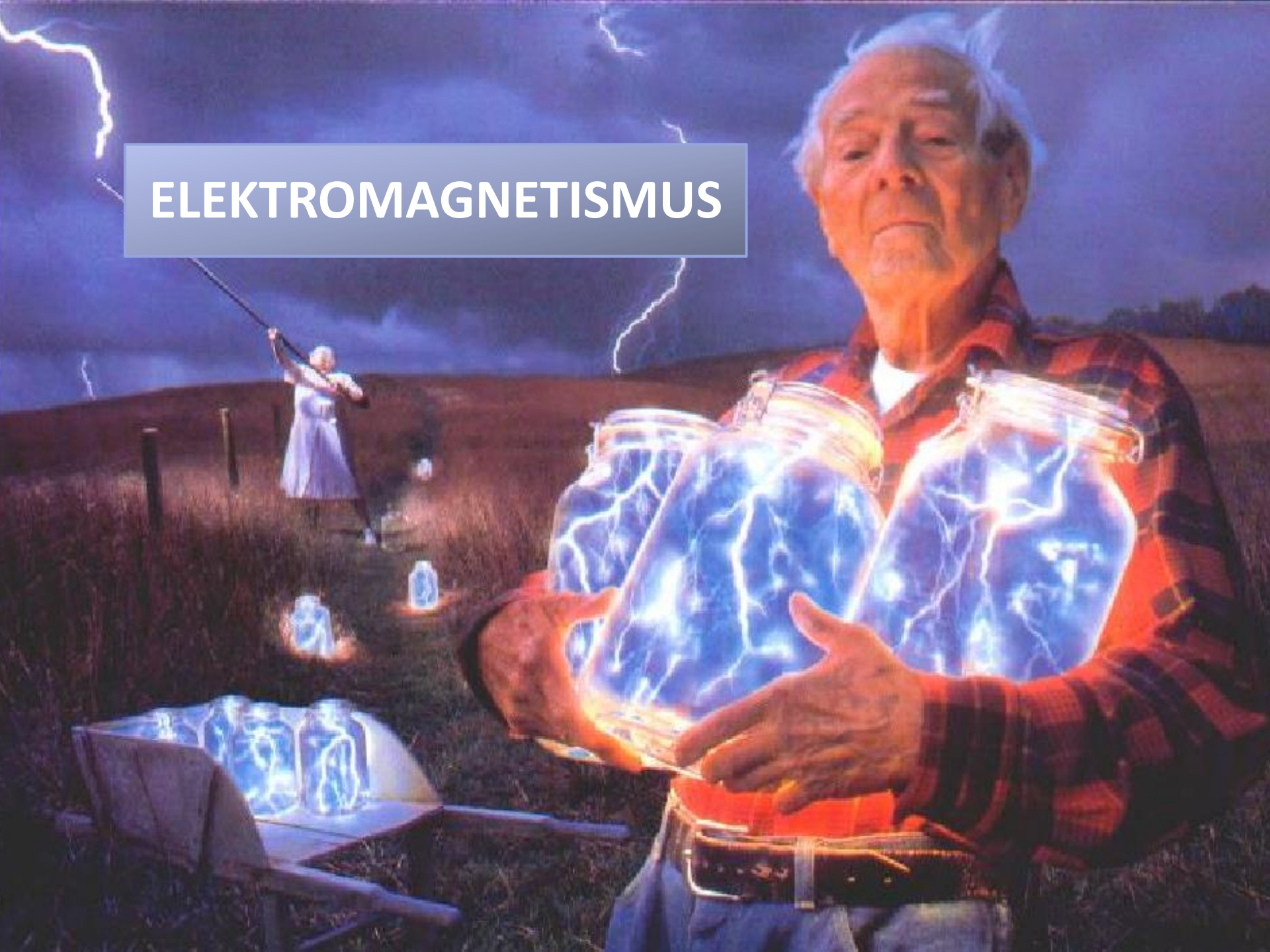


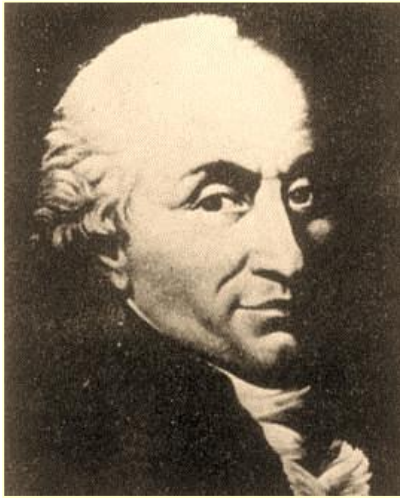
ELEKTROMAGNETISMUS



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 (pro silová působení) platí pro velká tělesa i částice (chování částic při působení těchto sil je však nutno předpovídat kvantovou teorií)
- pro ještě menší vzdálenosti je odvozena **kvantová elektrodynamika**, která se shoduje s experimentem pro libovolně malé vzdálenosti (v současnosti ověřitelné)
- 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:

$$F \sim Q_1 \cdot Q_2$$

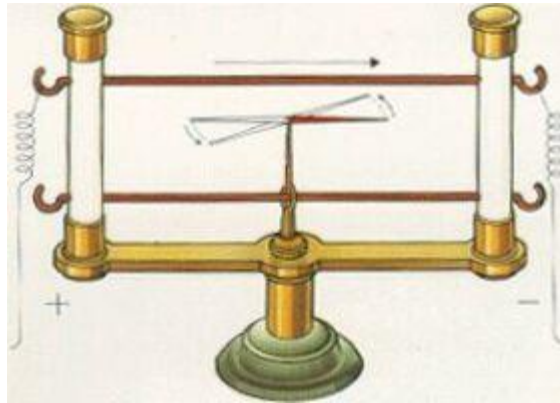
$$F \sim r^{-2}$$

- 1785 - 1791: „7 statí o elektřině a magnetismu“
- (mnoho let před Coulombem zdůvodňoval úměrnost r^{-2} Joseph 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!

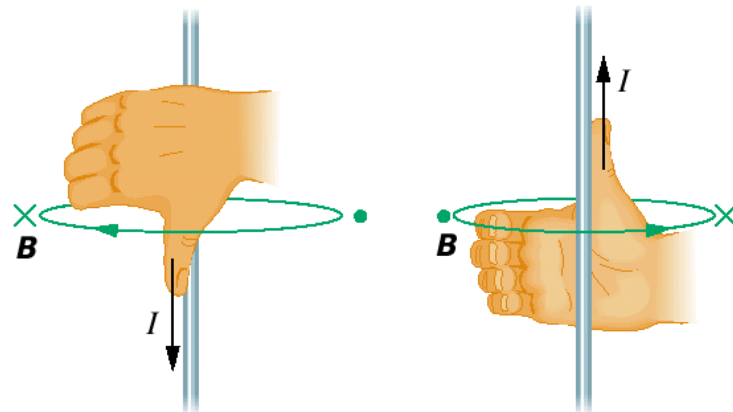


André Marie Ampère



(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

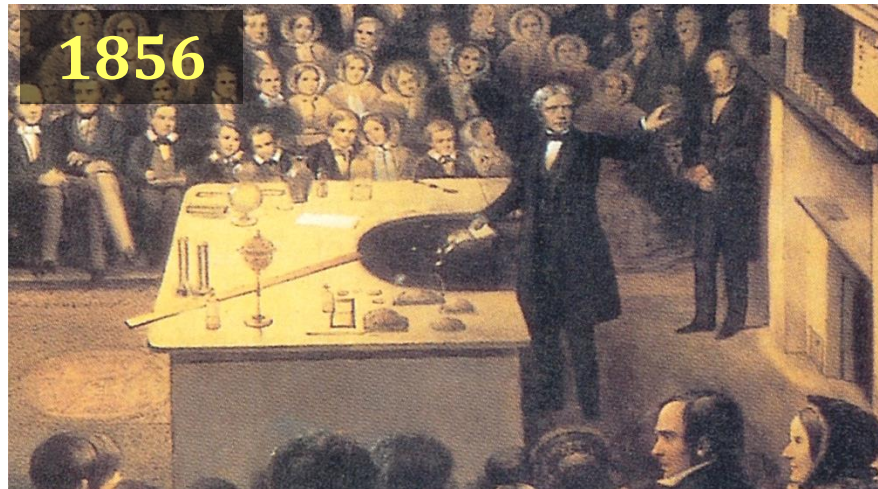


Michael Faraday



(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**



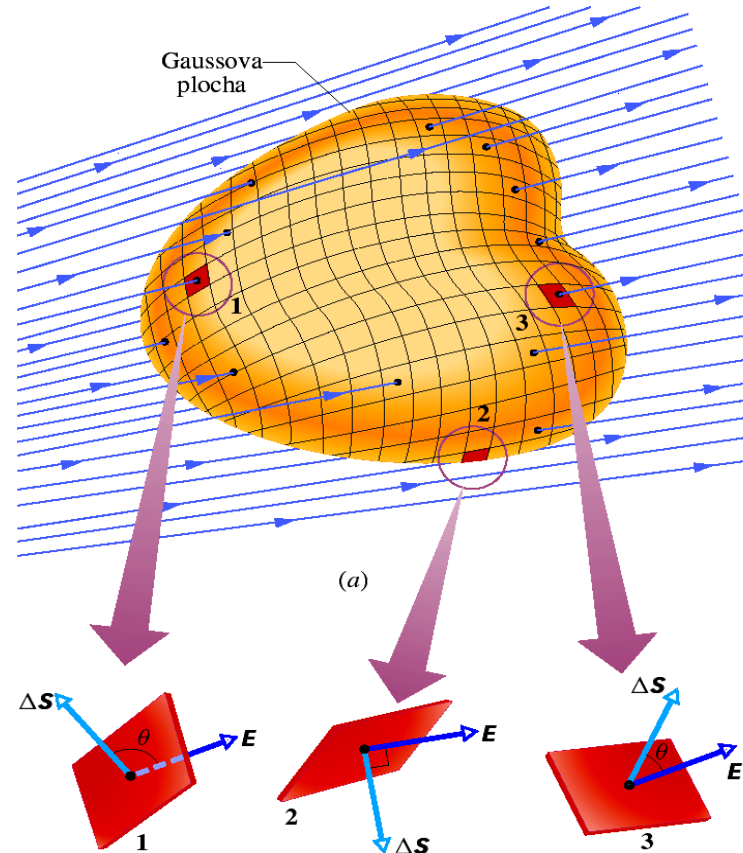
Carl Friedrich Gauss



(1777 – 1855)

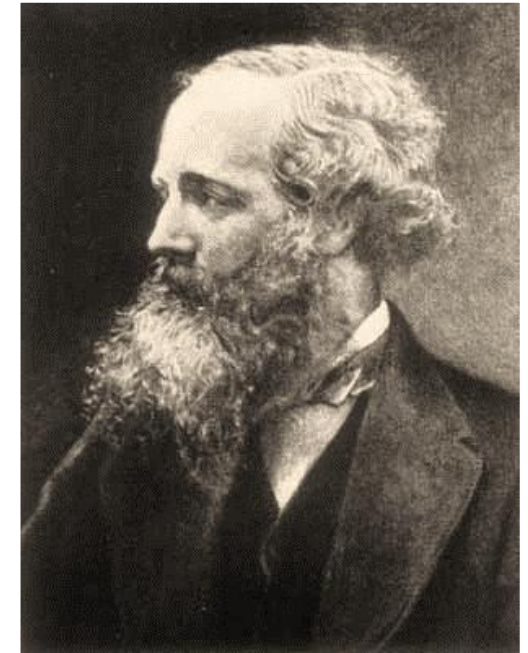
$$\epsilon_0 \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = Q \quad (\text{Gaussův zákon}).$$

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

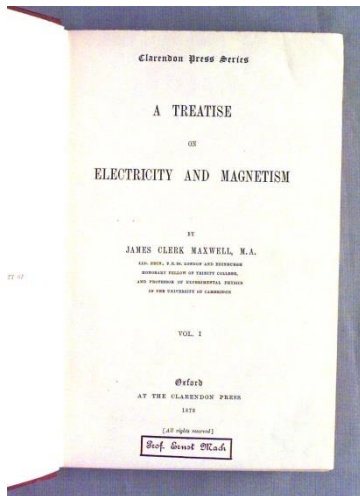


James Clerk Maxwell

- 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)



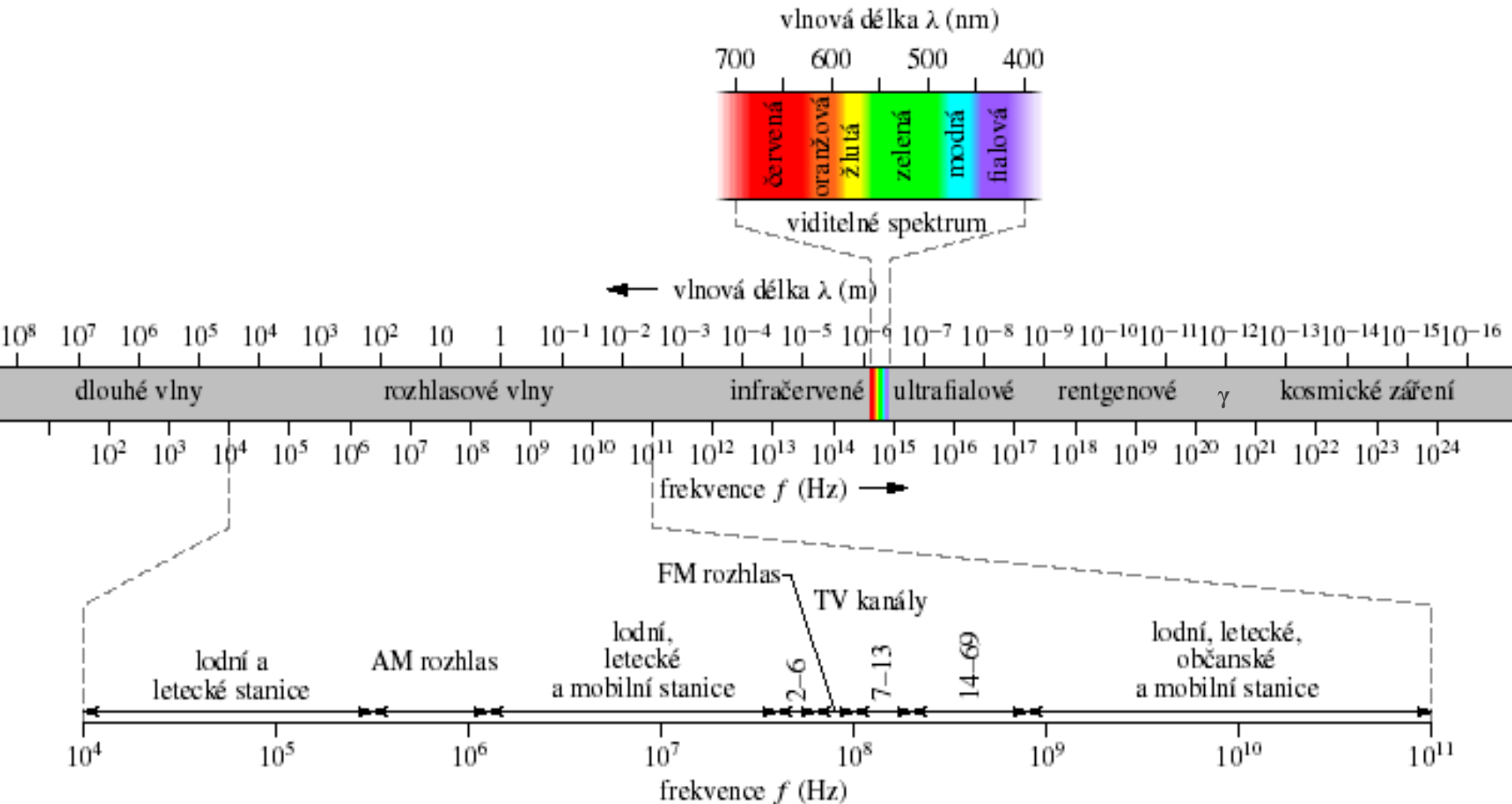
1865: „A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field“: rovnice pro 20 proměnných pole

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

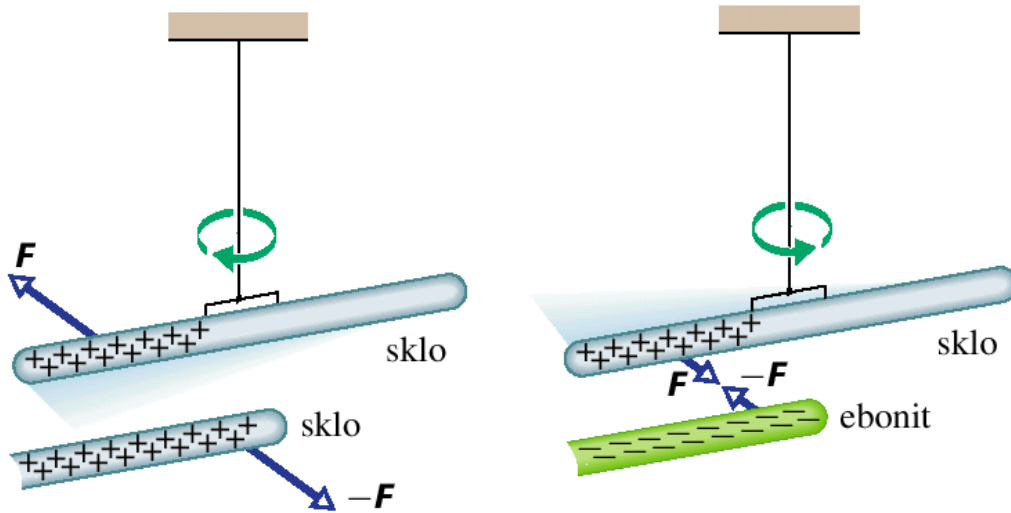
popisují celé spektrum elektromagnetických vln



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)

triboelektrické řady

Materiály jsou uváděny v pořadí polaroty přenosu náboje, když přijdou do kontaktu s jiným objektem. Čím větší je vzdálenost dvou materiálů v řadě, tím větší náboj mezi sebou vytvoří. Pokud se dva materiály nachází blízko sebe, předají si jen malý nebo žádný náboj.

s největším kladným nábojem

+

pokožka

sklo

vlasý

nylon

PMMA

vlna

hedvábí

papír

králičí kožešina

kočičí kožešina

0

0

jantar

polystyren

gumový balónek

tvrdá pryž

polyester

styren (Styrofoam)

potravinářská fólie

polyetylen

polypropylen

vinyl (PVC)

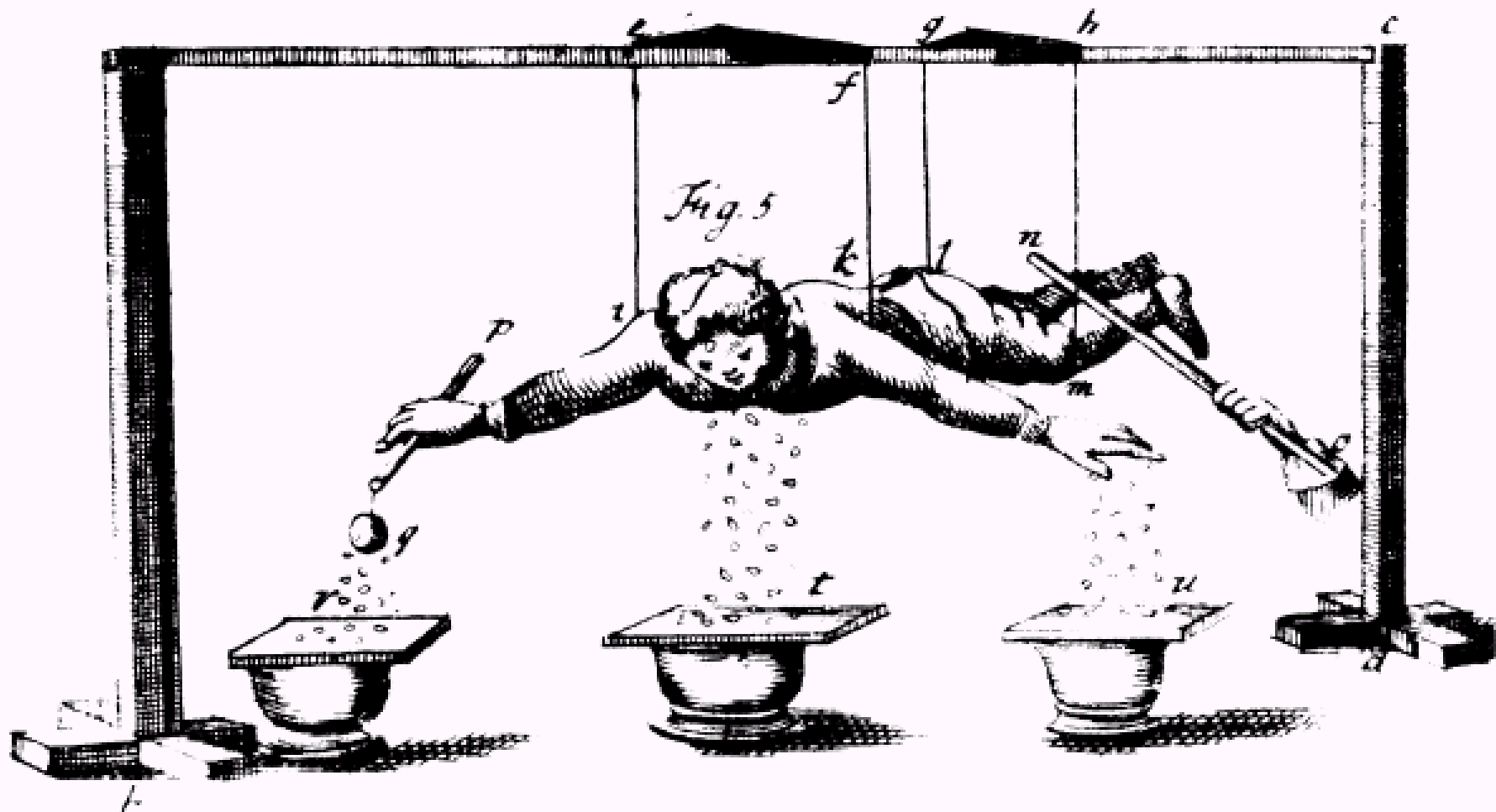
silikon

teflon

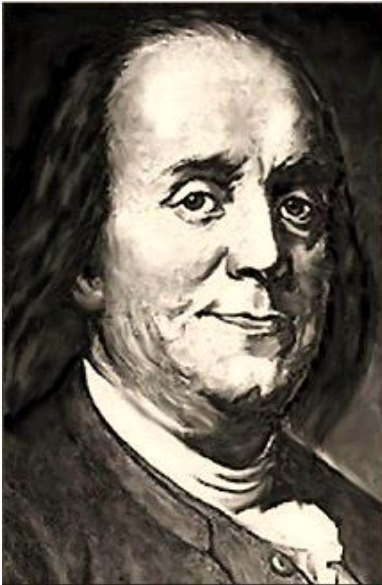
ebonit

-

s největším záporným nábojem



Benjamin Franklin



(1706 - 1790)

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



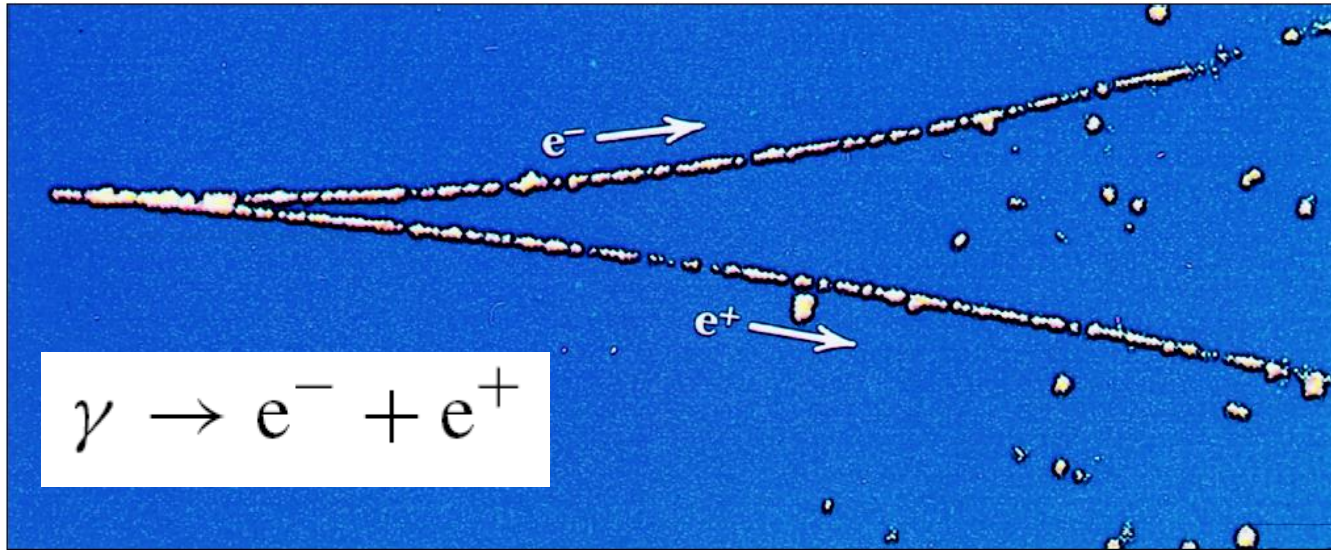
zákon zachování náboje

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** – velikosti náboje elektronu e .

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

elementární náboj:

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

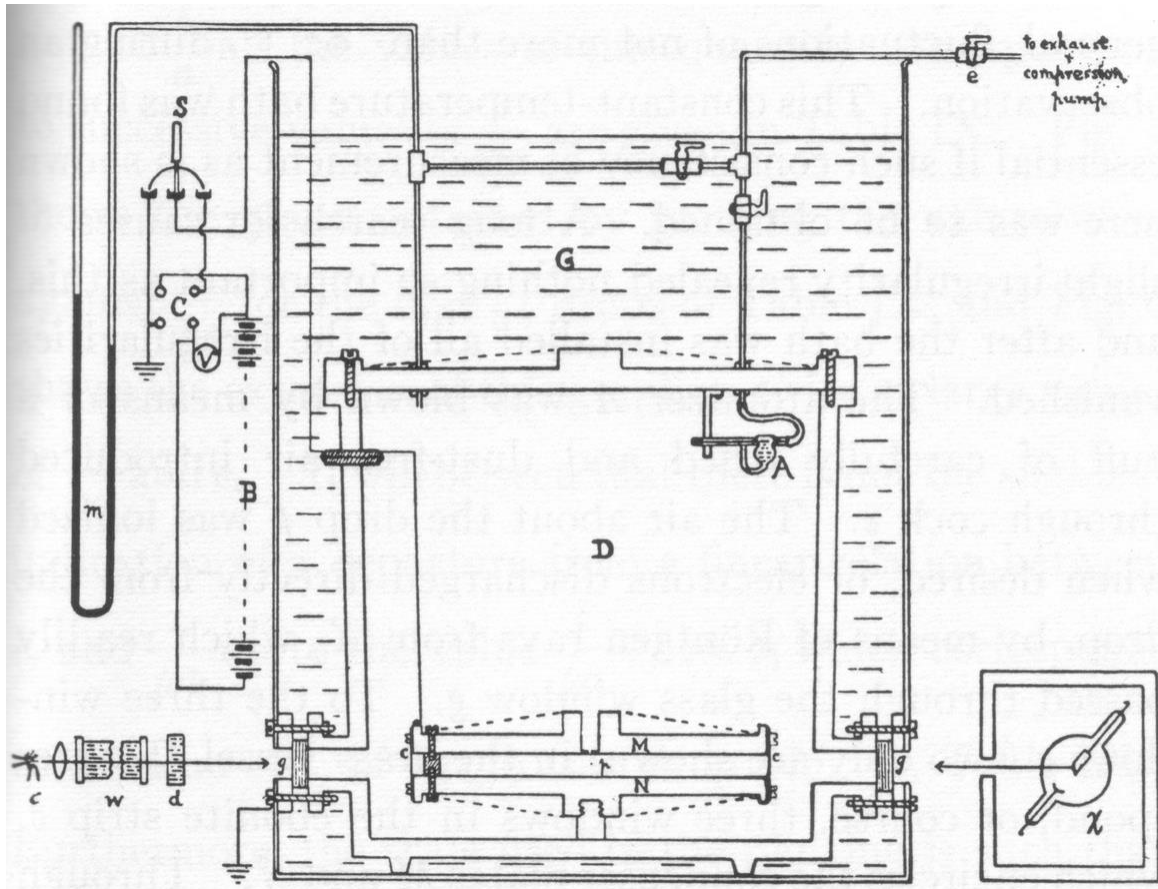
podle údajů The National Institute of Standards and Technology (NIST), 2010

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

v závorce směrodatná odchylka (68% interval spolehlivosti)

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

Milikanův experiment



The Electron: Its Isolation and Measurements and the Determination of Some of its Properties, Robert Andrews Millikan, 1917.

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

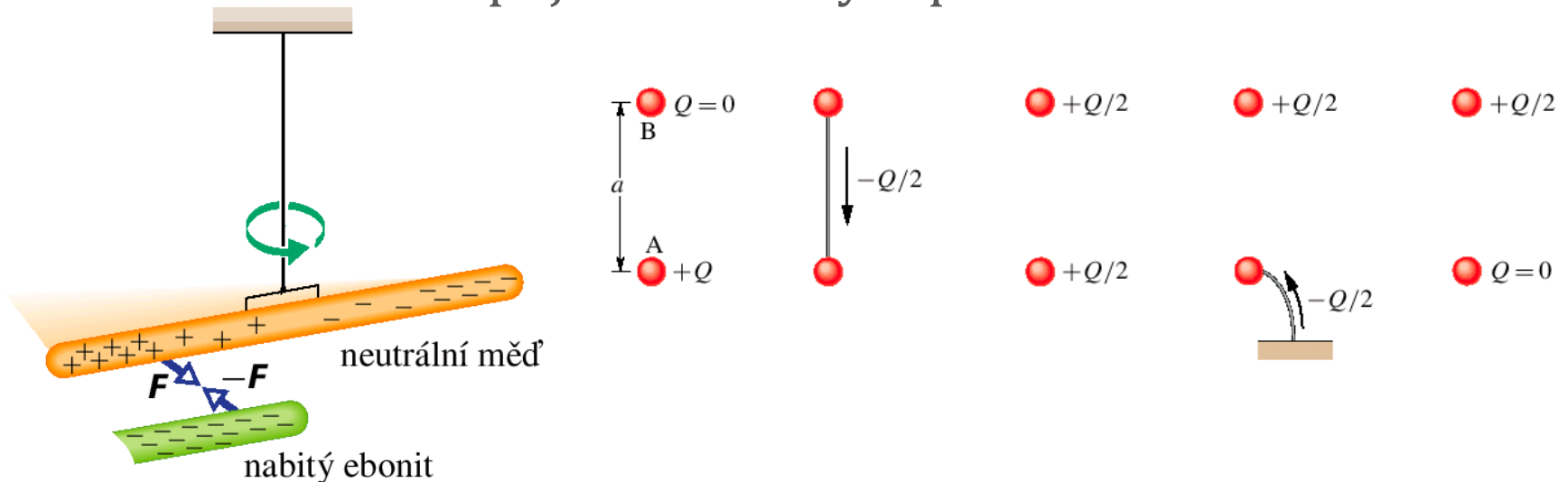
elektrický vodič/ nevodič (izolant): část náboje se může uvnitř materiálu téměř volně pohybovat/ podstatná část náboje se nemůže uvnitř materiálu pohybovat

elektrický proud: uspořádaný pohyb náboje

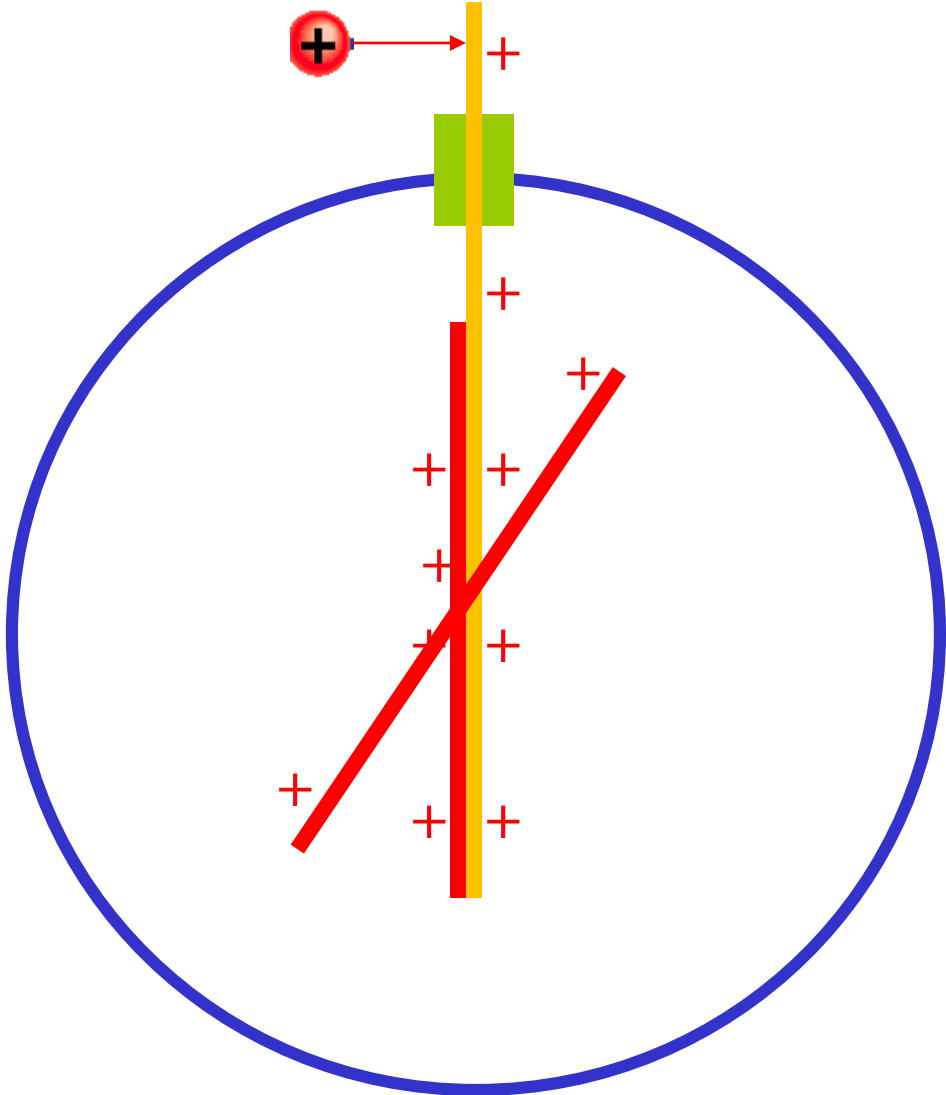
vybít: elektricky zneutralizovat

nabít: přivést/ odvést část náboje určitého znaménka

uzemnit: vodivě spojit se zemským povrchem



elektrometr

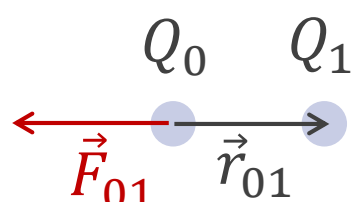


elektrostatická síla



Coulombův zákon

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

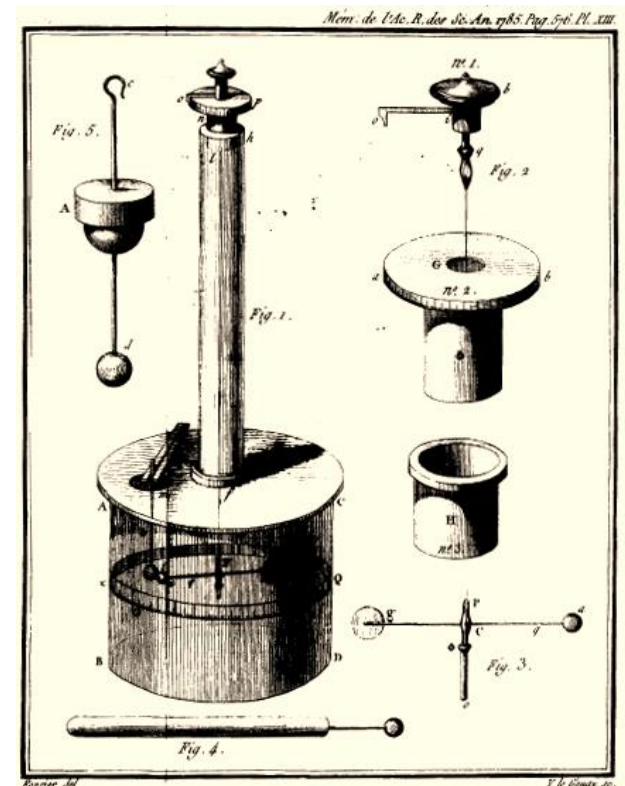

$$|\vec{F}_{01}| = k \frac{|Q_0 Q_1|}{r_{01}^2}$$
$$\vec{F}_{01} = k \frac{Q_0 Q_1}{r_{01}^3} (-\vec{r}_{01})$$

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

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

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

(permitivita vakua)



Coulombovy torzní váhy

příklad

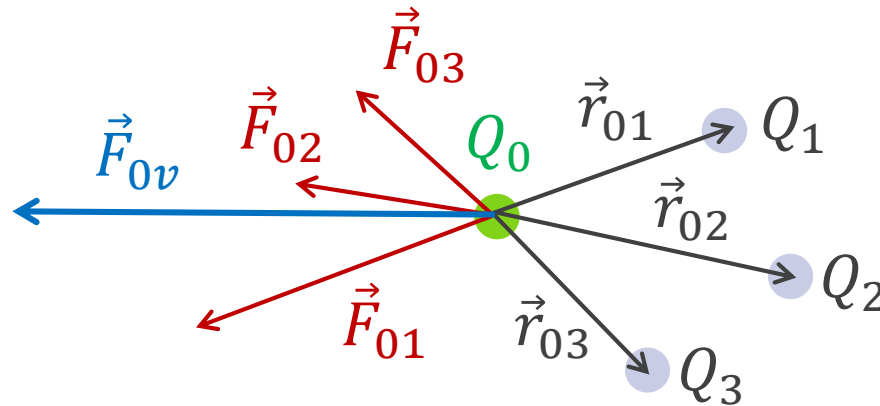
PŘÍKLAD 22.4

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?

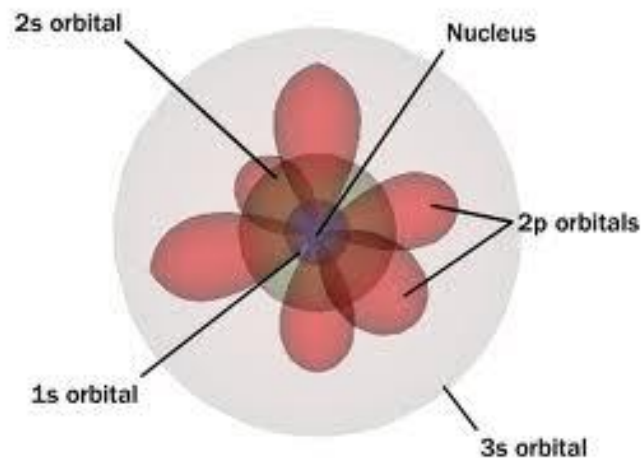
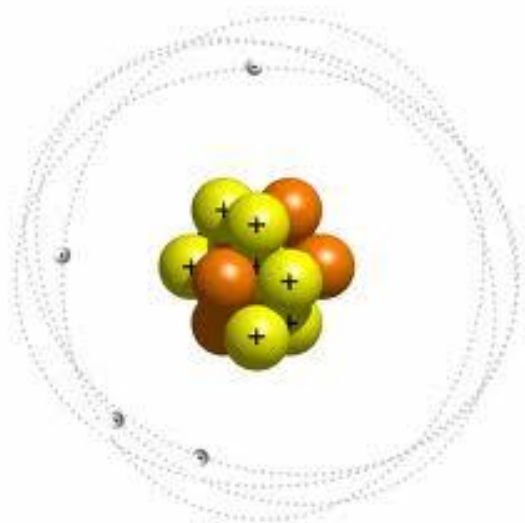
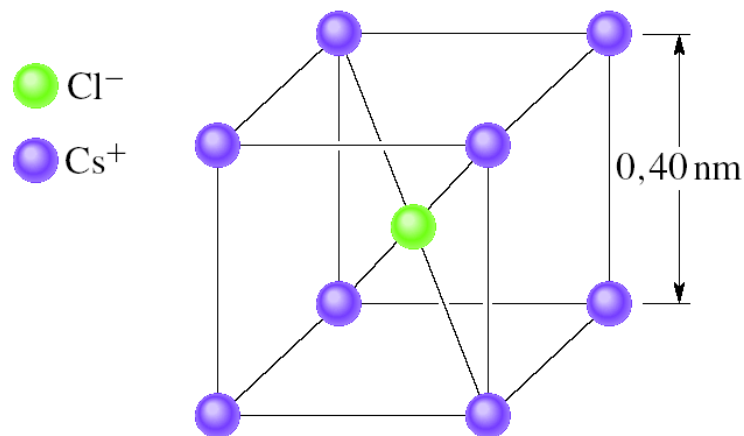
princip superpozice



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 (také) díky elektrostatické interakci...

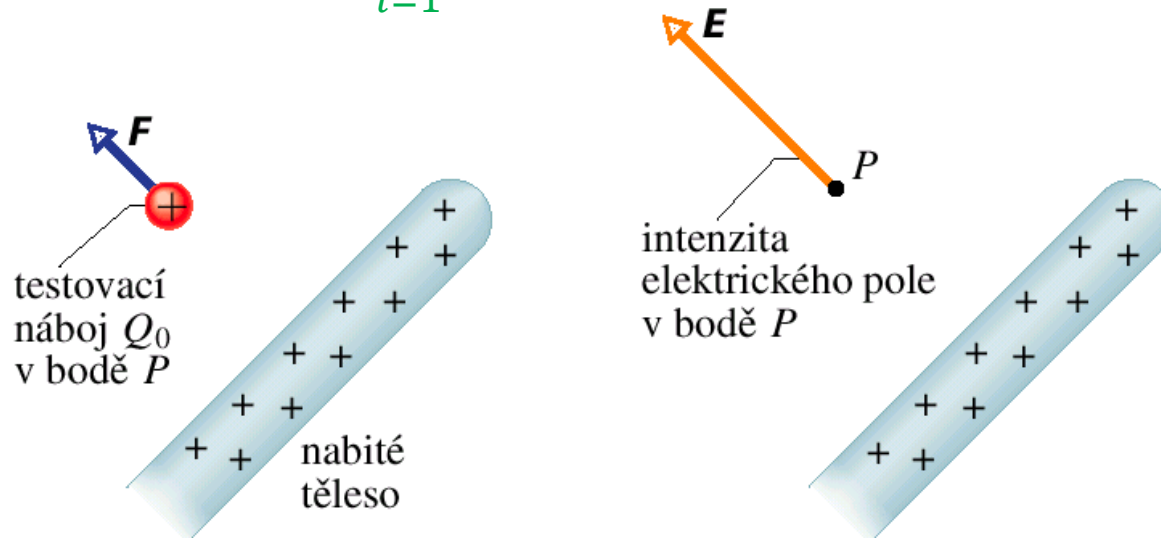


elektrické pole



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:

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

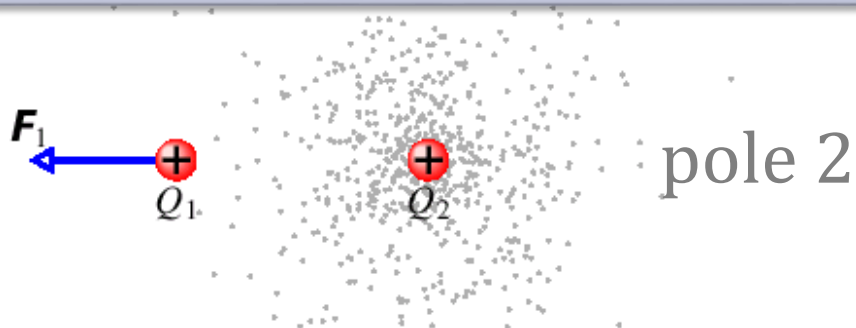
příklady elektrické intenzity

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 plastového 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)

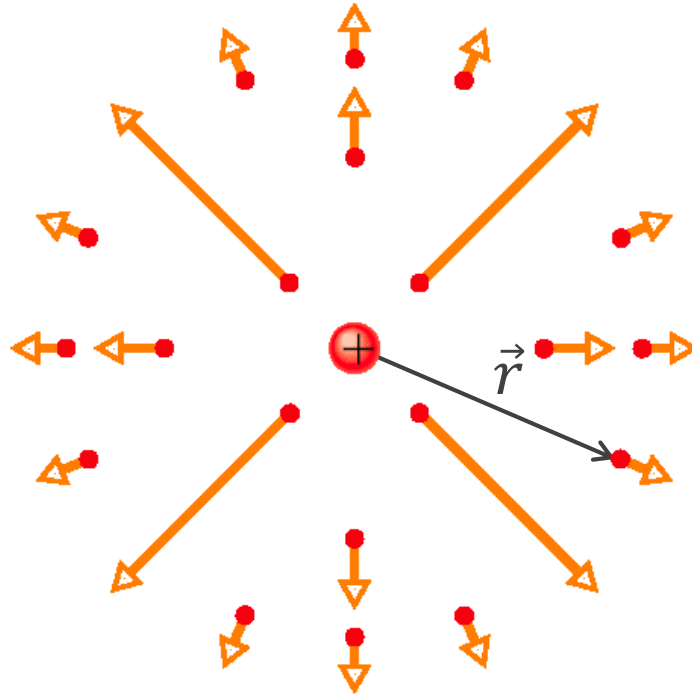


postup při výpočtu

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

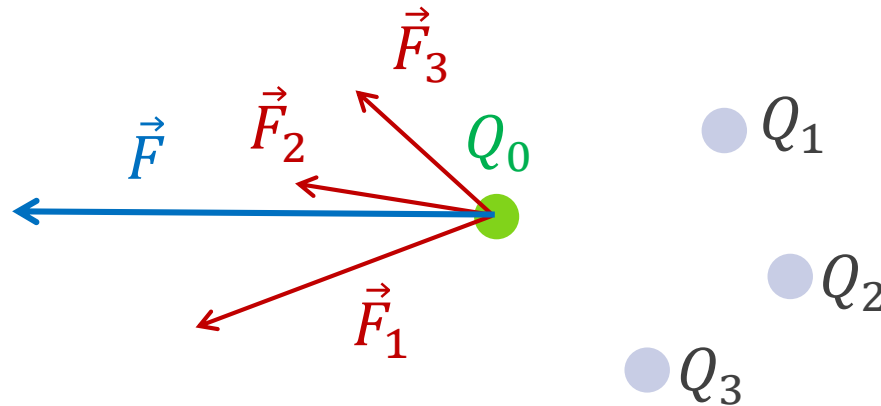


$$E = \frac{F}{Q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q|}{r^2}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^3} \vec{r}$$

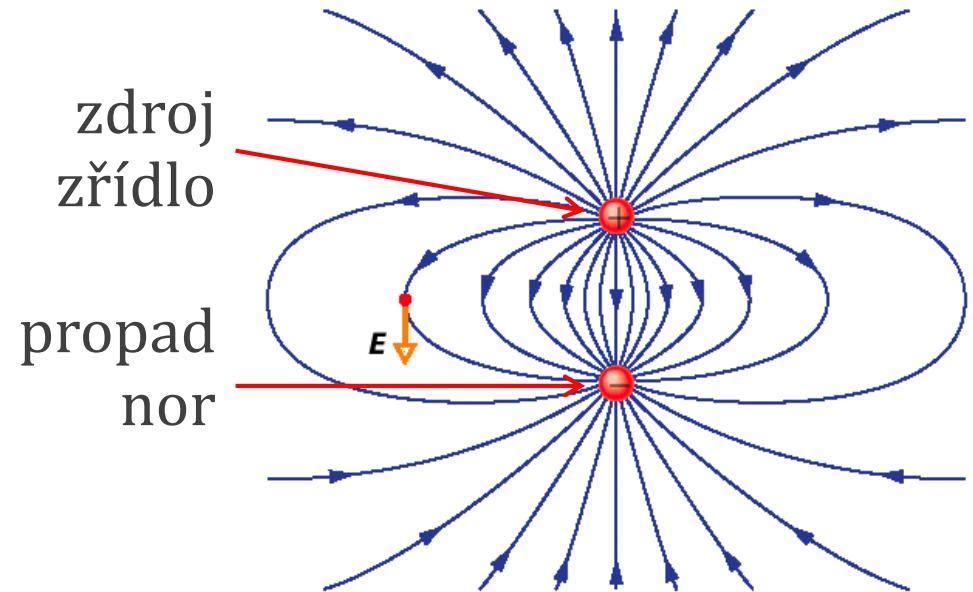
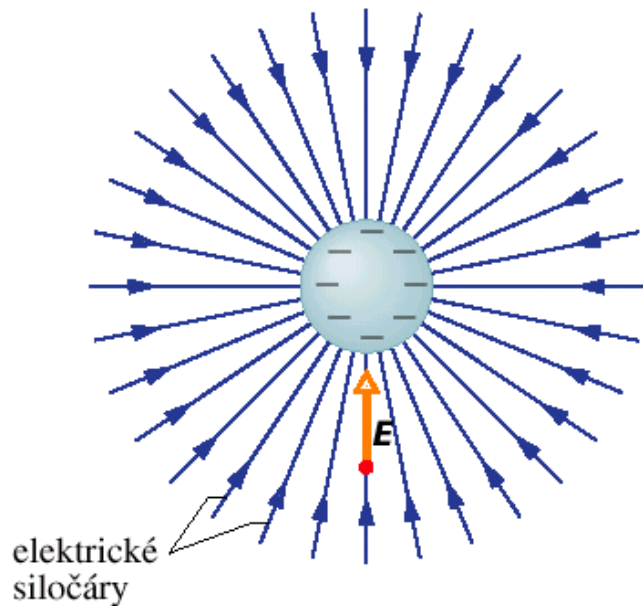
elektrické pole soustavy nábojů

princip
superpozice:



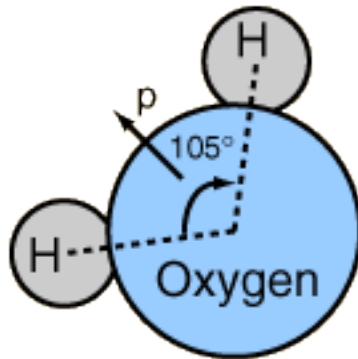
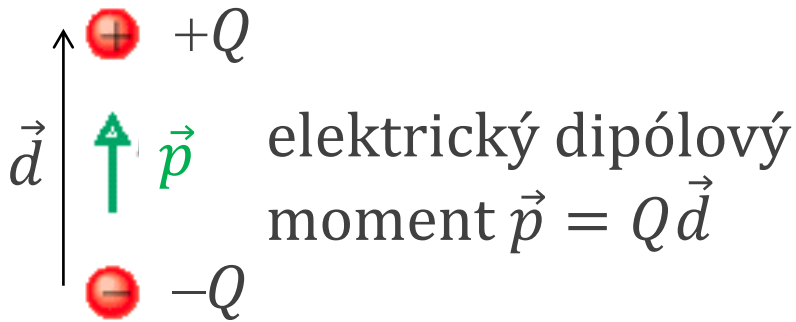
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0} = \sum_{i=1}^p \frac{\vec{F}_i}{Q_0} = \sum_{i=1}^p \vec{E}_i$$

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

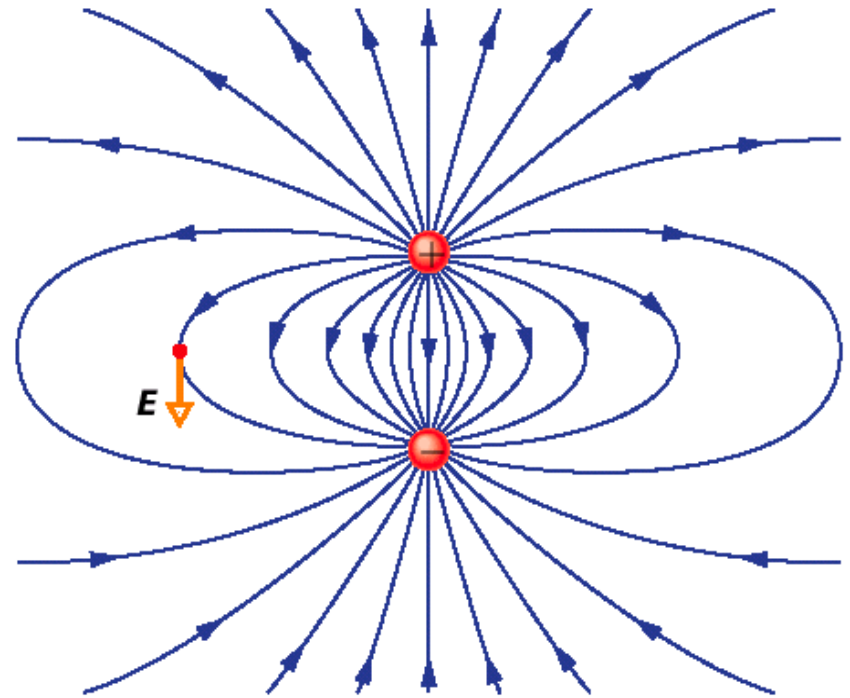


molekula vody:

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

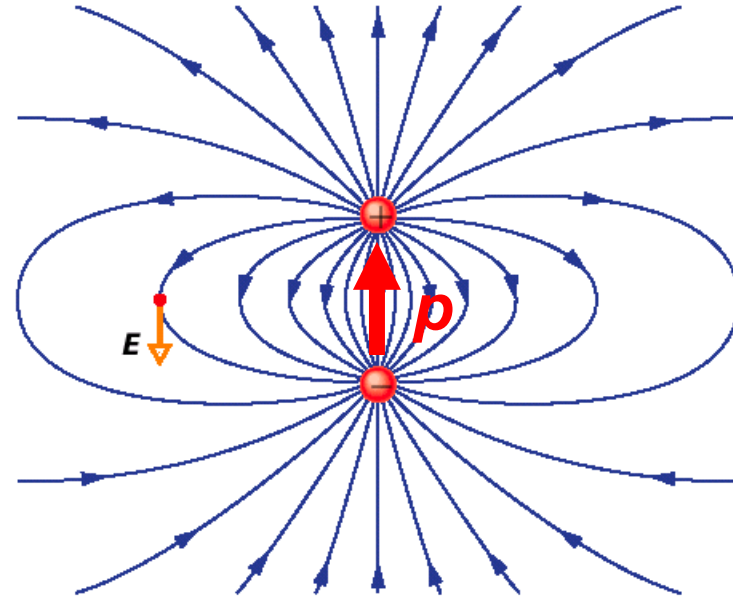
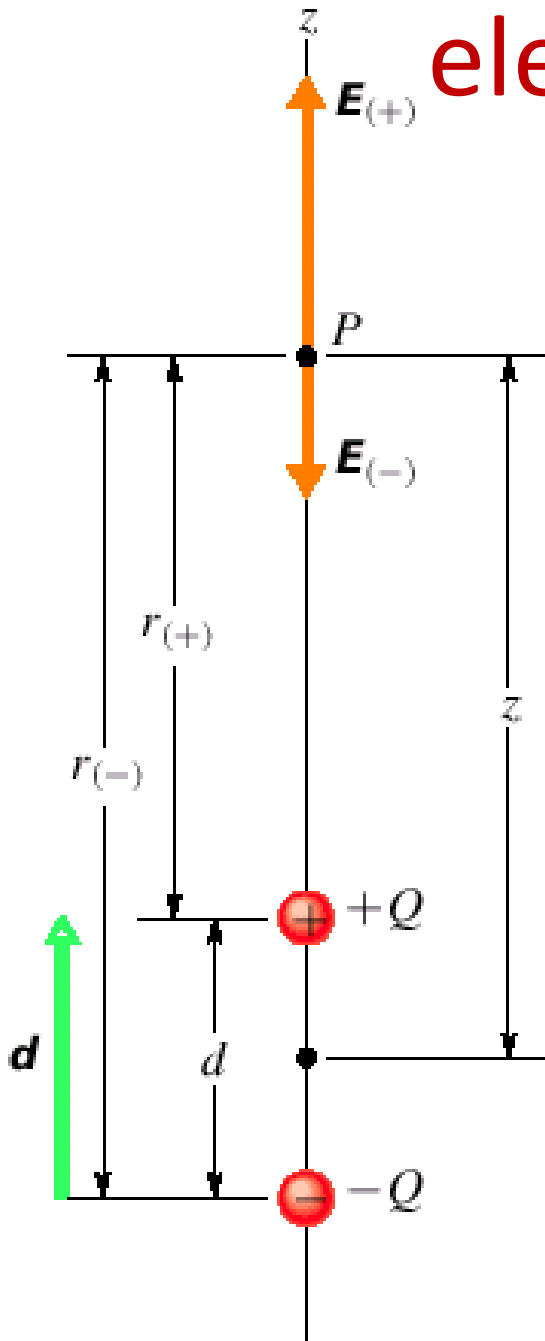
$$d = \frac{p}{10e} = 0,0039 \text{ nm} \text{ (efektivní separace)}$$

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



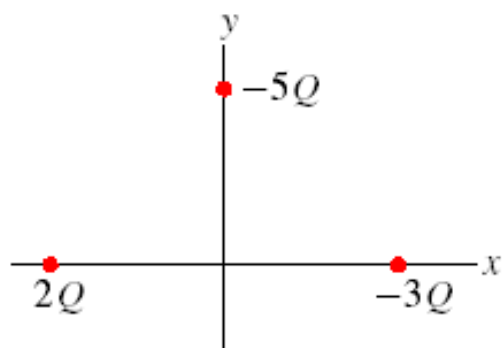
Používaná jednotka: 1 Debye
 $1 \text{ D} = 3,33564 \cdot 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$

elektrické pole dipólu

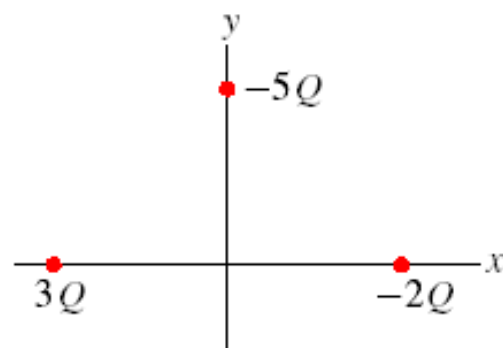


$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p}{z^3}$$

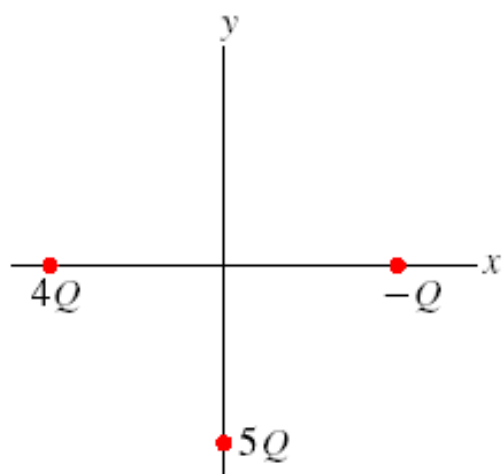
KONTROLA 2: Obrázek znázorňuje čtyři situace, v nichž jsou nabité částice ve stejné vzdálenosti od počátku. Seřadte tyto případy sestupně podle velikosti intenzity výsledného elektrického pole v počátku souřadnic.



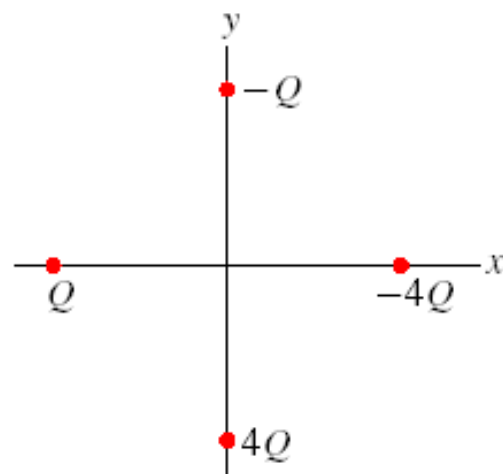
(a)



(b)

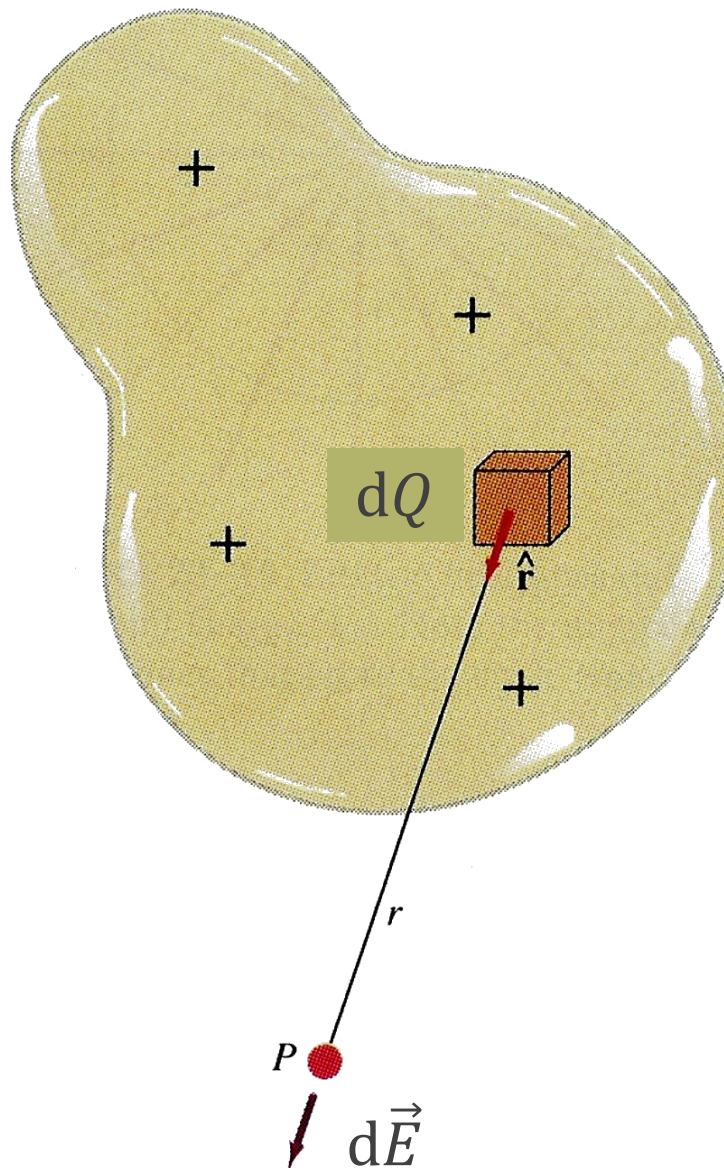


(c)



(d)

pole složitější soustavy nábojů



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

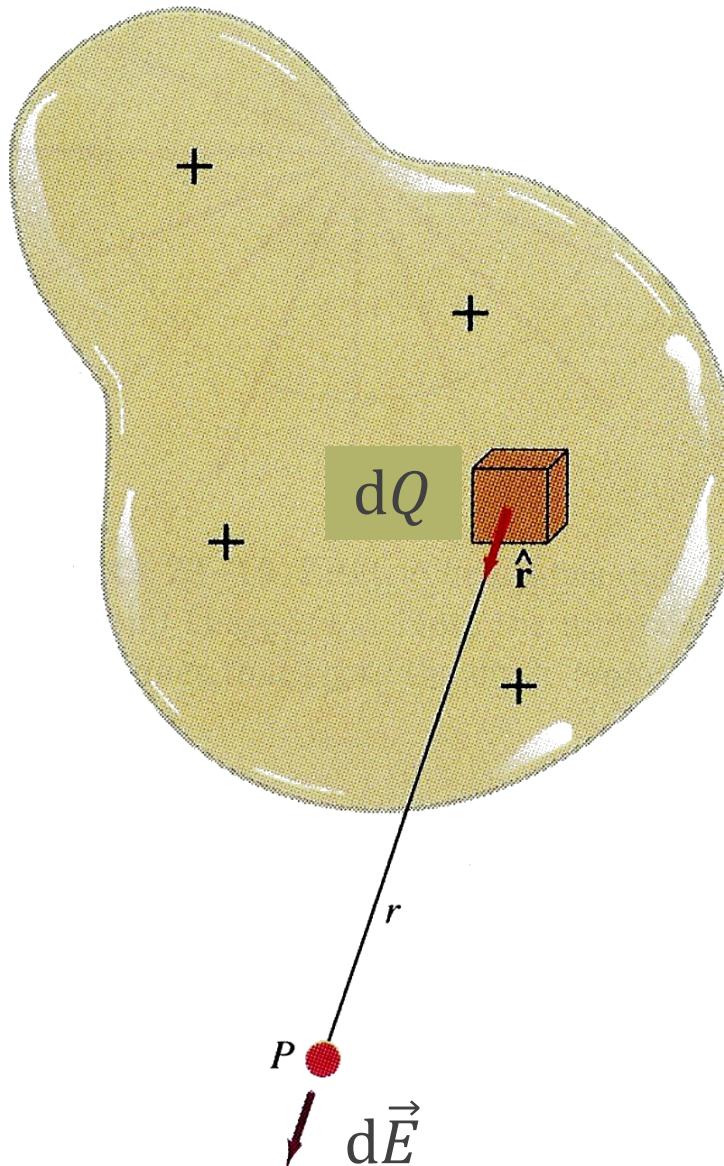
$$dE = k \frac{dQ}{r^2}$$

$$dQ = \rho dV \dots$$

Tabulka 23.2 Některé charakteristiky popisující rozložení elektrického náboje

NÁZEV	ZNAČKA	JEDNOTKA SI
Náboj	Q	C
Délková hustota náboje	τ	$C \cdot m^{-1}$
Plošná hustota náboje	σ	$C \cdot m^{-2}$
Objemová hustota náboje	ρ	$C \cdot m^{-3}$

postup výpočtu pro složitější soustavu



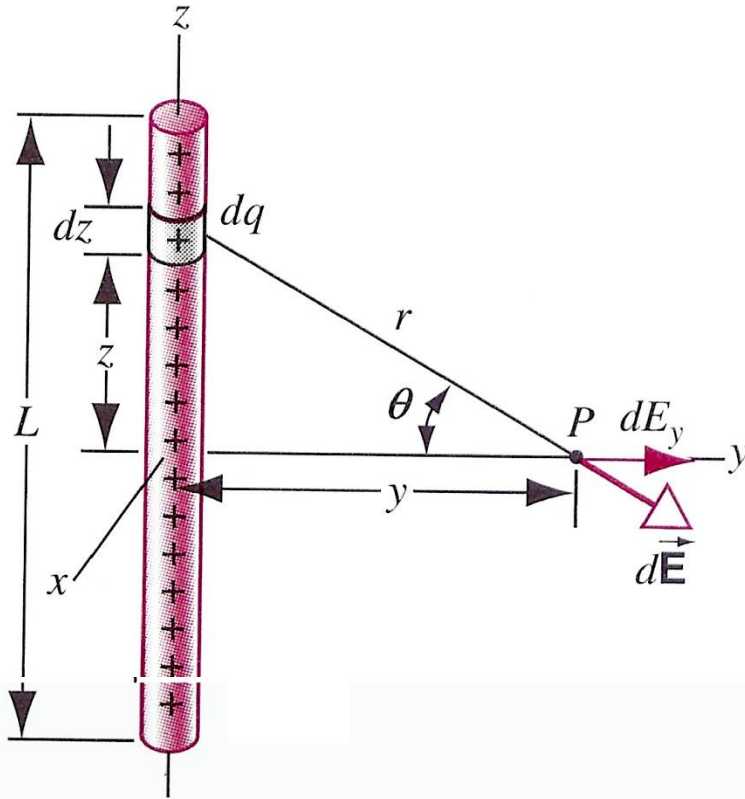
$$dE = k \frac{dQ}{r^2} \quad dQ = \rho dV \quad \dots$$

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

symetrie úlohy: možnost předem (bez výpočtu) vyloučit některé souřadnice

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

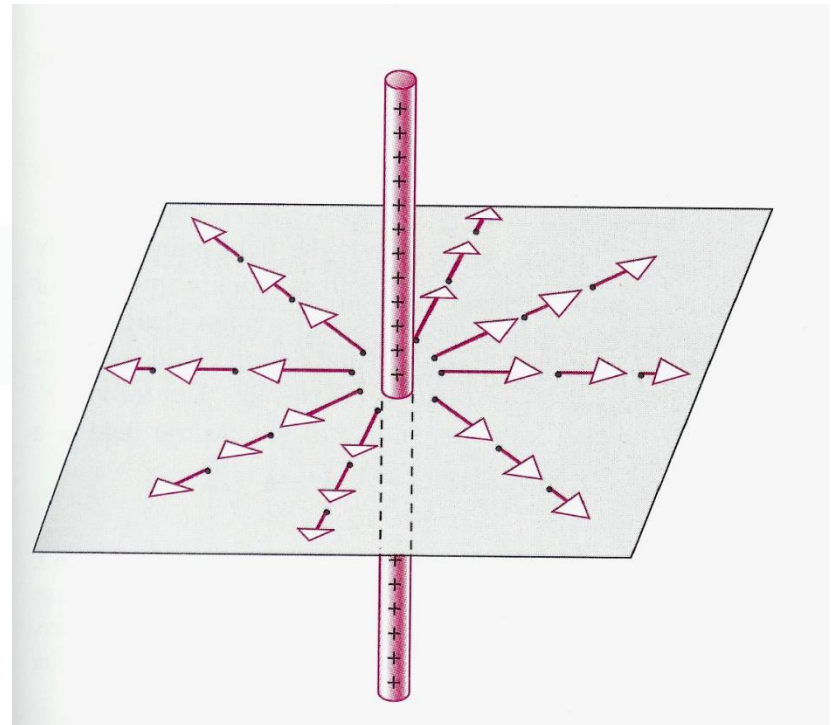
přímé nabité vlákno



$$E_{x,z} = 0$$
$$E_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\tau L}{y \sqrt{y^2 + L^2/4}}$$

přímé vlákno nekonečné
délky:

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 y}$$



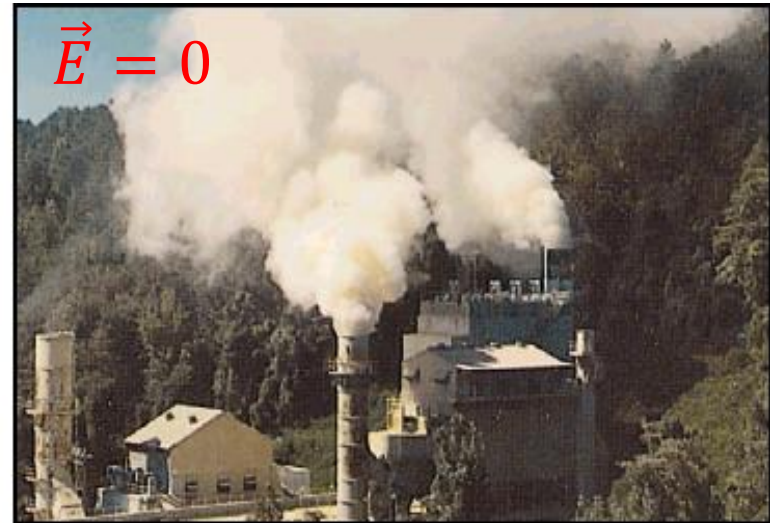
náboj v elektrickém poli



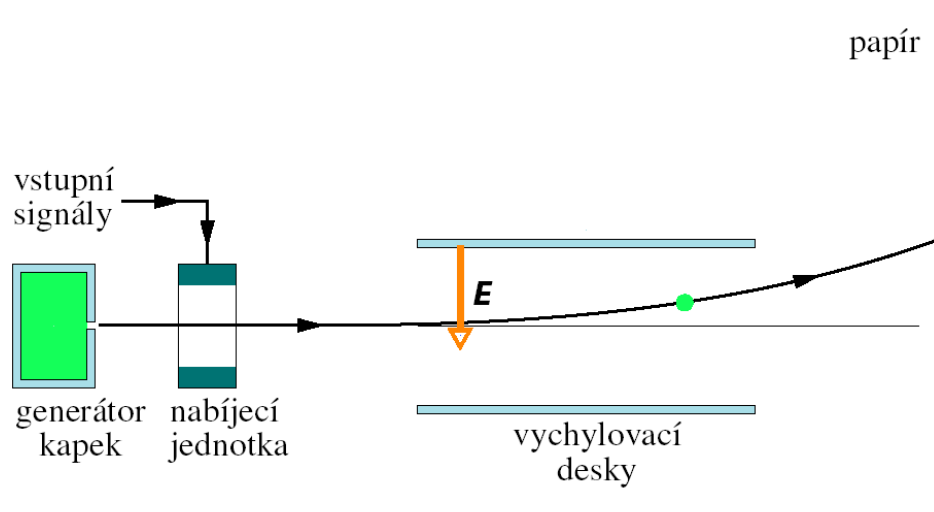
bodový náboj v elektrickém poli

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

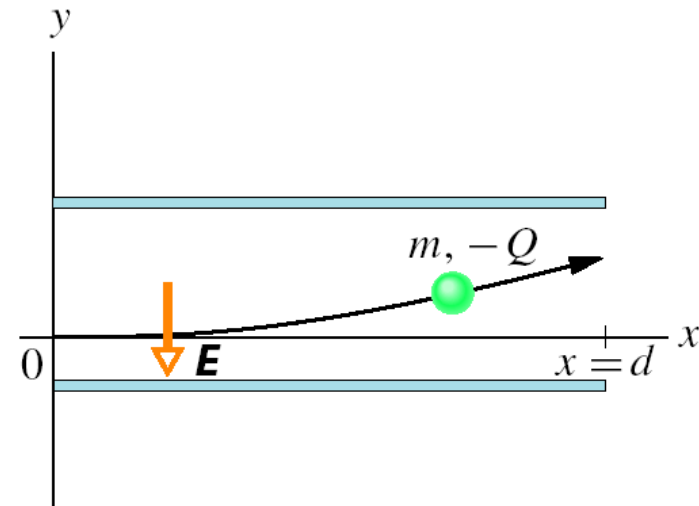
Na nabitou částici působí ve vnějším elektrickém poli \vec{E} elektrostatická síla \vec{F} . Má směr \vec{E} , pokud je náboj Q_0 kladný, opačný směr, je-li Q_0 záporný.



příklad

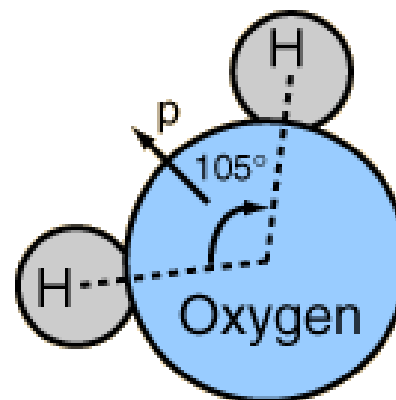
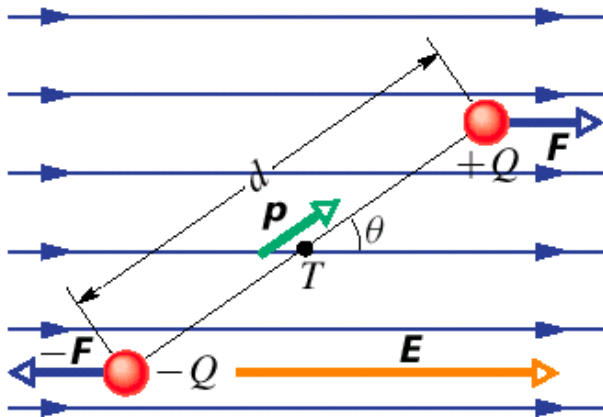


Obr. 23.15 Základní princip inkoustové tiskárny. Vstupním signálem z počítače určujeme náboj předávaný každé kapce a tím polohu na papíře, kam kapka dopadne. K vytvoření jednoho znaku je potřeba asi 100 drobných kapek.



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

