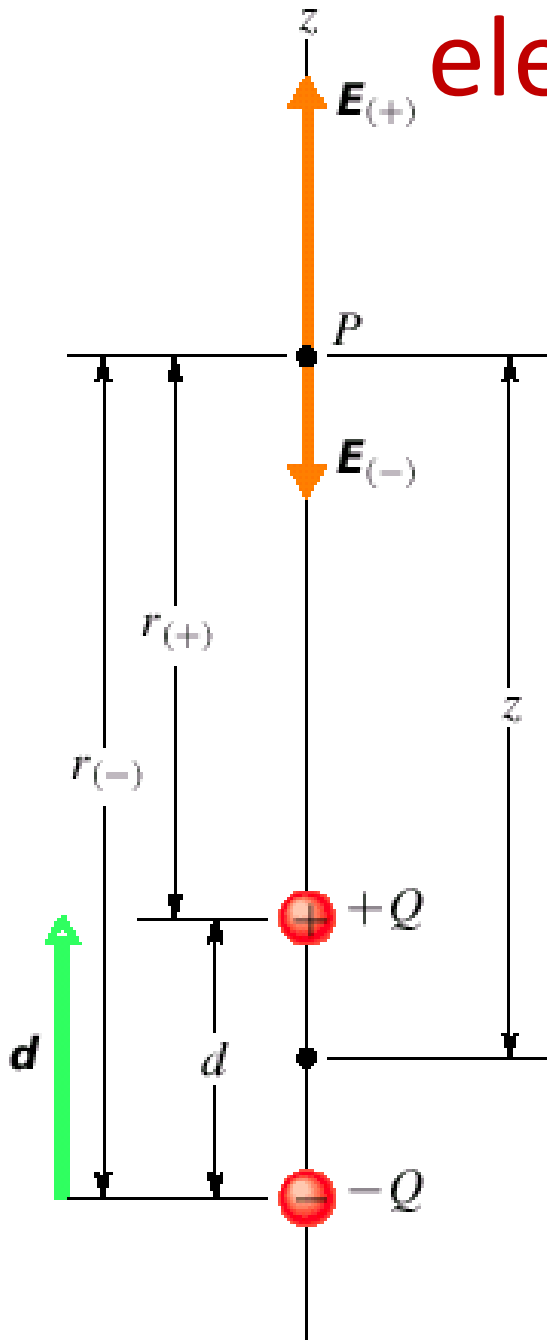
$$p = 6,2 \cdot 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m} \text{ (dipólový moment)}$$

$$d = \frac{p}{10e} = 0,0039 \text{ nm} \text{ (efektivní separace)}$$

$$a_0 = 0,05 \text{ nm} \text{ (Bohrův poloměr)}$$



# elektrické pole dipólu



$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p}{z^3}$$

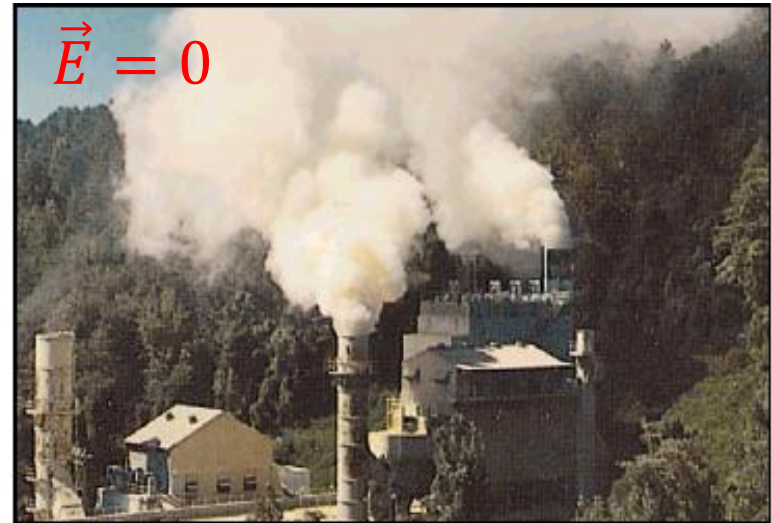
# náboj v elektrickém poli



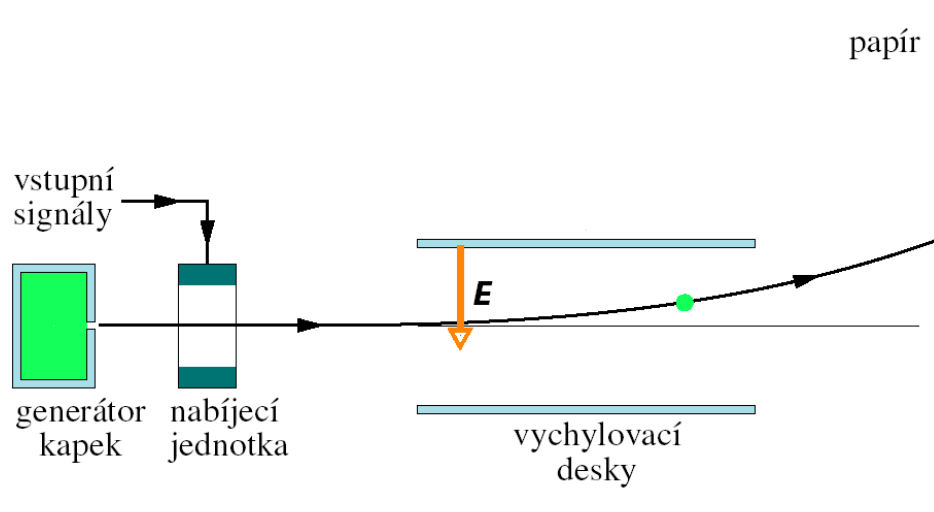
# bodový náboj v elektrickém poli

$$\vec{F} = Q_0 \vec{E}$$

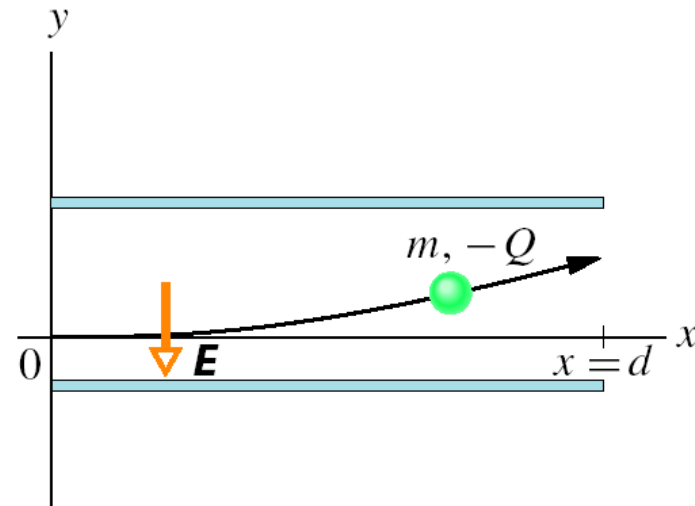
Na nabitou částici působí ve vnějším elektrickém poli  $\vec{E}$  elektrostatická síla  $\vec{F}$ . Má směr  $\vec{E}$ , pokud je náboj  $Q_0$  kladný, opačný směr, je-li  $Q_0$  záporný.



# příklad

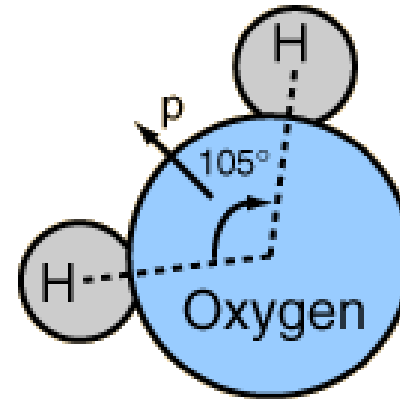
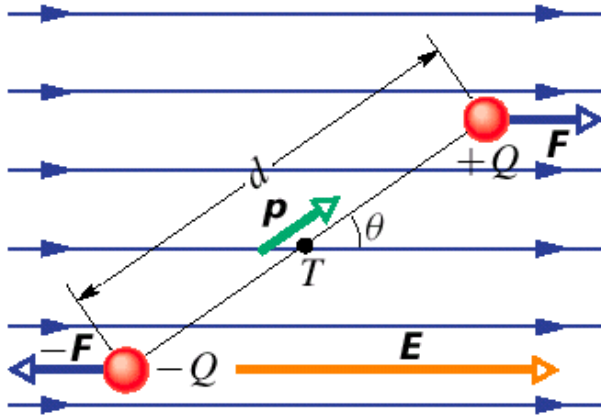


**Obr. 23.15** Základní princip inkoustové tiskárny. Vstupním signálem z počítače určujeme náboj předávaný každé kapce a tím polohu na papíře, kam kapka dopadne. K vytvoření jednoho znaku je potřeba asi 100 drobných kapek.



**Obr. 23.16** Příklad 23.8. Kapka inkoustu o hmotnosti  $m$  se záporným nábojem  $-Q$  je vychylována elektrickým polem inkoustové tiskárny.

# dipól v elektrickém poli



síla: 
$$\vec{F}_v = \vec{F} - \vec{F} = 0$$

moment síly: 
$$\vec{M}_v = \vec{p} \times \vec{E}$$

potenciální energie: 
$$E_p = -\vec{p} \cdot \vec{E}$$

