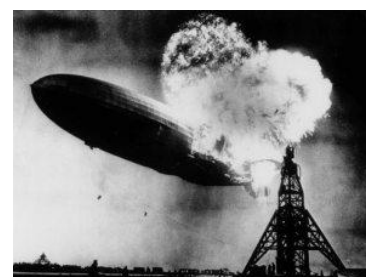


# 1 Elektrický náboj a jeho vlastnosti

## Historické poznámky

- starověké Řecko – jantar, který třeme, přitahuje stébla slámy; pozoroval **Thales Milétský** (mj. Thaletova věta)
- elektron = jantar (řecky), slovo elektřina je odvozené od jantaru
- oheň svatého Eliáše – akustický i optický jev způsobený vybitím statické elektřiny na hrotech, vrcholcích stromů, stožárů lodí, apod. Projevuje se modrým světélkováním objektu a může připravit cestu pro úder blesku.
- české země v 18. – 19. stol.: mluno a dralo
- zánik vzducholodi Hindenburg (1937): plněná  $H_2$ , statická elektřina způsobila jiskru a následný požár (z 97 osob na palubě při této katastrofě zahynulo 13 pasažérů a 22 členů posádky)

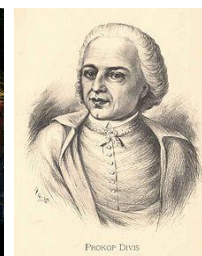


## Experimenty

- hřeben třený o vlasy odkloní paprvek vody
- skleněná tyč třená hedvábím se nabíjí **kladně**
- novodurová tyč třená kožesinou se nabíjí **záporně**

## Projevy elektrostatiky

- elektrostatika = náboj v klidu
- pozorujeme vzájemné přitahování a odpuzování předmětů
- existují 2 druhy el. náboje – kladný a záporný
- definoval **Benjamin Franklin (1706 – 1790)**, vynálezce bleskosvodu, zakladatel první americké univerzity a šachových kroužků, státník, diplomat
- **Václav Prokop Diviš (1698 – 1765)**, jako první vynalezl bleskosvod, kněz
- chůze po koberci – výboj po dotyku kliky
- auta – zemnicí pásek; letadla, helikoptéry – nutno po přistání uzemnit
- usazování prachu na monitorech nebo TV



**elektrický náboj –  $Q$**

jednotka: [ $Q$ ] = 1 C (coulomb)

**1 coulomb je náboj, který je přenesen proudem 1 A během 1 s**

$$Q = I \cdot t$$

Pojmenování jednotky dle **Charlese-Augustina de Coulomba (1736 – 1806)**.

- zakladatel elektrostatiky (Coulombův zákon);
- potomek zámožné šlechtické rodiny, 1800 povolán Napoleonem na Pařížskou univerzitu



### Měření el. náboje

- 1) **elektroskop** – pouze kvalitativně, nelze měřit typ náboje nebo jeho přesnou velikost
- 2) **elektrometr** – se stupnicí nebo digitální, lze určit velikost i typ náboje



**Dělitelnost el. náboje** – el. náboj lze dělit, přenášet z jednoho tělesa na druhé

### Rozdělení látek

- **vodiče**: náboj se přemísťuje snadno
- **izolanty**: špatný přenos náboje

Lidské tělo - vodič

### **Elementární elektrický náboj – $e$**

- nejmenší elektrický náboj, který nelze dále dělit
- kvarky (jejich náboje) ale počítají s hodnotami  $\frac{1}{3}e$

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

- **kvantování el. náboje** – může existovat náboj  $3e$ ,  $2e$  apod., ale nemůže existovat náboj  $3,75e$

### Částice v atomu

- 1) **elektron** – nese záporný náboj; objeven 1897, nachází se v atomovém obalu
- 2) **proton** – nese kladný náboj; 1836 krát těžší než elektron; objeven 1918, nachází se v jádře atomu
- 3) **neutron** – bez náboje; 1839 krát těžší než elektron; objeven 1932, nachází se v jádře atomu

**Těleso se jeví navenek jako elektricky neutrální.**

### **Zákon zachování el. náboje:**

**Celkový el. náboj izolované soustavy těles vzájemně elektrovaných těles zůstává konstantní.**

### **Velikost náboje 1 C**

Elektrostatická síla je vůči gravitační síle mezi 2 elektrony  $10^{21}$  krát větší.

1 coulomb je tedy velmi velký náboj.

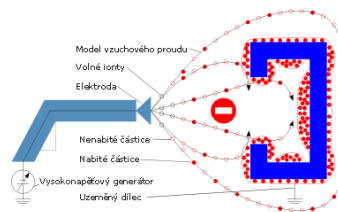
Zelektrovaná tělesa mají náboj řádově  $nC$ ,  $\mu C$

### **Jak zelektrovat těleso:**

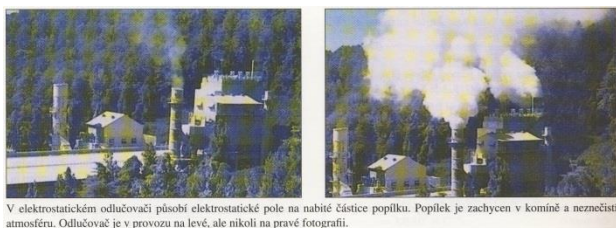
- třením
- zářením – Zn plech osvětlený UV světlem se nabije kladně (Einstein – fotoel.jev, Nobelova cena)
- zdrojem napětí – lze nabít např. kondenzátor
- srážky částic (polární záře)

**Elektrostatika v praxi:**

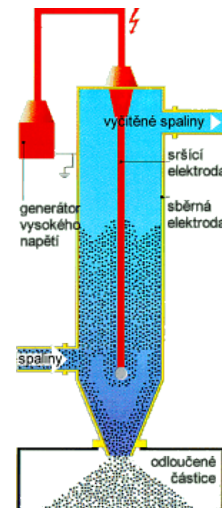
- elektrostatické nanášení barev



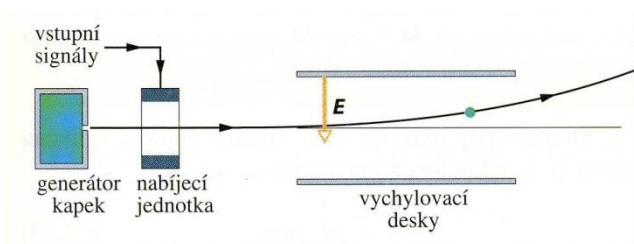
- odlučovače popílku v komínech



V elektrostatickém odlučovači působí elektrostatické pole na nabité částice popílku. Popílek je zachycen v komíně a neznečišťuje atmosféru. Odlučovač je v provozu na levé, ale nikoli na pravé fotografii.

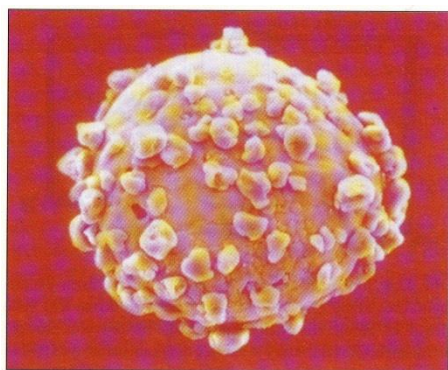


- inkoustové tiskárny

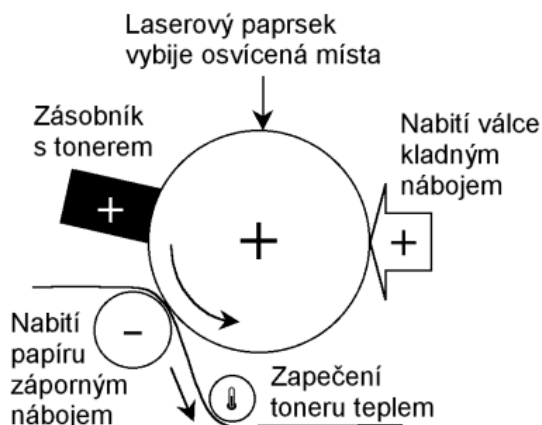


**Obr. 23.15** Základní princip inkoustové tiskárny. Vstupním signálem z počítače určujeme náboj předávaný každé kapce a tím polohu na papíře, kam kapka dopadne. K vytvoření jednoho znaku je potřeba asi 100 drobných kapek.

- kopírky, laserové tiskárny – nosné kuličky o průměru 0,3 mm se díky elektrostatickému přitahování pokryjí barvou v prášku (tonerem); UV světlo (kopírky) nebo laser (tiskárny) vybijí osvětlená místa, toner se zachytí pouze na nabitých oblastech papíru. Nakonec se prášek tepelně do papíru zapeče.



**Obr. 22.3** Nosná kulička v xeroxu. Je pokryta částicemi toneru, které k ní přilnou díky elektrostatickému přitahování. Průměr kuličky je asi 0,3 mm.



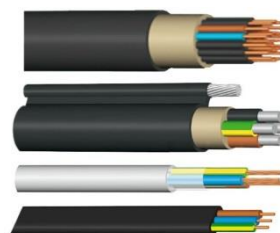
Xerografie – vytváření kopií elektrostatickým způsobem (xero = suchý, grafo = psaní), první kopie 1938.

Podrobnosti na: [http://www.techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74726f73746174696b61h&key=385](http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74726f73746174696b61h&key=385)

## 2 Vodiče a izolanty

**Vodič** – je látka, ve které se část náboje může pohybovat volně

- kovy
- pitná voda obsahující minerály
- biologické tkáně



**Elektronový plyn** – tvořen volnými elektrony, které se volně pohybují v kovech ⇒ příčina dobré vodivosti kovů

- pojem „plyn“ je pouze přenesený, ve skutečnosti se nejedná o plynné skupenství
- je to aproximace (přiblížení) pro popis chování volných elektronů v pevných látkách

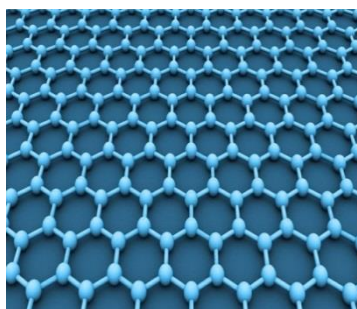
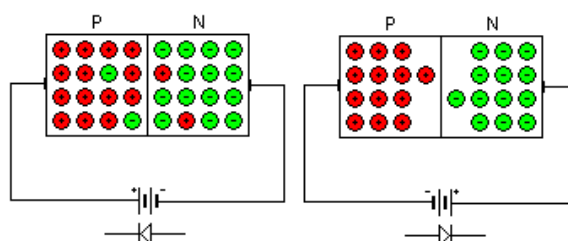
**Nevodiče, izolanty, dielektrika** – látky, ve kterých se volný náboj prakticky nemůže volně pohybovat

- sklo, porcelán
- destilovaná voda, vzduch
- umělé hmoty, guma



**Polovodič** – je látka, která za určitých okolností (zvýšená teplota) vede el. proud a jindy nevede

- křemík Si, germanium Ge, selen Se
- polovodiče typu P a N
- PN přechod základem elektronických součástek (dioda, tranzistor)
- moderní polovodiče využívají nanotechnologie (grafen – **André Geim (\*1958), Konstantin Novoselov (\*1974)**, NC v roce 2010)



Struktura grafenu



Pružný ohebný displej



A. Geim, K. Novoselov

**Supravodiče** – vodič, který má v ideálním případě nulový elektrický odpor ⇒ náboj (tj. el. proud) může probíhat dlouhodobě bez omezení

- keramické supravodiče
- supravodivost se projevuje při teplotách blízcích se 0 K (-273 °C)
- levitace magnetické kostičky v mag. poli supravodiče ⇒ vlak Maglev



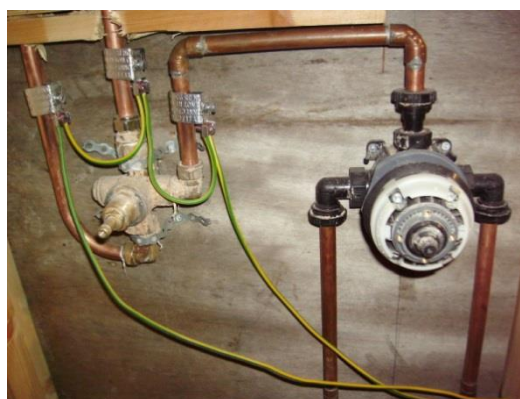
**Upořádaný pohyb (pohyb jedním směrem) kladného nebo záporného náboje v látce se navenek jeví jako elektrický proud.**

**Uzemnění předmětu** – znamená vytvořit vodivé spojení mezi předmětem a zemí ⇨ dojde k odvedení náboje z předmětu do země

- kovové konstrukce (schody)
- bleskosvody
- elektrické ohradníky pro dobytek
- kovové (měděné) vodovodní trubky, vany a vodovodní baterie v domácnosti

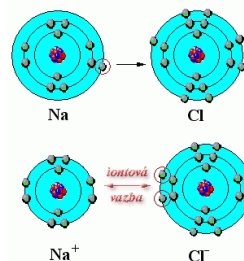


Symbol pro uzemnění a zemnicí vodič s typickým zeleno-žlutým zbarvením



### Kladné a záporné ionty

- kationt – kladný iont – vzniká odtržením elektronu z obalu
- aniont – záporný iont – vznikne přidáním elektronu do obalu
- iontová vazba v NaCl (kuchyňská sůl)
- ionty v minerálkách ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ )
- ionty v krvi (hypokalémie – snížení  $\text{K}^+$  v krvi: ovlivňuje tvar EKG křivky, projevy: zvracení, průjemy, poruchy rytmu srdce; hyperkalcémie – zvýšení  $\text{Ca}^{2+}$  v krvi: ovlivňuje tvar EKG křivky, projevy: zvracení, vředy, postižení ledvin, poruchy vědomí, osteoporóza)



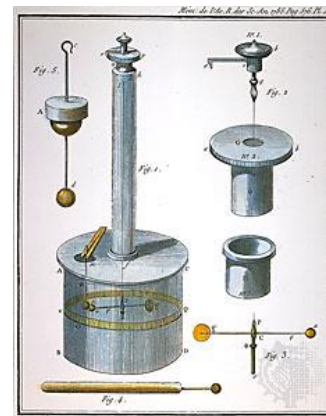
Chemický rozbor minerálnej vody

Kationy (v mg/l)	Názov minerálneho prameňa							
	Klára	Napoleon	Anna	Hlavny	Aľzbeta	Kolorádny	Lekársky	Herkules
Lítium $\text{Li}^+$	1,3	1,0	3,3	2,6	2,5	2,5	3,5	4,4
Sodík $\text{Na}^+$	262,0	726,5	843,7	843,7	965,6	805,0	1503,5	1975,0
Draslík $\text{K}^+$	20,0	42,5	49,2	52,5	50,0	50,0	79,2	91,7
Horčík $\text{Mg}^{2+}$	29,3	40,25	34,15	31,7	44,5	41,5	40,25	41,5
Vápnik $\text{Ca}^{2+}$	108,55	122,25	132,85	112,6	142,5	128,85	138,7	172,9
Železo $\text{Fe}^{2+}$	5,75	18,75	17,0	14,75	20,5	17,0	11,5	7,5
Zinok $\text{Zn}^{2+}$	-	-	-	-	0,04	-	-	0,07
Amiony						Jodidy J		0,59
Chloridy $\text{Cl}^-$	112,0	305,8	339,55	344,9	430,0	341,3	826,55	791,1
Hydrohličitaný $\text{HCO}_3^-$	971,8	2078,9	2337,25	2251,15	2621,5	2263,45	3702,7	4772,95
Fosforečatný $\text{FO}_4^{2-}$	0,6	0,29	0,29	0,29	0,4	0,29	0,2	1,0
Súčet pevných látok	1571,6	3374,2	3789,7	3707,4	4326,3	3677,9	6143,6	7688,4
Teplota vody v	16,5 °C	17 °C	19 °C	15 °C	16 °C	19 °C	18 °C	18 °C
pH (elektrometrický)	5,8	6,0	6,1	6,05	5,8	6,15	6,35	6,4
Kyslíčnik uhľičitý $\text{CO}_2$	2212,35	2162,8	2250,0	2487,4	2479,2	2320,0	2343,6	1666,6

### 3 Coulombův zákon

#### Charles-Augustin de Coulomb (1736 – 1806)

- převážně žil v Paříži
- zakladatel elektrostatiky
- zabýval se ale také smykovým třením
- stavěl pevnosti
- 1785 objev zákona pro dva bodové náboje v klidu
- po vypuknutí francouzské revoluce r. 1789 se ukldil na venkov

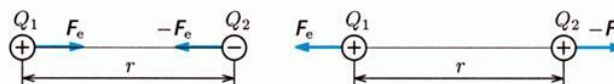


Bodový náboj – rozměry náboje (nabitých těles) zanedbatelné s jejich vzdáleností

**elektrostatická síla mezi bodovými náboji  $F_e$**

$$F_e = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

**Elektrostatická síla působící na 2 bodové náboje  $Q_1, Q_2$  je přímo úměrná součinu velikostí nábojů a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti  $r$ .**



**Pozn.** Srovnání s Newtonovým gravitačním zákonem (1687):

$$F_g = \kappa \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

**$k$  - elektrostatická konstanta**

- závisí na druhu prostředí mezi náboji

**ve vakuu:**

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,9876 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$$

**$\epsilon$  - permitivita prostředí**

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

**$\epsilon_0$  – permitivita vakua**

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$$

**$\epsilon_r$  – relativní permitivita (bezrozměrné číslo)**

- udává, kolikrát je slabší elektrická síla mezi náboji v daném prostředí oproti vakuu
- vakuum  $\epsilon_r = 1$ , vzduch  $\epsilon_r \cong 1$ , sklo  $\epsilon_r \cong 5 - 16$ , voda  $\epsilon_r = 81,6$

**Látkové prostředí – dielektrikum – zeslabuje elektrickou sílu mezi náboji.**

**Vztah k rychlosti světla**

$$\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \mu_0} = c^2$$

## 4 Elektrické pole a jeho intenzita



elektrické pole kolem „bodového náboje“

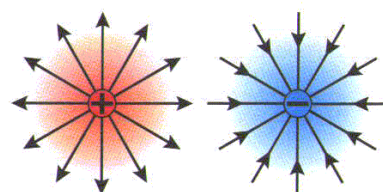


Kolem bodového náboje  $Q$  se vytváří tzv. **elektrické pole**.

Vzájemné působení mezi nabitými tělesy se realizuje prostřednictvím **elektromagnetické interakce**, která se ve vakuu **šíří rychlostí světla**  
 $c = 299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$

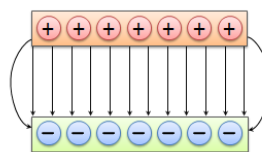
### Elektrické pole kolem bodového náboje:

- **radiální** el. pole
- u kladného náboje směřují siločáry VEN
- u záporného náboje směřují siločáry DOVNITŘ
- směr siločar určen dohodou
- intenzita se s rostoucí vzdáleností od náboje rychle zmenšuje

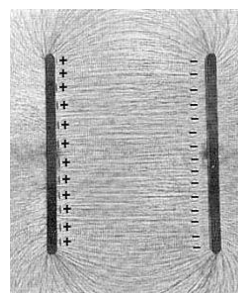


### Elektrické pole mezi dvěma rovnoběžnými deskami:

- **homogenní** el. pole
- siločáry jsou rovnoběžné (na koncích se začínají ohýbat)
- intenzita je konstantní



Grafické znázornění homogenního el. pole a reálná fotografie v olejové emulzi



**intenzita elektrického pole –  $E$**  jednotka:  $[E] = \text{NC}^{-1}$

- vektorová veličina (kromě velikosti je důležitý i směr)

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q}$$

$F_e$  – elektrická síla,  $q$  – náboj

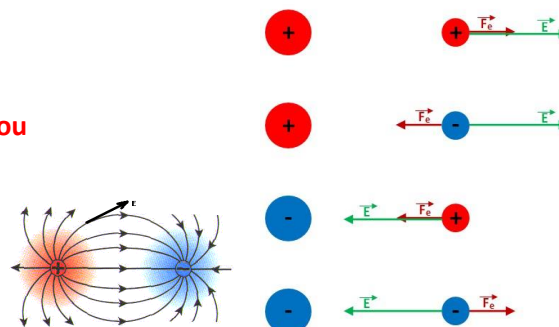
**intenzita elektrického pole kolem bodového náboje  $Q$**

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

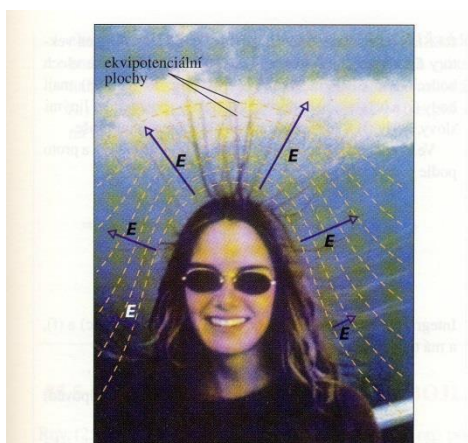
$r$  – vzdálenost od náboje  $Q$

Intenzita kolem bodového náboje  $Q$  klesá s druhou mocninou vzdálenosti  $r$  od náboje.

Výsledná intenzita v daném bodě má směr tečny k siločáře.



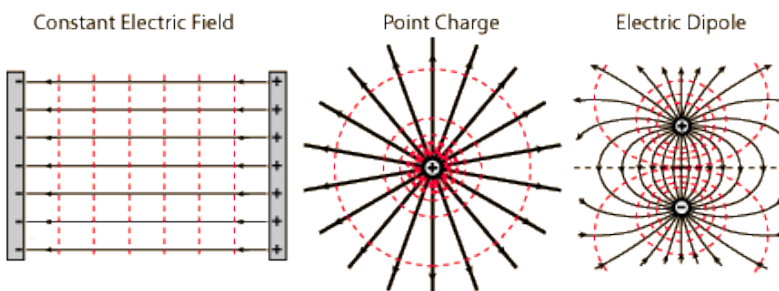
**Př. směr intenzity el. pole u osoby za bouřky s vyznačenými ekvipotenciálními plochami**



Obr. 25.4 Schématem doplněná fotografie z úvodní strany této kapitoly ukazuje důsledek působení nabitého mraku, který vytvořil silné elektrické pole o intenzitě  $E$  blízko hlavy ženy. Mnohé prameny jejích vlasů se natáhly podél směru elektrického pole, které je vždy kolmé k ekvipotenciálním plochám a silnější je tam, kde jsou tyto ekvipotenciální plochy těsněji u sebe, tj. v tomto případě nad temenem hlavy ženy.

**Ekvipotenciální plochy** – místa se stejnou hodnotou intenzity elektrického pole v prostoru (obdoba vrstevnic v zeměpise).

Intenzita el. pole je vždy kolmá na ekvipotenciální plochy.



Dashed lines are equipotential lines while solid lines are electric field lines. Click on one of the diagrams for further detail.

**Orientační hodnoty intenzit elektrických polí:**

Elektrické pole	Velikost intenzity ( $N C^{-2}$ )
Na povrchu jádra uranu	$3 \cdot 10^{22}$
Uvnitř atomu vodíku	$5 \cdot 10^{11}$
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	$10^{-2}$

**Pozn.**

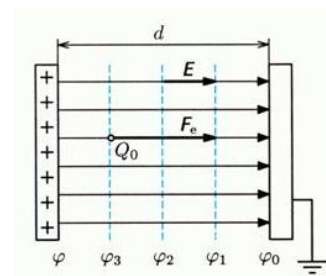
Pojem elektrické pole zavedl **Michael Faraday (1791 – 1867)**.

- 1831 objevil magnetické a elektrické siločáry
- vymyslel pojmy jako anoda, katoda, elektroda, iont
- vše popisoval slovně, nepoužil (nevymyslel) jediný vzorec
- položil teoretický základ pro elektromotory, dynamo a výrobu elektrické energie jinou než chemickou cestou
- na základě jeho prací pak **J. C. Maxwell (1831 – 1879)** formuloval v roce 1865 rovnice elektromagnetického pole



## 5 Práce v elektrickém homogenním poli. Elektrické napětí.

- předpokládáme homogenní el. pole
- na částici s nábojem působí elektrická síla  $F_e$ , která koná práci
- práci obecně spočítáme jako  $W = F \cdot s$
- v tomto vzorci nahradíme obecnou sílu silou elektrickou a dráhu  $s$  vzdáleností desek  $d$



**elektrická práce v homogenním el. poli -  $W$**

**jednotka:  $[W] = 1 \text{ J (joule)}$**

$$W = F_e \cdot d = Q \cdot E \cdot d$$

$Q$  – přenášený náboj

$E$  – intenzita elektrického pole mezi deskami

$d$  – vzdálenost rovnoběžných desek

**Práce vykonaná elektrickým homogenním polem při přesunu náboje  $Q$  z bodu A do bodu B je NEZÁVISLÁ na typu trajektorie, po které se náboj pohybuje.**

**elektrické napětí mezi dvěma body A, B –  $U$**

**jednotka  $[U] = 1 \text{ V (volt)}$**

- je definováno jako podíl elektrické práce (vykonané elektrickou silou při přemístění bodového náboje  $Q$  z bodu A do bodu B) a velikosti tohoto náboje  $Q$

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q} = E \cdot d$$

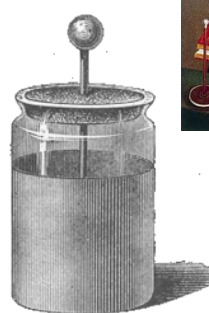
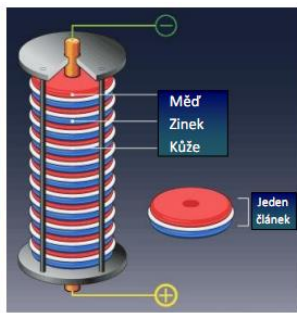
**intenzita elektrického pole –  $E$**

**jednotka  $[E] = \text{Vm}^{-1}$  (volt na metr)**

$$E = \frac{U}{d}$$

**Pozn.** Jednotka volt je pojmenována na počest italského fyzika **Alessandra Volty (1745 – 1827)**.

- vynalezl např. třecí elektřinu, Voltův elektrický článek (Voltův sloup)
- znovuvynalezl a zdokonalil kondenzátor
- byl ze 7 dětí a do 7 let nemluvil
- sestavil elektrochemickou řadu kovů



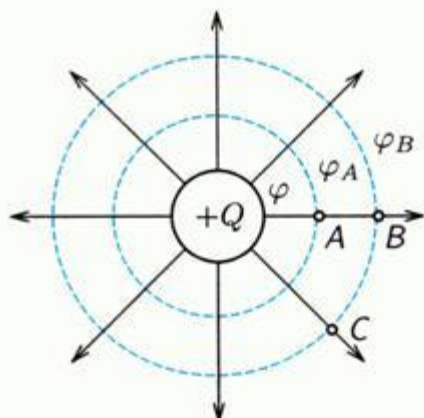
Třecí elektřina – elektrostatický generátor vysokého napětí řádově  $10^3 \text{ V}$

Voltův sloup – fotografie a schéma složení

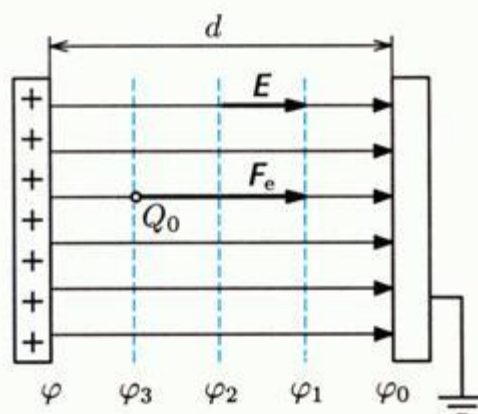
Leydenská láhev – prvotní kondenzátor – zařízení k uchování el. náboje

## 6 Elektrický potenciál

Př. ekvipotenciální hladiny a elektrický potenciál  $\varphi$  v případě bodového náboje a homogenního el. pole



5-9 Ekvipotenciální plochy radiálního elektrického pole



5-10 Ekvipotenciální plochy homogenního elektrického pole

- $\varphi_1, \varphi_2, \dots$  ekvipotenciální hladiny – místa se stejnou hodnotou potenciální energie, resp. se stejnou hodnotou intenzity el. pole
- zemský povrch má nulovou hladinu potenciální energie, tj. nulový potenciál
- mezi dvěma body A, B lze elektrickou práci definovat jako rozdíl potenciálních energií:  
 $W_e = E_{pA} - E_{pB}$ . Současně platí z minulé kapitoly, že  $W_e = Q \cdot U_{AB}$
- porovnáním obou výrazů lze vyjádřit vztah pro napětí  $U_{AB} = \frac{E_{pA} - E_{pB}}{Q} = \frac{E_{pA}}{Q} - \frac{E_{pB}}{Q} = \varphi_1 - \varphi_2$

### elektrický potenciál – $\varphi$

jednotka:  $[\varphi] = \text{J C}^{-1} = \text{V}$  (volt)

- skalární veličina
- představuje velikost potenciální energie vztahované na jednotkový náboj
- základní charakteristika elektrického pole

$$\varphi = \frac{E_p}{q}$$

### elektrické napětí – $U$

$$U = \varphi_A - \varphi_B$$

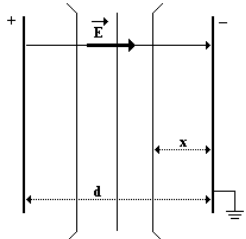
**Elektrické napětí mezi dvěma body je dáno jako rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito body.**

- na povrchu vodiče je všude stejné napětí, protože je všude stejný potenciál
- elektrochemický článek – 2 různé kovy oddělené vodivou vrstvou: každý kov má svůj elektrochemický potenciál, rozdíl těchto potenciálů pak dává napětí tohoto článku. Např. Cu-Zn článek má  $\varphi_{Cu} = 0,159 \text{ V}$ ,  $\varphi_{Zn} = -0,7618 \text{ V}$ , takže  $U = 0,159 - (-0,7618) = 0,92 \text{ V}$

Elektrochemická řada kovů (Becketova, nejznámější prvky)

Kov	Li	K	Ca	Na	Al	Zn	Cr	Fe	Ni	Sn	Pb	H	Cu	Ag	Hg	Pt	Au
$\varphi$ (V)	-3,04	-2,93	-2,87	-2,71	-1,66	-0,76	-0,74	-0,44	-0,25	-0,13	-0,13	0	0,16	0,79	0,8	1,19	1,52

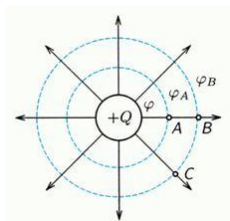
### elektrický potenciál homogenního el. pole



- mezi dvěma rovnoběžnými deskami vzdálenými  $d$  metrů je napětí  $U$
- v libovolném bodě vzdáleném  $x$  metrů od uzemněné desky (nulový potenciál) naměříme el. potenciál  $\varphi$
- intenzita el. pole je všude stejná  $\Rightarrow$  poměr daného potenciálu a celkového napětí musí být stejný jako poměr vzdáleností  $x$  a  $d$

$$\varphi = U \cdot \frac{x}{d}$$

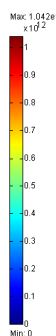
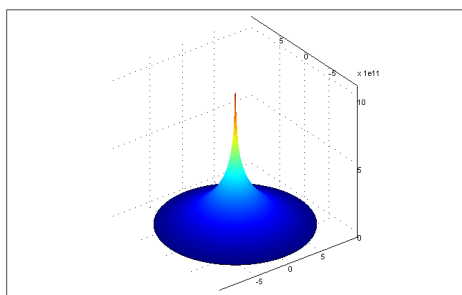
### elektrický potenciál radiálního el. pole kolem bodového náboje



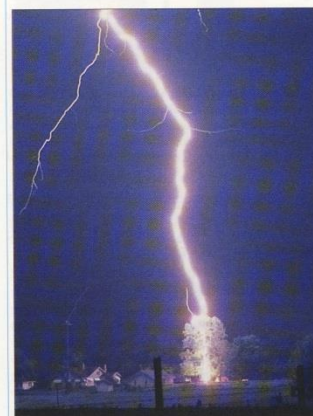
- ve vzdálenosti  $r$  od náboje  $Q$ , kolem kterého se vytváří elektrické pole umístíme pomyslný el. náboj  $q$
- potenciál v nekonečnu se bere = 0 V
- platí-li, že  $\varphi = \frac{E_p}{q} = \frac{F_e \cdot r}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2} \cdot r$  získáme výsledný vztah

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q}{r}$$

### Grafické znázornění poklesu potenciálu kolem bodového náboje:



blesku na zem. Elektrony z blesku putují po zemském povrchu a takové *povrchové zemní proudy* jsou smrtné. Na obr. 24.14 jsou patrné zřetelné stopy těchto proudů.

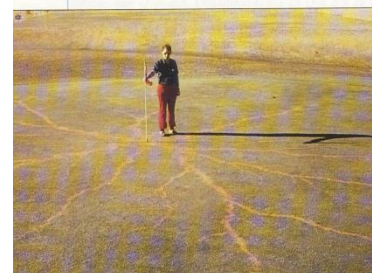


Obr. 24.13 Blesk udeřil do 20 m vysoké sekvoje. Protože byl strom mokrá, prošla většina z náboje vodou po jeho povrchu a strom zůstal nepoškozen.

- elektrický potenciál klesá nepřímo úměrně s rostoucí vzdáleností od bodového náboje  $Q$

### Krokové napětí

- při úderu blesku do země se okolo místa úderu vytvoří na chvíli potenciální hladiny – v místě úderu je potenciál nejvyšší a dosahuje hodnot řádově  $10^8$  až  $10^9$  V
- povrchové proudy mohou projít až do vzdálenosti cca 300 m, kde je potenciál již nulový
- stojí-li člověk ve vzdálenosti 100 m od úderu blesku rozkročen na délku 1m je rozdíl potenciálů a tedy velikost napětí  $U$ , které je mezi končetinami, roven hodnotě cca  $10^7$  V a proud protékající člověkem je řádově několik ampér
- krávy na louce a lesní zvíř v lese mají smůlu



Obr. 24.14 Vypálené stopy zemních proudů blesku na trávníku golfového jamkovitého.

### elektrická potenciální energie – $E_p$

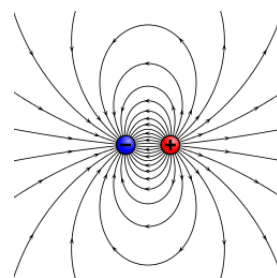
- energie nabitěho tělesa umístěného do vnějšího el. pole
- jednotka se často místo v joulech udává v eV (elektronvolt)
- eV se jako jednotka používá k vyjádření energie subatomárních částic

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

## 7 Elektrické pole dipólu a mikrovlnné vaření

**Elektrický dipól** – je dvojice vázaných elektrostatických nábojů opačného znaménka

- uplatňuje se v chemických vazbách
- osou dipólu rozumíme přímku procházející středy obou bodových nábojů
- významnou roli hrají molekulové dipóly ⇒ u vody má tato vlastnost zásadní význam pro mikrovlnné vaření
- v biologii a lékařství jsou vlastnosti el. dipólu využívány např. pro zajištění dráždivosti a vodivosti nervových buněk
- srdeční myocyt – svalová buňka srdce – vytváří dipól, který se mění během srdečního cyklu
- uvažuje se o vlivu elektromagnetického vlnění na lidský organismus – elmg. vlnění (např. z mobilu, Wi-fi) může ovlivnit dipóly v těle člověka ⇒ negativní změny metabolismu



**intenzita el. pole dipólu –  $E$**

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q \cdot \vec{d}}{r^3}$$

$d$  – vzdálenost obou nábojů o velikosti  $Q$

$r$  – polohový vektor (vzdálenost pozorovatele od středu dipólu)

**elektrický dipólový moment –  $p$**

jednotka:  $[p] = C \cdot m$

$$\vec{p} = Q \cdot \vec{d}$$

- vektor dipólového momentu směřuje od záporného konce dipólu ke kladnému

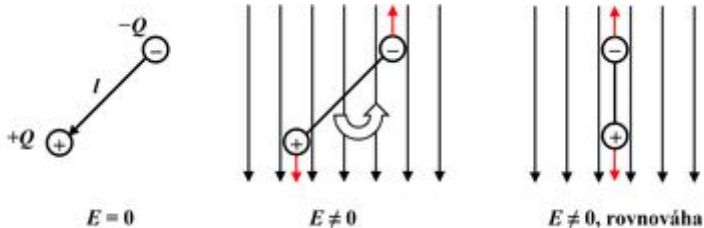
**el. potenciál el. pole dipólu –  $\varphi$**

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{\vec{p} \cdot \vec{r}}{r^3}$$

- dipól se z velké vzdálenosti chová jako 2 velké náboje, které téměř splývají, takže se jejich účinek na bodový náboj vzájemně téměř ruší

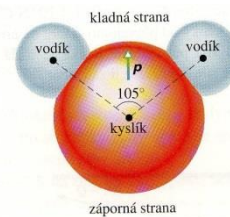
**Dipól v elektrickém poli**

V homogenním el. poli se dipól snaží natočit tak, aby vektor dipólového momentu  $p$  byl rovnoběžný s vektorem (směrem) intenzity el. pole  $E$  ⇒ el. pole má na dipól otáčivý účinek.



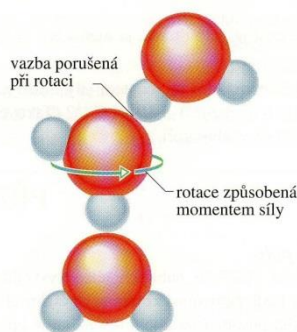
### Mikrovlnné vaření – princip činnosti mikrovlnné trouby

- molekula vody tvoří el. dipól
- molekuly vody se váží po 2 nebo po 3, v normálním stavu se díky srážkám spojují a rozpojují
- dochází k vzájemné přeměně elektrické potenciální energie na energii chaotického pohybu a naopak, celkově je celková energie konstantní a teplota se nemění

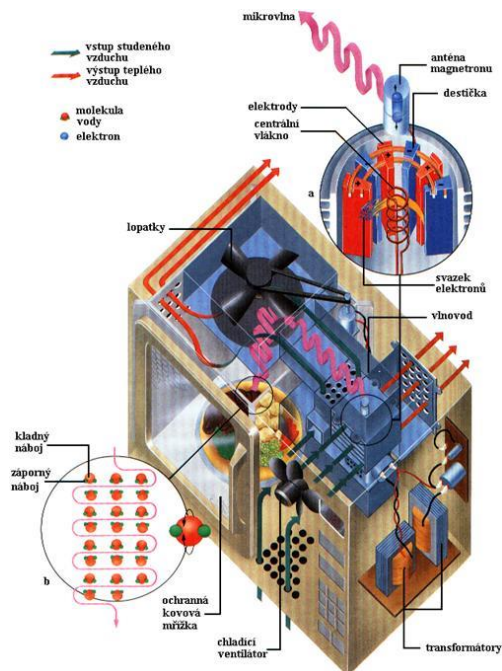


Obr. 23.17 Molekula  $H_2O$ : jsou zobrazena tři jádra (reprezentována černými body) a oblasti, v nichž se pohybují elektrony. Dipólový moment  $p$  směřuje od (záporné) kyslíkové části molekuly ke (kladné) vodíkové části.

- mikrovlnné vlnění v mikrovlnce má frekvenci cca 2,45 GHz (rezonanční frekvence molekuly vody)
- elmg. pole se snaží natočit vektor  $p$  do směru intenzity  $E$
- u 2 molekulových uskupení není problém
- u 3 molekul se poruší aspoň jedna vazba  $\Rightarrow$  energie, která se uvolní při porušení vazby, se uvolní ve formě tepla
- ohřev potravin je možný jen díky přítomnosti vody v jídle nebo pití
- kdyby voda netvořila el. dipól, mikrovlnka by nefungovala



Obr. 23.19 Skupina tří molekul vody. Moment síly způsobený oscilujícím elektrickým polem v mikrovlnné troubě rozbije jednu z vazeb mezi molekulami a tím celou skupinu.

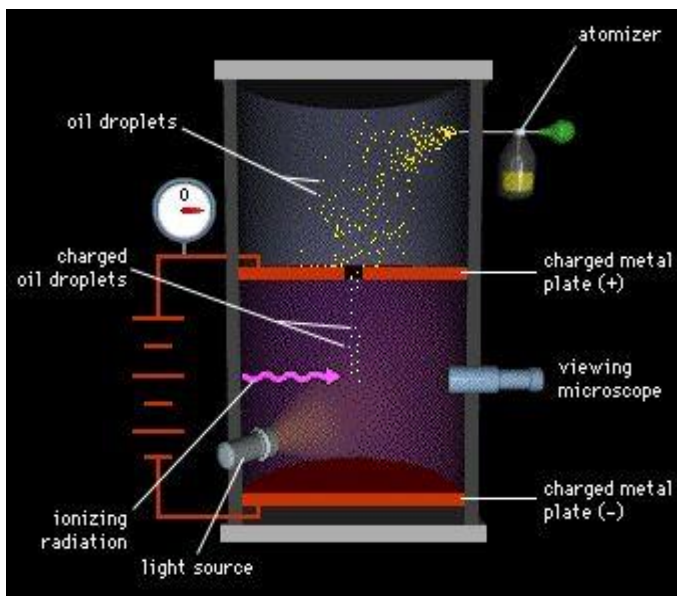


## 8 Měření velikosti elementárního elektrického náboje

- elementární elektrický náboj má např. elektron nebo proton
- $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- **Robert Andrews Millikan (1868 – 1953)** – americký fyzik
- 1923 Nobelova cena za fyziku
- Millikanův pokus spočíval v porovnání sil, kterými působí elektrostatické a gravitační pole na malé nabitě kapičky oleje. Mezi desky kondenzátoru (dvě vodorovné desky, mezi kterými se může vytvářet elektrické pole) byly vstříkovány olejové kapičky. Mikroskopem byl sledován jejich vertikální pohyb v přítomnosti elektrického pole a bez něho.



**Schéma experimentu:**



V určitém okamžiku je elektrická síla působící na kapičku oleje stejná jako tíhová síla, tj.  
 $F_e = F_G$ .  
 Nese-li kapička náboj  $Q$ , platí  

$$E \cdot Q = m \cdot g$$

kde  $E$  je konstantní intenzita el. pole,  $m$  je hmotnost kapy,  $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ .

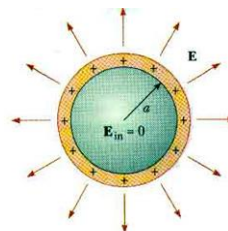
Poměr  $\frac{m}{Q} = \frac{E}{g} = \text{konst.}$  je konstantní pro danou hodnotu intenzity. Je-li hmotnost kapy  $n$ -násobkem hmotnosti elektronu, pak i celkový náboj je  $n$ -násobkem elementárního elektrického náboje a pro jeho velikost můžeme psát  $e = \frac{g}{E} \cdot m_e$ . Známe-li hmotnost elektronu, můžeme dopočítat velikost elementárního náboje.

- důležitým důsledkem Millikanova experimentu bylo zjištění, že **náboj** nemůže nabývat libovolné hodnoty, ale že **je tzv. kvantován** (může nabývat pouze určitých hodnot)

## 9 Elektrické pole vodivého tělesa. Rozložení náboje na vodiči.

Př. duté kulové těleso

- rovnoměrné rozmístění náboje na povrchu koule
- uvnitř koule je intenzita nulová ( $E = 0$ )
- náboj uvnitř je také nulový ( $Q = 0$ )
- kdyby uvnitř koule platilo, že  $E \neq 0$ , na elektrony by působila elektrická síla, která by způsobila jejich pohyb  $\Rightarrow$  vzniknul by neustálý proud, což nepozorujeme



**plošná hustota náboje –  $\sigma$**

jednotka:  $[\sigma] = \text{Cm}^{-2}$

- popisuje rozložení náboje  $Q$  na dané ploše  $S$

$$\sigma = \frac{Q}{S}$$

**Intenzita el. pole na povrchu koule**

- připomeneme, že platí  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q}{R^2} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{Q}{4\pi R^2} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{Q}{S}$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$\epsilon$  – permitivita prostředí

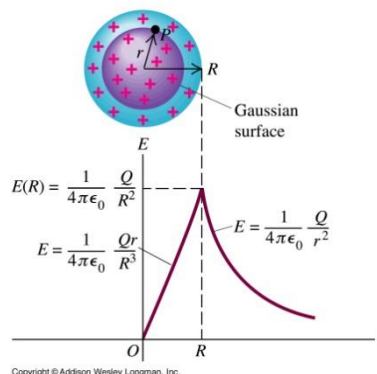
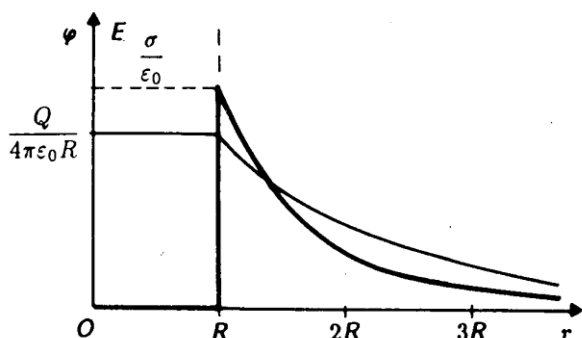
$\sigma$  – plošná hustota náboje

### elektrický potenciál na povrchu koule

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q}{R}$$

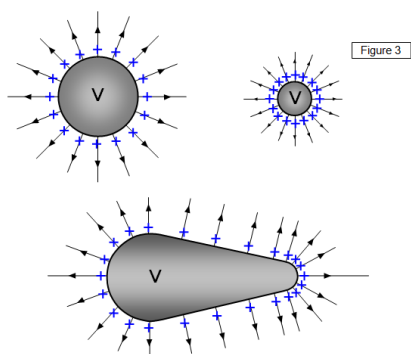
- ze vzorce plyne, že je konstantní
- uvnitř koule je stejný jako na jejím povrchu (obecně platí  $U = \varphi_1 - \varphi_2 = E \cdot d$ . Jelikož je  $E = 0$ , musí být nutně  $\varphi_1 = \varphi_2$ )

Grafické znázornění průběhu intenzity a potenciálu ve vzdálenosti  $r$  od povrchu nabitě koule o poloměru  $R$



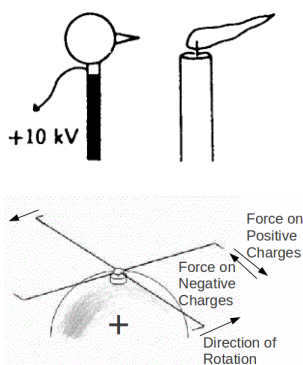
### Nepravidelná tělesa:

- hroty, hrany
- hromadění náboje a zvýšená intenzita na hrotech a místech s malým poloměrem
- **nerovnoměrné rozložení náboje** na tělese



**Elektrický vítr – sršení el. náboje:** v okolí nabitých hrotů dochází k hromadění el. náboje, který následně ionizuje vzduch, který přestane být izolantem. Ionty se souhlasným nábojem strhávají molekuly vzduchu.

- způsobuje ztráty v sítích VVN (velmi vysoké napětí)
- není primárně spojen s optickým vjemem
- elektrický větrník
- odklon plamene svíčky od nabitého hrotu

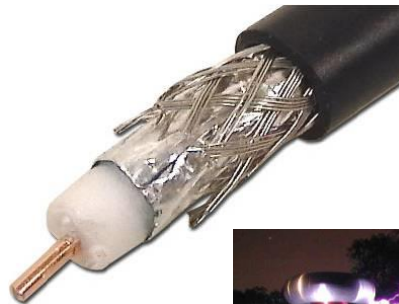


### Faradayova klec

- ochrana proti elektrostatickému náboji nebo elektromagnetickým polím
- drátěná klec – uvnitř je náboj = 0
- auto je F. klec – ochrání před úderem blesku
- panelák – železobetonová konstrukce se může chovat jako F. klec – uvnitř paneláku může být zhoršený příjem signálu ⇒ odstíní elmg. vlny
- stínění TV kabelů – koaxiální kabely bývají stíněné (obalené hliníkovou fólií) ⇒ odstranění rušivých vlivů okolních elmg. polí na TV signál

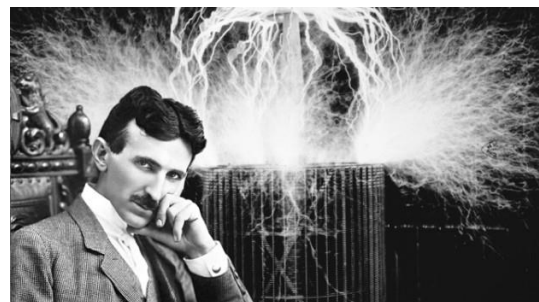


Obr. 25.20 Do karosérie auta udeřila mohutná elektrická jiskra a pak přeskočila přes izolující levou přední pneumatiku do země (všimněme si záblesku v tomto místě), aniž zranila osobu uvnitř auta.



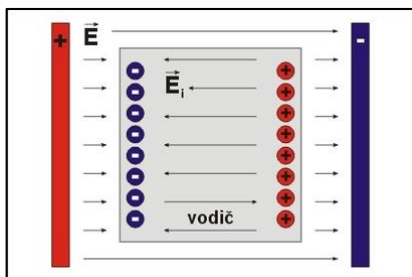
### **Nikola Tesla (1856 – 1943)**

- americký vynálezce srbského původu ⇒ rádio (NC ale **Marconi(1874 – 1937)**), asynchronní motor, předpověděl bezdrátový přenos obrazu, zvuku i textu
- propagátor střídavého proudu, vynalez bezdrátový telegraf
- bezdrátový přenos energie na dálku ⇒ tunguzská katastrofa jako nevydařený přenos energie (?)
- přítomnost při Filadelfském experimentu



## 10 Vodič a izolant v elektrickém poli

### a) vodič



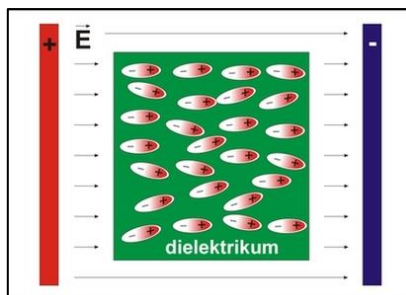
$\vec{E}$  – intenzita elektrického pole mezi deskami

$\vec{E}_i$  – indukovaná intenzita ve vodiči

**elektrostatická indukce** – jev, ke kterému dojde při vložení vodiče do elektrického pole

- přeskupení náboje ve vodiči
- indukovaná intenzita  $E_i$  se vyruší vzájemně s intenzitou el. pole  $E \Rightarrow$  intenzita uvnitř vodiče = 0
- náboje indukované ve vodiči můžeme od sebe oddělit rozdělením vodiče na 2 části

### b) izolant



**polarizace dielektrika** – jev, ke kterému dojde při vložení izolantu (dielektrika) do elektrického pole

- izolant nemá volné elektrony
- z atomů a molekul se stanou elektrické dipóly  $\Rightarrow$  natáčí se do směru siločar el. pole
- náboje indukované ve vodiči NELZE od sebe oddělit
- výsledná intenzita  $E_v = E - E_i \neq 0$

**relativní permitivita dielektrika –  $\epsilon_r$**

jednotka:  $[\epsilon_r] =$  bezrozměrné číslo

$$\epsilon_r = \frac{E_e}{E}$$

$E_e$  – intenzita el. pole ve vakuu

$E$  – intenzita el. pole v dielektriku

- relativní permitivita tedy udává, kolikrát se elektrické pole v dané látce zeslabí oproti vakuu

## 11 Kapacita vodiče. Kondenzátor.

??? Můžeme na vodič (kouli, desku) přenést libovolně velký náboj?

- ne, množství náboje je omezené tvarem a velikostí předmětu
- počet částic – nábojů – na vodiči je omezený
- každý vodič má tedy určitou **kapacitu**

### elektrická kapacita vodiče – $C$

jednotka:  $[C] = F$  (farad)

- vyjadřuje schopnost vodiče uchovat elektrický náboj  $\Rightarrow$  čím větší kapacita tělesa, tím více náboje lze na těleso přenést
- představuje maximální množství náboje na tělese při jednotkovém potenciálu
- je dána poměrem náboje na tělese a hodnotou potenciálu  $\Rightarrow$  změní-li se velikost náboje na tělese, změní se také velikost potenciálu
- je-li napětí definováno jako rozdíl potenciálů a uvažujeme-li, že potenciál země je roven nule, můžeme kapacitu definovat i jako množství náboje na tělese při daném napětí

$$C = \frac{Q}{\varphi} = \frac{Q}{U}$$

### ??? Jak velká je kapacita 1 F?

- 1 F je kapacita vodiče, který se nábojem 1 C nabije na potenciál 1 V
- z pohledu „velikosti“ je 1 F „velká“ kapacita
- běžné hodnoty: pF, nF,  $\mu$ F

### Kapacita vodiče

- ZÁVISÍ na geometrii (tvaru a velikosti) vodiče
- NEZÁVISÍ na velikosti napětí nebo náboje přivedeného na vodič

### Kondenzátor

- obecně jakékoliv zařízení, které umožňuje uchovávat elektrickou potenciální energii
- v praxi: pasivní elektrotechnická součástka používaná v elektrických obvodech k uchování el. náboje
- princip: dvě vodivé elektrody oddělené dielektrikem
- základní vlastnosti: kapacita, maximální dovolené napětí, činitel jakosti
- základní součástka oscilačních obvodů (generátorů elmg. vln)

### Značení:

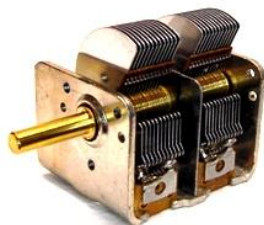


### Typy kondenzátorů podle dielektrika:

- a) Leydenská láhev – historicky (1745) první kondenzátor vyrobený ze skleněné lahve (mající funkci dielektrika) opatřené zevnitř i zvnějšku vodivými polepy (elektrody); pojmenovaná podle nizozemské univerzity v Leidenu; dodnes používaná u **Whimhurstově** indukční elektrice

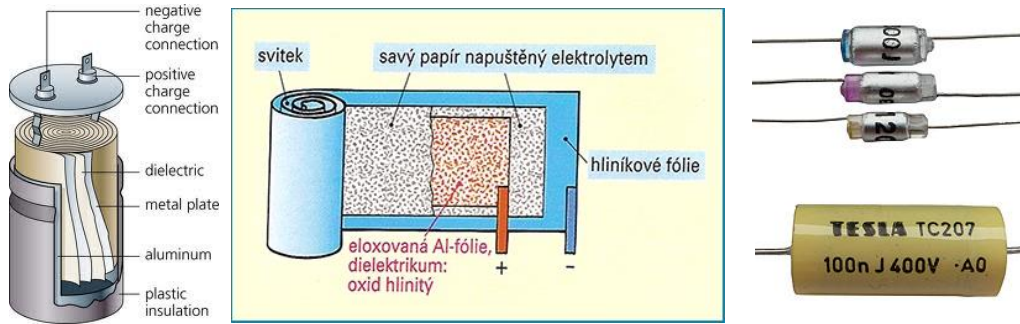


- b) otočný vzduchový – používá se jako ladící prvek v elektronických zařízeních, např. v rádiu k naladění stanice;



kapacita se mění otáčením podle velikosti plochy, která je společná mezi statorem (pevná část) a rotorem (otáčející se desky)

c) svitkový – papír, obvykle napuštěný voskem, tvoří dielektrikum; elektrody bývají z hliníkové fólie



d) elektrolytický – elektrody s velkým povrchem, při zapojení je třeba dbát na správnou polaritu, má vysokou kapacitu; katoda – vodivý elektrolyt (tekutý, polosuchý, pevný), anoda – hliníková fólie značka je mírně odlišná od běžného značení:  $\text{+} \parallel \text{—}$



e) keramický – speciální keramika s velkou permitivitou

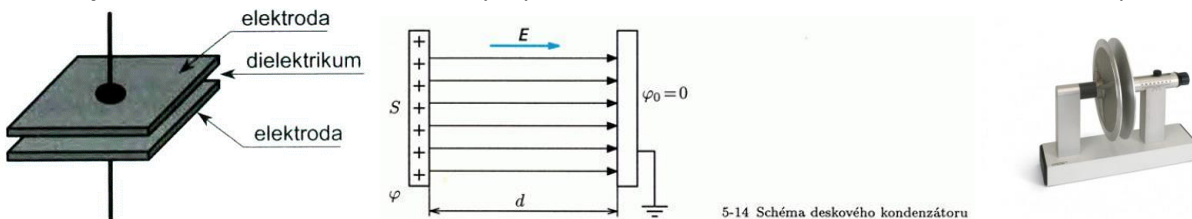


f) varikap – kapacitní dioda – napětím řízený kondenzátor; PN přechod zapojený v závěrném směru se chová jako kondenzátor; značka:  $\text{—} \parallel \text{—} \text{—}$



g) slídový  
h) plastový

**Deskový kondenzátor** – dvě vodivé desky o ploše  $S$  ve vzdálenosti  $d$ , mezi nimi dielektrikum s permitivitou  $\epsilon$



5-14 Schéma deskového kondenzátoru

Pro intenzitu el. pole mezi deskami platí, že  $E = \frac{U}{d}$  a současně  $E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{Q}{\epsilon \cdot S}$ . Z rovnosti obou výrazů plyne, že

$$\frac{U}{d} = \frac{Q}{\epsilon \cdot S}$$

Po úpravě rovnice můžeme vyjádřit poměr náboje  $Q$  a napětí  $U$ :

$$\frac{Q}{U} = \frac{\varepsilon \cdot S}{d}$$

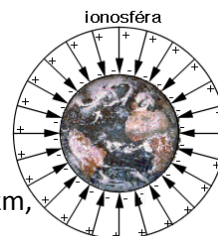
Podílem  $\frac{Q}{U}$  je dána kapacita, takže pro kapacitu deskového kondenzátoru platí následující vztah:

### kapacita deskového kondenzátoru

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{d} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{d}$$

**Kulový kondenzátor** – elektrody tvaru koule; větší koule má poloměr  $r_2$ , menší  $r_1$

- obrovský kulový kondenzátor tvoří např. naše zemská ionosféra a země
  - ⇒ intenzita el. pole je 100 – 200 V/m
  - ⇒ mezi ionosférou (kladná elektroda) a zemským povrchem (převážně vodivá mořská voda tvořící zápornou elektrodu) je vzdálenost cca 100 km, napětí asi 400 kV a kapacita tohoto kondenzátoru je cca 20 kC
  - ⇒ více na



[http://www.techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74f8696e612061206d61676e657469736d7573h&key=424](http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74f8696e612061206d61676e657469736d7573h&key=424)

Je-li potenciál kulového vodiče  $\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{Q}{R}$ , pak pro kapacitu kulového vodiče  $C = \frac{Q}{\varphi}$  platí

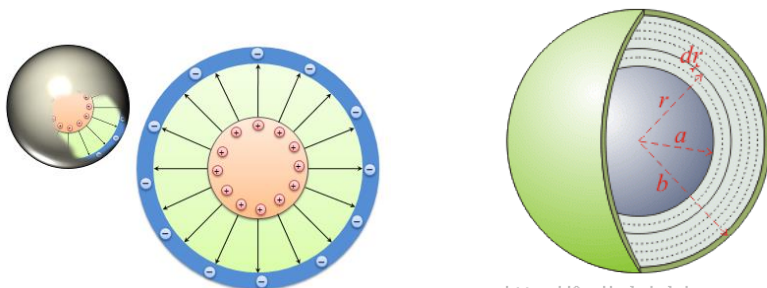
### kapacita kulového vodiče o poloměru $R$

$$C = 4\pi\varepsilon R$$

Pro kulový kondenzátor, tvořený 2 koulemi různých poloměrů platí, že napětí mezi oběma elektrodami je dáno rozdílem potenciálů  $U = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{Q}{r_1} - \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{Q}{r_2} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$ . Kapacita je pak dána jako  $C = \frac{Q}{U}$  a tedy platí

### kapacita kulového kondenzátoru

$$C = 4\pi\varepsilon \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$



<http://fyzikalniulohy.cz>  $r_1$  je zde jako  $b$ ,  $r_2$  jako  $a$

Čím větší je kapacita kondenzátoru, tím větší náboj musí být přenesen na elektrody, aby se na kondenzátoru dosáhlo požadovaného napětí  $U = \frac{Q}{C}$ .

Po nabití kondenzátoru je na obou deskách (resp. vodičích) stejně velký náboj opačného znaménka.

## 12 Spojování kondenzátorů. Energie kondenzátoru.

### Využití kondenzátorů v praxi:

- **fotografický blesk** – elektronicky řízená xenonová výbojka (na obr. označena červenou elipsou); záblesk vzniká díky vysokému napětí na kondenzátoru, které se vybíjí velkým proudem, který vytvoří elektrický oblouk po dobu asi  $10^{-3}$  s.
- **elektronický prvek** – vyhlazení průběhu usměrněného napětí, odstranění stejnosměrné složky el. proudu (zvukové karty; kondenzátorem nemůže procházet stejnosměrný proud), odrušovací kondenzátor u domácích spotřebičů omezuje elmg. rušení při zapínání a vypínání přístroje, ladící kondenzátor v rádiu nebo TV, elektronické obvody



- **počítačové paměti** – tvořené miliony miniaturních kondenzátorů, které jsou ve stavu 1 – je náboj nebo 0 – není náboj



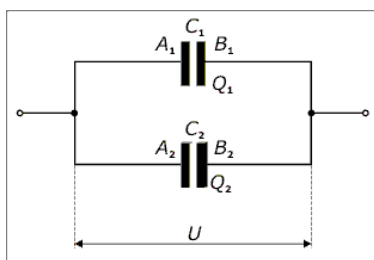
- **defibrilátor** – přístroj používaný v lékařství k provádění elektrických šoků při zástavě srdce, kdy velké množství náboje projde během krátké doby přes srdeční sval a může tak obnovit srdeční činnost.
  - ⇒ základem defibrilátoru je kondenzátor, který je nabíjen baterií, el. obvod pak nabíjí kondenzátor na vysoké napětí cca 5000 V
  - ⇒ kapacita kondenzátoru je cca 70  $\mu\text{F}$ , el. energie je  $E = \frac{1}{2}CU^2 \cong 875 \text{ J}$
  - ⇒ tělem projde asi 200 J za 2 ms  $\Rightarrow$  výkon pulzu je  $P = \frac{200}{2 \cdot 10^{-3}} = 100 \text{ kW}$



- **elektrický paralyzér** – elektrický paralyzér generuje z nízkého vstupního napětí vysoké výstupní napětí. Jako zdroj se obvykle používá baterie s napětím od 1,5 do 12 V. Napětí ze zdroje prochází zesilovacím obvodem, kde je znásobeno na 200 000 až 500 000 voltů, ale dochází ke snížení intenzity elektrického proudu. Součástí tohoto obvodu je také oscilátor měnící kmitočtovou charakteristiku proudu a kondenzátor umožňující uchování energie potřebné k vytvoření výboje. Následně je elektrický proud přiveden na kontaktní elektrody, které jsou přiloženy k tělu útočníka.



### Paralelní zapojení kondenzátorů

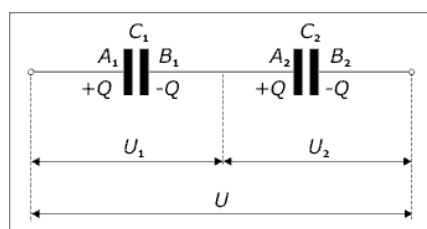


- napětí na obou kondenzátorech je stejné, tj.  $U_1 = U_2 = U$
- celkový náboj soustavy je dán součtem nábojů na jednotlivých kondenzátorech, tj.  $Q = Q_1 + Q_2$
- do předchozí rovnice dosadíme za náboje ze vztahu  $Q = C \cdot U$ , tj.  $CU = C_1U + C_2U$ , zkrátíme napětí a máme výsledek:

$$C = C_1 + C_2$$

- analogicky v případě většího počtu kondenzátorů zapojených paralelně platí  $C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$

### Sériové zapojení kondenzátorů

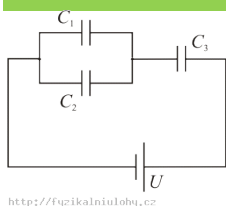


- na obou kondenzátorech je stejný náboj, tj.  $Q_1 = Q_2 = Q$
- celkové napětí na obou kondenzátorech je dáno součtem jednotlivých napětí, tj.  $U = U_1 + U_2$
- do předchozí rovnice dosadíme za náboje ze vztahu  $U = \frac{Q}{C}$ , tj.  $\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$ , zkrátíme náboj a máme výsledek:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

- analogicky v případě většího počtu kondenzátorů zapojených do série platí  $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$

### Př. Kombinované zapojení sériově-paralelní se počítá postupně:

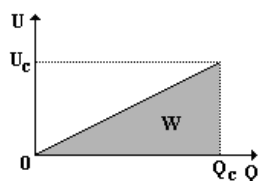


<http://fyzikalniulohy.cz>

- nejprve vypočítáme výslednou kapacitu  $C_{12}$  kondenzátorů  $C_1$  a  $C_2$ , které jsou zapojeny paralelně:  $C_{12} = C_1 + C_2$
- pak dopočítáme výslednou kapacitu sériového zapojení pomyslného  $C_{12}$  a reálného  $C_3$ :  $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{12}} + \frac{1}{C_3} = \frac{C_{12} + C_3}{C_{12} \cdot C_3}$
- nakonec vyjádříme kapacitu  $C$ :  $C = \frac{C_{12} \cdot C_3}{C_{12} + C_3} = \frac{(C_1 + C_2) \cdot C_3}{C_1 + C_2 + C_3}$

### Energie kondenzátoru:

- k nabití kondenzátoru je potřeba vnějšího působení elektrické síly, která vykoná práci  $\Rightarrow$  v praxi je touto silou baterie, která koná práci na úkor své chemické energie
- energie kondenzátoru je soustředěna v el. poli mezi jeho elektrodami (např. deskami)



- kondenzátor se nabíjí postupně, tj. napětí na kondenzátoru není „hned“ po připojení baterie na maximum
- **práce je graficky dána jako plocha pod křivkou napětí**
- energie je pak dána prací, z obr. a ze vztahu  $C = QU$  pak plynou následující vztahy:

$$E_{el} = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{Q^2}{2C}$$