

# 1 ELEKTRICKÉ NÁBOJE

## 1.1 ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI ELEKTRICKÝCH NÁBOJOV

Základným objektom a pojmom elektromagnetizmu, pôvodcom všetkých elektromagnetických silových pôsobení, je elektrický náboj. Nemá zmysel klásť otázku čo náboj je, pretože na ňu nevieme odpoveď rovnako, ako na otázku čo je hmota. Tieto pojmy sú natoľko principiálne, že ich nemôžeme vyjadriť pomocou iných, menej základných pojmov, preto môžeme hovoriť iba o vlastnostiach elektrických nábojov. Základné vlastnosti elektrických nábojov boli stanovené zo skúseností a z fyzikálnych meraní, a na základe stavu súčasných poznatkov sme presvedčení, že sú pravdivé. Tieto základné vlastnosti možno zhrnúť do nasledovných výpovedí:

1. **V prírode existujú dva druhy elektrického náboja – náboje kladné, označujeme ich znamienkom "+", a náboje záporné, označujeme ich znamienkom "-".** Ak sa telesá v našom okolí javia ako elektricky neutrálne, neznamená to, že na nich nie sú elektrické náboje, ale iba to, že náboje na nich sú úzkostlivo vykompenzované, t. j. že je na nich rovnaké množstvo kladného aj záporného náboja. Nevykompenzovanosť čo i len zlomkov percenta by viedla k nepredstaviteľným silám v telesách alebo medzi telesami. Prípísanie druhu znamienka elektrickým nábojom bolo historicky náhodné. Dnes vieme, že nositeľom kladného náboja je protón a nositeľom záporného náboja je elektrón.

2. **Náboje pôsobia na seba silovo – náboje rovnakého znamienka (súhlasné) sa odpudzujú, náboje rôzneho znamienka (nesúhlasné) sa priťahujú.** Táto skutočnosť bola známa už starým Grékom. Silové pôsobenie medzi nábojmi bolo kvantitatívne skúmané až v 18. storočí lordom Henrym Cavendishom, ktorý však svoje pozorovania nepublikoval. O 13 rokov neskôr v roku 1785 silové pôsobenie medzi nábojmi vo forme známeho zákona zverejnil Ch. A. Coulomb.

3. **Elektrické náboje sú kvantované. Existuje najmenšie, nedeliteľné kvantum elektrického náboja s absolútnou hodnotou**

$$e = 1,602\,176\,462 \cdot 10^{-19} \text{ C (A.s)}$$

Toto kvantum sa nazýva elementárny náboj. Nositeľmi tohoto náboja sú elementárne častice, pričom protón má náboj  $+e$  a elektrón  $-e$ . Voľné zlomky alebo neceločíselné násobky tohoto náboja neboli v prírode pozorované.

4. **Elektrické náboje sa zachovávajú.** Zákon zachovania elektrického náboja patrí medzi základné prírodné zákony. Príležitostné zdanlivé vymiznutie elektrického náboja je zapríčinené kompenzáciou náboja jedného znamienka nábojom opačného znamienka. Celkový (kladný a záporný) náboj vesmíru zostáva konštantný a s najväčšou pravdepodobnosťou nulový. Elektrické náboje sú invariantné voči Lorentzovým transformáciám, t. j. veľkosť

elektrického náboja nezávisí od pohybového stavu náboja. Táto dôležitá vlastnosť elektrických nábojov bola potvrdená mnohými experimentmi.

5. **Elektrické náboje sú viazané na materiálne objekty – elementárne častice.** Aj keď v našich úvahách budeme často hovoriť o správaní sa elektrických nábojov, nesmieme strácať zo zreteľa, že v skutočnosti hovoríme o správaní sa elementárnych častíc, molekúl, alebo zložitejších hmotných agregátov. O elementárnych časticách ako nosičoch elektrických nábojov je pojednané v nasledujúcom odseku.

## 1.2 MIKROSKOPICKÉ NOSIČE ELEKTRICKÝCH NÁBOJOV

Mikroskopickými nosičmi elektrických nábojov sú nabité elementárne častice a ióny, na ktorých môže byť kladný alebo záporný náboj. Tento náboj môže byť iba celočíselným násobkom elementárneho náboja. Napriek veľkému experimentálnemu úsiliu sa doteraz nepodarilo objaviť voľné častice s neceločíselným nábojom.

Dnes je známych asi 200 elementárnych častíc a veľké množstvo iónov, atómov a molekúl. Väčšina častíc po vzniku existuje istý, nie príliš dlhý čas, po uplynutí ktorého sa rozpadajú na iné častice, t. j. častice majú konečnú dobu života. Vo väčšine prípadov je táto doba veľmi krátka a predstavuje iba nepatrné zlomky sekundy. Niekoľko častíc má však nekonečnú dobu života – sú to elektrón, protón a ich antičastice pozitron a antiprotón. Protóny sa podieľajú na stavbe atómových jadier, elektróny tvoria elektrónový obal atómu. Možno povedať, že práve tieto častice sú pôvodcami skoro všetkých elektromagnetických javov. Na tvorbe atómových jadier sa podieľajú okrem protónov aj neutróny. Elektricky sú neutrálne a ich doba života v atómovom jadre je nekonečná. Mimo jadra žijú asi 17 minút, potom sa rozpadnú na protóny, elektróny a antineutrino.

Elektrický náboj iónov je podmienený nedostatkom jedného alebo viac elektrónov v atóme (kladný ión – kation), alebo naopak, prebytkom elektrónov (záporný ión – anión). Ióny vznikajú obyčajne rozpadom molekúl alebo ionizáciou atómu, t. j. stratou jedného alebo viac z jeho elektrónov.

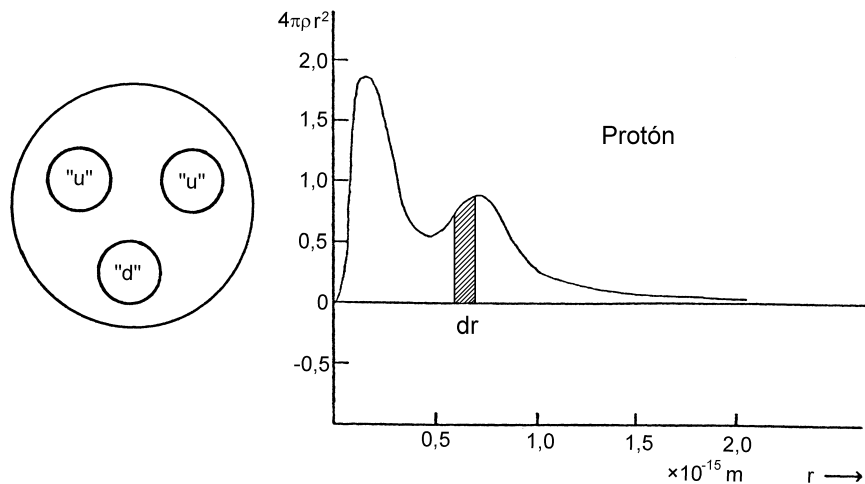
**Elektrón.** Elektrón je materiálnym nosičom záporného elementárneho náboja. Podľa súčasných názorov je elektrón bodovou bezštruktúrnou časticou, t. j. celý náboj elektrónu je sústredený v bode. Takáto predstava je vnútorne protirečivá, pretože energia elektrického poľa budného bodovým nábojom je nekonečná, a teda mala by byť nekonečná aj zotrvačná hmota (hmotnosť) bodového elektrónu. To však odporuje skúsenosti, pretože hmotnosť elektrónu bola experimentom stanovená na hodnotu

$$m_e = 9,109\,381\,88 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

S touto protirečivosťou sa však musíme zmieriť, pretože neexistuje lepšia a menej rozporná predstava o štruktúre (alebo o bezštruktúrnosti) elektrónu. Pri výpočtoch sa nekonečná energia elektrónu uvažuje ako aditívna konštanta, ktorú pri interakciách častíc možno v konečnom dôsledku ignorovať.

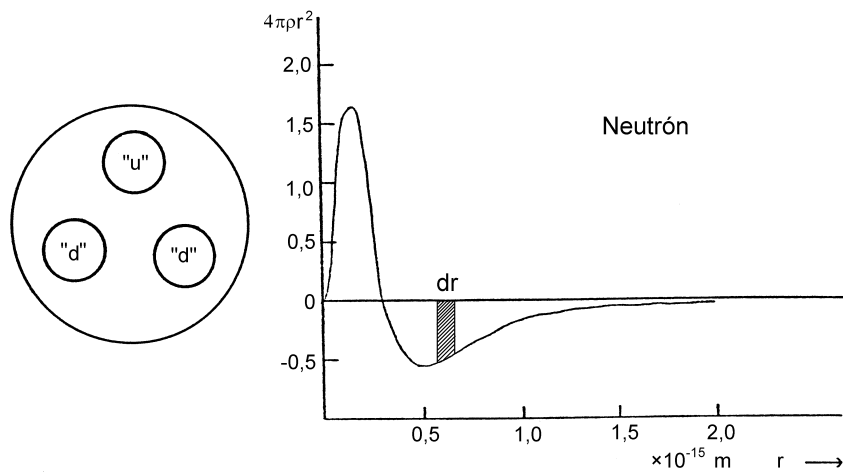
**Protón.** Nositeľom kladného elementárneho náboja je protón – častica približne 1836-krát hmotnejšia ako elektrón. Hmotnosť protónu

$$m_p = 1,672\,621\,58 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$



Obr. 1.1

Merania potvrdzujú, že na rozdiel od elektrónu, protón nie je bodová častica, ale že má efektívny priemer rádovo  $10^{-15}$  m. Taktiež sa ukazuje, že elektrický náboj vo vnútri protónu má svoju štruktúru. Experimentálne je dobre preskúmané rozloženie elektrického náboja vo vnútri protónu metódou, ktorú na začiatku dvadsiateho storočia použil anglický fyzik Ernest Rutherford (1871 – 1937) na preskúmanie štruktúry atómov. Metóda spočíva v ostreľovaní protónov elektrónmi s veľmi veľkou energiou (niekoľko GeV) a v pozorovaní rozptylu elektrónov na protónoch. Výsledok týchto experimentov je prekvapivý a je zobrazený na obr. 1.1. Graf znázorňuje závislosť sumárneho náboja protónu  $4\pi r^2$  v guľovej vrstve jednotkovej hrúbky polomeru  $r$  od stredu protónu. Z uvedeného grafu vidno, že prakticky celý náboj protónu je sústredený v guľi s polomerom  $r_0 < 10^{-15}$  m. Po prvom maxime  $4\pi r^2$  neklesá so vzdialenosťou  $r$  monotónne, ale vykazuje ešte jedno maximum.



Obr. 1.2

**Neutrón.** Podobné experimenty ako s protónmi boli urobené aj s rozptylom elektrónov na neutrónoch. Merania ukázali, že neutrón má tiež svoju elektromagnetickú štruktúru, a nie je bodovou, elektricky neutrálnou časticou.

Rozloženie elektrického náboja vo vnútri neutrónu je graficky znázornené na *obr. 1.2*. Ukazuje sa, že neutrón, podobne ako protón, je objemovo nabitý – blízko jeho stredu je rozložený kladný elektrický náboj a ďalej od stredu náboj záporný. Plochy ohraničené nad a pod osou  $r$  sú rovnaké, a teda množstvo kladného náboja v neutróne sa rovná množstvu záporného náboja. Objem, v ktorom sú kladné a záporné náboje neutrónu uzavreté, je prakticky rovnaký ako u protónu.

Je otázkou, ako sa má interpretovať spojité rozloženie elektrického náboja vo vnútri protónu ak jeho náboj je elementárny. Plocha ohraničená čiarou a osou  $r$  na *obr. 1.1* sa číselne rovná náboju protónu a zašrafovaná plocha predstavuje náboj, ktorý je uzavretý vo vnútri protónu v guľovej vrstve s polomerom  $r$  a hrúbkou  $dr$ . Je jasné, že tento náboj predstavuje iba malú časť elementárneho náboja. Teda je namieste otázka, aký význam má tvrdenie, že v danom objeme  $4\pi r^2 dr$  sa nachádza náboj menší ako elementárny?

Podľa súčasných predstáv teórie elementárnych častíc pozostávajú protóny a neutróny z dvoch rôznych bodových objektov, ktoré nesú spoločný názov **kvarky**. Jeden z týchto kvarkov s nábojom  $+2e/3$  sa nazýva "up" ( $u$ ), a druhý s nábojom  $-e/3$  je "down" ( $d$ ). Protón pozostáva z dvoch kvarkov  $u$  a jedného kvarku  $d$ , takže celkový náboj protónu je  $+e$ . Kvarky sa v objeme protónu pohybujú a hustota náboja v protóne je takto úmerná dobe, za ktorú kvarky v danom mieste zotrávajú. Neutrón pozostáva z dvoch kvarkov  $d$  a jedného kvarku  $u$ , takže celkový náboj neutrónu sa rovná nule. Vysvetlenie spojitého rozloženia náboja v neutróne je analogické ako v protóne.

Voľné kvarky neboli v prírode pozorované, ich existencia však bola potvrdená experimentmi na urýchľovačoch protibežných zväzkov protónov a antiprotónov s energiami do 0,9 TeV. Experimentálne sa dokázalo, že kvark  $u$  má pokojovú energiu  $m_q c^2$  rádovo  $\sim 5$  MeV a kvark  $d$  pokojovú energiu  $\sim 10$  MeV. Existencia kvarkov umožňuje vysvetliť mnohé javy fyziky elementárnych častíc.<sup>1</sup>

Dôležitou charakteristikou elementárnych častíc je ich moment hybnosti, alebo spin. Spin nemožno vysvetľovať ako dôsledok rotácie častíc, pretože pri rozumných predpokladoch o rozmeroch častíc by sa museli pripúšťať obežné rýchlosti častíc vyššie ako rýchlosť svetla. Preto sa spin uvažuje ako vnútorná vlastnosť častice. So spinom častice je spojený jej magnetický moment, ktorý tiež nemožno vysvetliť ako dôsledok pohybu náboja a treba ho uvažovať ako principiálnu vlastnosť častice.

---

<sup>1</sup> Okrem uvedených kvarkov  $u$  a  $d$  boli po roku 1964 predpovedané a postupne objavené ďalšie štyri kvarky: "strange" ( $s$ ) s nábojom  $-e/3$  a s energiou  $\sim 200$  MeV; "charm" ( $c$ ) [ $+2e/3$ , 1 500 MeV]; "bottom" ( $b$ ) [ $-e/3$ ,  $\sim 5$  000 MeV]; "top" ( $t$ ) [ $+2e/3$ ,  $>100$  000 MeV]. Posledný,  $t$  kvark, bol objavený v marci 1995. Tieto kvarky sa podieľajú na stavbe exotickjších elementárnych častíc ako napr. mezónov. Myšlienku o existencii kvarkov prvý vyslovil americký teoretický fyzik Murray Gell-Mann, ktorý v roku 1969 dostal za práce v teórii elementárnych častíc Nobelovu cenu.

### 1.3 POJEM BODOVÉHO NÁBOJA A HUSTOTY NÁBOJA V KLASICKEJ ELEKTRODYNAMIKE

Pri výpočte silových pôsobení medzi elektrickými nábojmi sa často pracuje s pojmami "bodový náboj" alebo "hustota náboja". Pojem bodového náboja bol v klasickej elektrodynamike zavedený v čase, keď kvantovanie náboja ešte nebolo známe. Pod bodovým nábojom sa rozumel konečný náboj lokalizovaný v matematickom bode (teda náboj s nekonečnou hustotou). Bodový náboj sa považoval za užitočnú fikciu, ktorá umožňuje analýzu interakcie objemnejších nábojových rozložení umiestnených v relatívne veľkých vzájomných vzdialenostiach. Podľa dnešných predstáv bodové náboje v prírode existujú, je to už spomínaný elektrón a jeho antičastica – pozitron. V našom texte budeme bodové náboje označovať symbolmi  $q$  alebo  $Q$ .

Popri bodových nábojoch sa často uvádza pojem hustoty elektrického náboja, pričom sa predpokladá, že náboj je v priestore rozložený spojito ako funkcia polohového vektora  $\mathbf{r}$ . Pre opis takého rozloženia zavádzame matematickú funkciu  $\rho(\mathbf{r})$  nazývanú objemová hustota náboja danú limitným pomerom náboja  $\Delta q$  v objeme  $\Delta \tau$ , ak  $\Delta \tau$  sa blíži k nule, teda

$$\rho(\mathbf{r}) = \lim_{\Delta \tau \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta \tau} = \frac{dq}{d\tau} \quad (1.1)$$

Pri tejto matematickej definícii objemovej hustoty náboja sa samozrejme nevylučuje, že v objeme  $\Delta \tau$  sa môže nachádzať ľubovoľne malý náboj, teda aj náboj menší ako je elementárny. Náboje sú však kvantované, a preto matematický pojem "nekonečne malý náboj  $dq$ " musí fyzik interpretovať ako veľmi malý náboj, ktorý však ešte stále predstavuje veľké množstvo elementárnych nábojov tak, aby akékoľvek malé zmeny počtu nábojov bolo možné považovať za takmer spojité. Prísne vzaté, reálna objemová hustota náboja nemôže byť matematicky spojitou funkciou polohy, v skutočnosti je to funkcia, ktorá od miesta k miestu vykonáva jemné skoky. Obrazne povedané, nábojové rozloženie predstavuje veľmi jemnú kašu.

Okrem objemovej hustoty nábojov sa často uvádza tiež plošná hustota náboja

$$\sigma(\mathbf{r}) = \frac{dq}{dS} \quad (1.2)$$

kde  $dS$  je nekonečne malý plošný element uvažovanej plochy, na ktorom sa nachádza nekonečne malý náboj  $dq$ , a nakoniec tiež dĺžková hustota náboja na čiare

$$\lambda(\mathbf{r}) = \frac{dq}{dl} \quad (1.3)$$

pričom  $dl$  je nekonečne krátky úsek čiary, na ktorom sa nachádza nekonečne malý náboj  $dq$ . Ak je v objeme  $\tau$  na ploche  $S$ , resp. na čiare  $l$  dané rozloženie náboja ako funkcie polohy  $\rho(\mathbf{r})$ ,  $\sigma(\mathbf{r})$ , resp.  $\lambda(\mathbf{r})$ , potom celkový náboj v objeme, na ploche, resp. na čiare je daný integráciou príslušných hustôt náboja v danej oblasti, teda v objeme  $\tau$  celkový náboj je

$$Q = \int_{\tau} \rho(\mathbf{r}) d\tau \quad (1.4)$$

na ploche  $S$

$$Q = \int_S \sigma(\mathbf{r}) dS \quad (1.5)$$

a na čiare  $l$

$$Q = \int_l \lambda(\mathbf{r}) dl \quad (1.6)$$

Zavedenie pojmu hustoty elektrického náboja súvisí so všeobecne platným a vo fyzike široko používaným princípom, podľa ktorého výsledné fyzikálne pôsobenie niekoľkých zdrojov nejakého systému sa rovná súčtu (integrálu) pôsobení jednotlivých zdrojov. Tento princíp sa nazýva **princípom superpozície**. Tak napr. výsledná sila pôsobiaca od niekoľkých nábojov sa rovná súčtu jednotlivých síl.