# ELEKTŘINA A MAGNETISMUS

BEDŘICH SEDLÁK
IVAN ŠTOLL

KAROLINUM

**Elektřina a magnetismus**

**Bedřich Sedlák**
**Ivan Štoll**

———

Recenzoval:
prof. RNDr. Petr Dub, CSc.

Vydala Univerzita Karlova
Nakladatelství Karolinum
Obálka Jan Šerých
Sazba studio Lacerta (www.sazba.cz)
Čtvrté vydání, v Nakladatelství Karolinum třetí
První elektronické vydání

© Univerzita Karlova, 2017
© Bedřich Sedlák, Ivan Štoll, 2017

ISBN 978-80-246-3146-2 (online : pdf)

Univerzita Karlova
Nakladatelství Karolinum 2017

www.karolinum.cz
ebooks@karolinum.cz

# OBSAH


Předmluva . . . . . 13

**1. Elektrostatika** . . . . . 17
1.1 Elektrický náboj . . . . . 17
1.1.1 Vlastnosti elektrického náboje . . . . . 17
1.1.2 Coulombův zákon . . . . . 20
1.1.3 Velikost elektrického náboje . . . . . 23
1.1.4 Hustota elektrického náboje . . . . . 25
1.1.5 Potenciální energie soustavy nábojů . . . . . 27
1.1.6 Řešené příklady . . . . . 29
a) Rovnováha soustavy statických nábojů . . . . . 29
b) Elektrostatická energie iontového krystalu . . . . . 31
1.2 Elektrostatické pole ve vakuu . . . . . 32
1.2.1 Vektor intenzity elektrostatického pole bodových nábojů . . . . . 32
1.2.2 Tok intenzity elektrostatického pole bodových nábojů . . . . . 35
1.2.3 Potenciál elektrostatického pole bodových nábojů . . . . . 38
1.2.4 Elektrostatické pole obecně rozložených nábojů . . . . . 42
1.2.5 Gaussův zákon pro obecné elektrostatické pole . . . . . 46
1.2.6 Nabitá plocha v elektrostatickém poli . . . . . 48
1.2.7 Poissonova a Laplaceova rovnice . . . . . 50
1.2.8 Hustota energie elektrostatického pole . . . . . 51
1.2.9 Řešené příklady . . . . . 52
a) Nabitá přímka . . . . . 53
b) Nabitá rovina . . . . . 54
c) Dvojice rovnoběžných nabitých rovin . . . . . 56
d) Nabitá rovinná vrstva . . . . . 57
e) Nabitá kulová slupka . . . . . 58
f) Nabitá koule . . . . . 59
g) Nabitá nekonečná válcová plocha a válec . . . . . 60
h) Pole a potenciál na ose nabité kružnice . . . . . 61
i) Elektrostatické pole na ose válcové elektrody . . . . . 62
j) Elektrostatické pole na ose kulového pásu . . . . . 62
k) Elektrostatická energie nabité koule . . . . . 63
1.3 Elektrický dipól . . . . . 64
1.3.1 Vlastnosti elektrického dipólu . . . . . 64
*1.3.2 Multipólový rozvoj elektrostatického pole . . . . . 70
*1.3.3 Elektrická dvojvrstva . . . . . 74
*1.3.4 Objemové rozložení elektrických dipólů . . . . . 76
1.3.5 Řešené příklady . . . . . 79
a) Síla působící mezi dvěma elektrickými dipóly . . . . . 79
b) Elektrický kvadrupólový moment elipsoidu . . . . . 80

c) Polarizovaný válec a rovinná vrstva . . . . . 81
d) Polarizovaná koule . . . . . 83
1.4 Elektrostatické pole nabitých vodičů . . . . . 85
1.4.1 Vodiče a nevodiče . . . . . 85
1.4.2 Chování vodičů v elektrostatickém poli . . . . . 88
*1.4.3 Nepřímé ověření Coulombova zákona . . . . . 91
1.4.4 Základní úloha elektrostatiky . . . . . 95
1.4.5 Kapacita a kondenzátor . . . . . 98
1.4.6 Energie soustavy nabitých vodičů . . . . . 104
1.4.7 Řešené příklady . . . . . 108
a) Bodový náboj a vodivá rovina . . . . . 108
b) Kulové elektrostatické zobrazení . . . . . 110
c) Vodivá koule v homogenním elektrostatickém poli . . . . . 112
d) Kapacita kulového kondenzátoru . . . . . 113
e) Kapacita válcového kondenzátoru . . . . . 113
f) Kapacita dvoulinky . . . . . 114
g) Mechanické napětí nabitých vodičů . . . . . 115
h) Elektrostatické měřicí přístroje . . . . . 116
1.5 Elektrostatické pole v dielektrikách . . . . . 117
1.5.1 Dielektrika v elektrostatickém poli . . . . . 117
1.5.2 Polarizace dielektrika . . . . . 120
1.5.3 Gaussův zákon pro elektrostatické pole v dielektriku . . . . . 122
1.5.4 Materiálové vztahy, elektrická susceptibilita a permitivita . . . . . 124
*1.5.5 Energie elektrostatického pole v dielektriku . . . . . 127
1.5.6 Řešené příklady . . . . . 130
a) Volné náboje a nabité vodiče v dielektriku . . . . . 130
b) Elektrické pole na rozhraní dvou dielektrik . . . . . 131
c) Dielektrická koule a elipsoid v homogenním elektrostatickém poli 131
d) Pole v dutině vytvořené v homogenním dielektriku . . . . . 133
Úlohy ke kapitole 1 . . . . . 134

**2. *Silové působení mezi pohybujícími se náboji** . . . . . 139
2.1 Základní vztahy relativistické mechaniky . . . . . 139
2.1.1 Einsteinův princip relativity . . . . . 139
2.1.2 Lorentzova transformace . . . . . 142
2.1.3 Relativistická dynamika . . . . . 145
2.2 Pole pohybujících se nábojů . . . . . 147
2.2.1 Pohybující se bodový náboj . . . . . 147
2.2.1 Pole náboje pohybujícího se rovnoměrně malou rychlostí . . . . . 150
2.2.2 Pole náboje pohybujícího se rovnoměrně libovolnou rychlostí . . . . . 154
2.2.3 Pole náboje pohybujícího se libovolným způsobem . . . . . 163
2.2.5 Řešené příklady . . . . . 166
a) Pole přímého nábojového paprsku . . . . . 166

b) Pole roviny vytvořené rovnoběžnými nábojovými paprsky . . . . . 167
c) Síly působící mezi nábojovými paprsky . . . . . 168
d) Transformace složek elektrického a magnetického pole . . . . . 170

**3. Stacionární pole** . . . . . 175
3.1 Elektrický proud . . . . . 176
3.1.1 Pojem elektrického proudu, hustota proudu . . . . . 176
3.1.2 Mechanismy vedení proudu . . . . . 179
3.1.3 Rovnice kontinuity proudu . . . . . 181
3.2 Stacionární elektrické pole a elektrický obvod . . . . . 182
3.2.1 Základní vlastnosti stacionárního elektrického pole . . . . . 182
3.2.2 Ohmův zákon pro homogenní vodiče . . . . . 184
3.2.3 Ohmův zákon pro nehomogenní vodiče . . . . . 188
3.2.4 Kirchhoffova pravidla pro stacionární obvod . . . . . 192
3.2.5 Práce a výkon v elektrickém obvodu, Jouleův zákon . . . . . 194
3.2.6 Řešené příklady . . . . . 197
a) Podobnost elektrostatického a stacionárního elektrického pole . . . 197
b) Řazení odporů . . . . . 199
c) Transformace hvězda trojúhelník . . . . . 199
d) Výkonové přizpůsobení spotřebiče . . . . . 200
3.3 Stacionární magnetické pole . . . . . 201
3.3.1 Vektor magnetické indukce . . . . . 202
3.3.2 Ampèrův zákon pro magnetické pole ve vakuu . . . . . 204
3.3.3 Vektorový potenciál, Biotův-Savartův vzorec . . . . . 207
*3.3.4 Magnetické pole v místech s nenulovou hustotou proudu, pole plošných proudů . . . . . 213
3.3.5 Řešené příklady . . . . . 215
a) Magnetické pole přímého vodiče . . . . . 216
b) Magnetická indukce na ose kruhového závitu . . . . . 219
c) Magnetická indukce na ose solenoidu . . . . . 219
d) Magnetická indukce toroidu . . . . . 220
e) Vektorový potenciál homogenního pole a nekonečně dlouhého solenoidu . . . . . 222
3.4 Magnetický dipól . . . . . 223
3.4.1 Magnetický dipólový moment rovinné proudové smyčky . . . . . 224
3.4.2 Potenciální energie a silové účinky magnetického pole na magnetický dipól . . . . . 226
*3.4.3 Multipólový rozvoj magnetického pole . . . . . 227
*3.4.4 Objemové rozložení magnetických dipólů . . . . . 228
*3.4.5 Magnetická dvojvrstva . . . . . 230
3.4.6 Řešené příklady . . . . . 232
a) Magnetický dipólový moment nabité částice konající rovnoměrný kruhový pohyb . . . . . 232

b) Magnetický dipólový moment rotující nabité koule . . . . . 233
3.5 Magnetické pole v látkách . . . . . 234
3.5.1 Chování látek v magnetickém poli . . . . . 234
3.5.2 Magnetická polarizace (magnetizace) látek, magnetizační proudy . . . . 236
3.5.3 Ampèrův zákon v látkovém prostředí . . . . . 240
3.5.4 Materiálové vztahy, magnetická susceptibilita a permeabilita . . . . . 242
3.5.5 Magnetický obvod . . . . . 247
3.5.6 Magnetostatické pole . . . . . 250
3.5.7 Řešené příklady . . . . . 252
a) Magnetické pole na rozhraní dvou prostředí . . . . . 252
b) Toroidní jádro se vzduchovou mezerou . . . . . 253
c) Koule v homogenním magnetickém poli . . . . . 255
d) Elipsoid magnetovaný ve směru hlavní osy . . . . . 256
Úlohy ke kapitole 3 . . . . . 258

**4. Kvazistacionární elektrické a magnetické pole** . . . . . 261
4.1 Elektromagnetická indukce . . . . . 262
4.1.1 Zákon elektromagnetické indukce . . . . . 262
4.1.2 Souvislost mezi elektromagnetickou indukcí a silovými účinky magnetického pole . . . . . 265
a) Pohyb přímého vodiče v homogenním magnetickém poli . . . . . 265
b) Princip elektrického stroje . . . . . 266
c) Princip fluxmetru . . . . . 269
4.1.3 Obecné vlastnosti kvazistacionárního pole . . . . . 271
4.1.4 Vlastní a vzájemná indukčnost vodičů . . . . . 275
4.1.5 Řešené příklady . . . . . 277
a) Demonstrace platnosti Ampèrova zákona (měřicí transformátor) . 277
b) Vlastní indukčnost přímých vodičů . . . . . 279
c) Vlastní indukčnost kruhové smyčky . . . . . 280
d) Vlastní indukčnost solenoidu . . . . . 281
e) Vlastní indukčnost toroidu . . . . . 281
f) Vzájemná indukčnost dvou souosých smyček . . . . . 282
g) Vzájemná indukčnost dvojice souosých válcových cívek . . . . . 283
4.2 Kvazistacionární elektrický obvod . . . . . 284
4.2.1 Kirchhoffova pravidla pro kvazistacionární obvod . . . . . 284
4.2.2 Generace střídavého harmonického napětí, střídavé obvody . . . . . 289
4.2.3 Indukčně vázané obvody, transformátor . . . . . 294
4.2.4 Řešené příklady . . . . . 299
a) Neustálený stav v obvodech s indukčností a kapacitou . . . . . 299
b) Sériový rezonanční obvod . . . . . 301
c) Vlastní kmity indukčně vázaných oscilačních obvodů . . . . . 304
4.3 Energie kvazistacionárního pole . . . . . 306
4.3.1 Zákon zachování energie v kvazistacionárních soustavách . . . . . 306

*4.3.2 Obecné vyjádření energie magnetického pole . . . . . 308
*4.3.3 Obecné vyjádření sil v magnetickém poli . . . . . 312
4.3.4 Řešené příklady . . . . . 314
a) Síly působící mezi póly elektromagnetu . . . . . 314
b) Hysterezní ztráty ve feromagnetiku . . . . . 315
c) Střední hodnota výkonu ve střídavém obvodu . . . . . 316
d) Magnetoelektrický měřicí přístroj . . . . . 317
Úlohy ke kapitole 4 . . . . . 322

**5. Elektromagnetické pole** . . . . . 325
5.1 Maxwellovy rovnice . . . . . 326
5.1.1 Indukované elektrické pole . . . . . 327
5.1.2 Magnetické pole posuvného proudu . . . . . 331
5.1.3 Úplná soustava Maxwellových rovnic . . . . . 334
5.1.4 Potenciály elektromagnetického pole . . . . . 338
5.2 Energie a hybnost elektromagnetického pole . . . . . 341
5.2.1 Poyntingova věta . . . . . 341
*5.2.2 Hybnost elektromagnetického pole . . . . . 344
*5.2.3 Termodynamické vztahy v přítomnosti elektromagnetického pole . . . 347
5.3 Elektromagnetické vlny . . . . . 352
5.3.1 Rovinná elektromagnetická vlna . . . . . 352
5.3.2 Monochromatická rovinná vlna . . . . . 356
*5.3.3 Vyzařování elektromagnetických vln . . . . . 359
5.3.4 Řešené příklady . . . . . 364
a) Odraz a lom elektromagnetických vln . . . . . 364
b) Tlak záření . . . . . 366
c) Povrchový jev (skinefekt) . . . . . 367
5.4 *Lorentzovy rovnice . . . . . 369
5.4.1 Mikroskopický popis elektromagnetického pole . . . . . 371
5.4.2 Odvození Maxwellových rovnic z rovnic Lorentzových . . . . . 373
Úlohy ke kapitole 5 . . . . . 375

**6. Pohyb částice v elektromagnetickém poli** . . . . . 377
6.1 Nabitá částice v elektromagnetickém poli . . . . . 378
6.1.1 Pohybová rovnice . . . . . 378
*6.1.2 Energie a hybnost částice . . . . . 379
6.1.3 Pohyb v časově neproměnném homogenním poli . . . . . 382
a) Homogenní elektrické pole . . . . . 382
b) Homogenní magnetické pole . . . . . 383
c) Vzájemně kolmé elektrické a magnetické pole . . . . . 385
*6.1.4 Pohyb v nehomogenním osově symetrickém magnetickém poli . . . . . 387
6.2 Pohyb gyromagnetické částice v magnetickém poli . . . . . 389
6.2.1 Pohybová rovnice . . . . . 389

6.2.2 Larmorova precese . . . . . 390
6.3 Příklady použití . . . . . 392
6.3.1 Principy částicové optiky . . . . . 392
6.3.2 Urychlovače nabitých částic . . . . . 396
a) Elektrostatické urychlovače . . . . . 397
b) Lineární (rezonační) urychlovač . . . . . 398
c) Cyklotron . . . . . 398
d) Betatron . . . . . 399
6.3.3 Hmotnostní spektroskopie . . . . . 401
6.3.4 Magnetická rezonance . . . . . 402
Úlohy ke kapitole 6 . . . . . 404

**7. Elektrické a magnetické vlastnosti látek** . . . . . 407
*7.1 Elektronová struktura látek . . . . . 408
7.1.1 Energie elektronů v atomech a molekulách . . . . . 408
7.1.2 Energie elektronů v kondenzovaných látkách . . . . . 414
7.1.3 Elektronový plyn . . . . . 416
7.1.4 Elektrické a magnetické momenty atomů a molekul . . . . . 419
7.2 Dielektrická a magnetická polarizace . . . . . 422
7.2.1 Dielektrika . . . . . 422
7.2.2 Diamagnetismus a paramagnetismus . . . . . 427
7.2.3 Magneticky uspořádané látky . . . . . 431
*7.2.4 Metamateriály . . . . . 435
7.3 Vedení proudu v pevných látkách . . . . . 435
7.3.1 Obecné charakteristiky vedení proudu v pevných látkách . . . . . 435
7.3.2 Vodivost kovů . . . . . 439
7.3.3 Kontaktní napětí a termoelektrické jevy v kovech . . . . . 443
7.3.4 Vlastní a příměsová vodivost polovodičů, vlastnosti přechodu *p-n* . . . 448
7.3.5 Supravodivost . . . . . 454
7.3.6 Elektronová emise . . . . . 459
7.3.7 Nenasycený emisní proud, princip elektronky . . . . . 462
7.4 Vedení proudu v kapalinách . . . . . 464
7.4.1 Měrná a molární vodivost roztoků . . . . . 464
7.4.2 Elektrolýza, Faradayovy zákony . . . . . 467
7.4.3 Elektrochemické procesy na elektrodách – elektrodové potenciály, galvanické články . . . . . 468
a) Primární články . . . . . 472
b) Sekundární články . . . . . 473
c) Palivové články . . . . . 474
7.4.4 *Polarografie . . . . . 475
7.5 Vedení proudu v plynech . . . . . 476
7.5.1 Nesamostatná vodivost . . . . . 477
7.5.2 Doutnavý a obloukový výboj . . . . . 478

7.6 Základy teorie materiálových konstant . . . . . 481
7.6.1 Permitivita nepolárních látek (Clausiův-Mosottiův vztah). . . . . 481
7.6.2 Langevinova teorie diamagnetismu atomů a molekul . . . . . 484
7.6.3 Susceptibilita nekovových paramagnetik, permitivita polárních látek (Langevinova teorie) . . . . . 486
a) Magnetická susceptibilita paramagnetik . . . . . 486
b) Permitivita polárních látek. . . . . 488
7.6.4 Obecné podmínky platnosti Ohmova zákona, fyzikální podstata Hallova jevu . . . . . 489
7.6.5 Drudeho teorie vodivosti kovů. . . . . 491
7.6.6 Výklad vodivosti roztoků. . . . . 494
7.6.7 Výklad nesamostatné vodivosti plynů, podmínky pro vznik samostatného výboje . . . . . 497
Úlohy ke kapitole 7 . . . . . 499

**8. Základy teorie elektrických obvodů**. . . . . 503
8.1 Základní pojmy . . . . . 503
8.1.1 Klasifikace elektrických obvodů a jejich prvků. . . . . 503
8.1.2 Základní vlastnosti elektrických dvojpólů a čtyřpólů . . . . . 506
a) Dvojpól . . . . . 506
b) Čtyřpól . . . . . 508
8.2 Stejnosměrné a střídavé lineární obvody v ustáleném stavu . . . . . 510
8.2.1 Ohmův zákon a Kirchhoffova pravidla v komplexní symbolice . . . . . 510
8.2.2 Vlastnosti reálných dvojpólů . . . . . 514
a) Náhradní schéma lineárního zdroje . . . . . 516
b) Náhradní schéma kondenzátoru. . . . . 518
c) Náhradní schéma cívky . . . . . 519
8.2.3 Věta o superpozici. . . . . 521
8.2.4 Obecné metody analýzy lineárních obvodů v ustáleném stavu . . . . . 522
a) Přímá aplikace Kirchhoffovych pravidel. . . . . 522
b) Metoda smyčkových proudů. . . . . 524
c) Metoda uzlových napětí . . . . . 527
8.2.5 Thévéninova věta . . . . . 529
*8.2.6 Obvody se vzájemnou indukčností . . . . . 531
8.2.7 Řešené příklady . . . . . 534
a) Sériové a paralelní rezonanční obvody . . . . . 534
b) Wheatstonův můstek . . . . . 537
c) Thomsonův dvojmost . . . . . 540
d) Měření napětí a proudů v obvodech. . . . . 542
8.3 Vybrané typy obecnějších obvodů . . . . . 544
8.3.1 Nesinusové střídavé lineární obvody v ustáleném stavu. . . . . 544
8.3.2 Neustálený stav v lineárních obvodech. . . . . 548
8.3.3 Příklady řešení nelineárních obvodů . . . . . 548

a) Stabilizace napětí Zenerovou diodou . . . . . 550
b) Stanovení pracovního bodu tranzistoru . . . . . 551
c) Náhradní schéma linearizovaného čtyřpólu . . . . . 554
Úlohy ke kapitole 8 . . . . . 555

**Dodatek 1 Přehled vektorové analýzy** . . . . . 559
a) Skalární a vektorové veličiny . . . . . 559
b) Součiny vektorů . . . . . 561
c) Transformační vlastnosti vektorů . . . . . 564
d) Skalární a vektorová pole . . . . . 565
e) Gradient skalárního pole . . . . . 568
f) Divergence vektorového pole . . . . . 570
g) Rotace vektorového pole . . . . . 574
h) Operátory $(\boldsymbol{a}\nabla)$ a $\Delta$ . . . . . 577
i) Vektorová pole potenciální a solenoidální . . . . . 579
j) Některé integrální věty vektorové analýzy . . . . . 581
k) Úlohy k dodatku 1 . . . . . 582

**Dodatek 2 Soustavy fyzikálních jednotek** . . . . . 583
a) Charakteristiky soustav jednotek . . . . . 583
b) Vývoj elektrických a magnetických jednotek . . . . . 587
c) Přehled rovnic elektromagnetického pole v Gaussově soustavě . . . . . 591
d) Převodní vztahy jednotek elektrických a magnetických veličin v Mezinárodní a Gaussově soustavě . . . . . 593
e) Vybrané základní fyzikální konstanty . . . . . 600

**Historický přehled** . . . . . 603
Od Thaleta ke Gilbertovi . . . . . 603
Od Gilberta ke Coulombovi . . . . . 605
Od Coulomba k Ampèrovi . . . . . 608
Od Ampèra k Maxwellovi . . . . . 610
Od Maxwella k Einsteinovi . . . . . 614
Od Einsteina k dnešku . . . . . 618
Výzkum elektřiny a magnetismu v našich zemích . . . . . 623

**Výsledky a návody řešení úloh** . . . . . 625

**Literatura** . . . . . 633

**Rejstřík** . . . . . 635

# Předmluva k prvnímu elektronickému vydání

Pro předkládané první elektronické vydání učebnice byly odstraněny nedostatky předchozího vydání – vesměs formální povahy –, aktualizován historický přehled a doplněny odkazy na literaturu pro další studium některých kapitol.

Podobně jako v předchozích vydáních, i nyní plníme milou povinnost poděkovat pracovníkům Nakladatelství Karolinum za přípravu a realizaci vydání knihy.

*Bedřich Sedlák, Ivan Štoll* (†)

# Předmluva

První vydání této podrobné vysokoškolské učebnice elektřiny a magnetismu, jedné ze stěžejních součástí základního kurzu fyziky, vyšlo v roce 1993 jako společná publikace nakladatelství Academia a nakladatelství Univerzity Karlovy Karolinum. Její obsah a pojetí představuje syntézu přístupů a zkušeností obou autorů z výuky na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze a na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT.

Výklad je v učebnici veden induktivním způsobem; látka je rozdělena do osmi kapitol a každá z nich je doplněna i výběrem úloh k samostatnému řešení. Jelikož výuka daného oboru na potřebné vysokoškolské úrovni není možná bez použití metod vektorové analýzy, jejichž výklad je ve výuce matematiky obvykle zařazen do vyšších semestrů, je její stručný výklad podán v Dodatku 1. Dodatek 2 je věnován přehledu soustav fyzikálních jednotek používaných při měření elektrických a magnetických veličin a také přehledu fyzikálních konstant.

Základní linii výkladu tvoří makroskopické fenomenologické teorie, které ve 2. polovině 19. století vyvrcholily Maxwellovou teorií elektromagnetického pole. Jelikož se však od počátku 20. století zároveň bouřlivě rozvíjejí mikrofyzikální přístupy, jejichž základní složky tvoří kvantová mechanika, kvantová elektrodynamika a statistická fyzika, jsou tyto přístupy – alespoň orientačně – použity, a to

především v 7. kapitole; výklad je doplňován odkazy na příslušnou literaturu. Pro snazší orientaci čtenáře v textu jsou partie knihy, doplňující výklad o hlediska a postupy odlišné od hlavní linie výkladu, nebo partie, které doplňují výklad způsobem, jenž může být při prvním čtení vynechán, graficky odlišeny tak, že jsou buď označeny hvězdičkou (*) (například kapitola 2, článek 5.2.3, oddíl 5.4, oddíl 7.1), nebo jsou vytištěny petitem. K pochopení souvislostí a pro představu o vývoji poznatků o elektrických a magnetických jevech je také na konec knihy zařazen *Historický přehled*.

Druhé, opravené, doplněné a aktualizované vydání, které vyšlo v roce 2002 v nakladatelství ACADEMIA s finanční podporou AV ČR a bylo připraveno s mimořádnou péčí pracovníků redakce přírodovědné literatury tohoto nakladatelství, zachovalo základní obsahové pojetí knihy i základní linii výkladu. V jednotlivostech se však druhé vydání od prvního nezanedbatelně lišilo. Kromě oprav nalezených chyb, zpřesnění některých formulací a doplnění a rozšíření řešených příkladů a úloh byly aktualizovány partie knihy, v jejichž oborech došlo k významnému posuvu stavu poznání; tyto úpravy se týkaly zejména 7. kapitoly a Historického přehledu. Modernizován a doplněn byl rovněž Dodatek 2, především s ohledem na poslední adjustaci základních fyzikálních konstant.

Jelikož je náklad 2. vydání učebnice již řadu let rozebrán, její potřeba je na obou zúčastněných fakultách velmi aktuální – a navíc si kniha v průběhu let od prvního vydání získala oblibu a je používána i na jiných fakultách – dochází proto k jejímu třetímu vydání, tentokrát znovu v Nakladatelství Karolinum, s dotací Univerzity Karlovy. Pro toto vydání byly opraveny nalezené chyby, znovu aktualizována zejména kapitola 7, Dodatek 2 a Historický přehled.

Je naší milou povinností poděkovat pracovníkům Nakladatelství Karolinum za vzornou přípravu a realizaci tisku. Náš nemenší dík patří všem, kdo nám pomohli při úpravách rukopisu třetího vydání i přípravě jeho tisku; především děkujeme recenzentovi prof. RNDr. Petru Dubovi, CSc., za mimořádně pečlivé provedení recenze i za připomínky a náměty, které velmi pomohly zvýšit kvalitu a aktualizaci obsahu učebnice. Dále děkujeme RNDr. Václavu Havlíčkovi, CSc., za spolupráci a mimořádnou vstřícnost při přípravě rukopisu do tisku.

*Bedřich Sedlák, Ivan Štoll*

# /1/
# Elektrostatika

## 1.1 ELEKTRICKÝ NÁBOJ

### 1.1.1 VLASTNOSTI ELEKTRICKÉHO NÁBOJE

Na základě pokusů s elektřinou víme, že některá tělesa (například skleněná či ebonitová tyč po předchozím tření) mohou za určitých podmínek silově působit na jiná tělesa. Toto silové působení si vysvětlujeme přítomností *elektrických nábojů.* Elektrický náboj představuje pro nás výchozí fyzikální veličinu, přičemž mírou jejího množství a rozložení na příslušných tělesech je právě silové působení mezi nimi. Elektrický náboj je veličinou skalární, podobně jako hmotnost, a k jeho určení postačí jediná (reálná) číselná hodnota. Skutečnost, že síly elektrického působení mezi tělesy mohou být jak přitažlivé, tak odpudivé, vysvětlujeme tím, že elektrický náboj může nabývat kladných i záporných hodnot – tělesa se souhlasným znamením náboje se přitom odpuzují, tělesa s nesouhlasným znamením náboje se přitahují. Tělesa, která nesou elektrický náboj, nazýváme *kladně či záporně nabitá,* tělesa o nulovém náboji jsou elektricky *neutrální*, nenabitá. Často se setkáváme s případem, kdy na tělesech jsou odděleně rozloženy kladné a záporné elektrické náboje o téže absolutní hodnotě. Taková tělesa budou také

elektricky silově působit, přestože jejich celkový elektrický náboj je nulový. Říkáme jim *polarizovaná.*

O přítomnosti elektrického náboje se přesvědčujeme pouze na základě jeho silového působení. Znamená to, že existenci jednoho jediného náboje bychom nemohli nijak odhalit. Kdyby existovaly pouze dva náboje, mohli bychom určit, zda jsou souhlasného či nesouhlasného znamení; nemohli bychom však rozhodnout ani o znamení, ani o velikosti těchto nábojů. Teprve jsou-li k dispozici alespoň tři náboje, můžeme jeden z nich vybrat jako jednotkový a kladný a ze silového působení určit velikost a znamení druhých dvou nábojů.

Co je vlastní podstatou elektrického náboje, nevíme. Na základě poznatků současné mikrofyziky jej můžeme považovat za jednu z vlastností některých elementárních částic, která podmiňuje jejich vzájemné působení. Rozlišujeme čtyři základní typy vzájemného působení (interakce) mezi elementárními částicemi: gravitační, slabé, elektromagnetické a silné. *Gravitační interakce* je univerzální a týká se všech částic. Setkali jsme se s ní v mechanice, její velikost udává Newtonův gravitační zákon a její podstatu se snaží objasnit obecná teorie relativity. *Slabá interakce* se projevuje u některých typů radioaktivního rozpadu za účasti neutrina. Podobně *elektromagnetická interakce* se uplatňuje mezi elementárními částicemi a jednou z jejích charakteristik je elektrický náboj. *Silná interakce* existuje mezi částicemi, které nazýváme hadrony, a drží pohromadě atomové jádro, které by se jinak odpudivými elektrickými silami působícími mezi protony muselo rozletět.

Současný rozvoj mikrofyziky naznačuje, že hadrony, které jsme dříve považovali za elementární, mají svoji strukturu a komponenty. Předpokládáme o nich, že jsou tvořeny tzv. *kvarky.* Na současné úrovni vystupují tedy jako elementární kvarky a leptony (k nim patří elektron, mion, tauon a odpovídající neutrina), jejich antičástice a dále pak částice, které zprostředkují interakci mezi nimi. U gravitační interakce jsou to dosud hypotetické gravitony, u slabé nedávno objevené intermediální bosony, u elektromagnetické fotony a u silné gluony [1].

Elementární částice vytvářejí složitější struktury, atomová jádra, atomy[1], molekuly, jejichž vzájemné působení nabývá rovněž složitého charakteru. V denním životě se setkáváme s projevy působení gravitačního a elektromagnetického, které je ze všech nejlépe prozkoumáno. Nejen síly elektrostatické a elektrodynamické, ale i magnetické, optické, chemické a biologické jevy, chemické vazby a uvolňování chemické energie, mezimolekulární síly podmiňující soudržnost těles, přilnavost a tření, síly svalové kontrakce, tepelné působení slunečního záření a mnoho dalších jevů má svůj původ ve vzájemném působení elektrických nábojů.

Síly elektromagnetického působení mohou být přitažlivé i odpudivé, mohou složitým způsobem záviset na vzdálenosti, směru v prostoru a vzájemné poloze těles, na rychlosti jejich pohybu, vlastnostech prostředí, obecně nemusí působit ve směru spojnice interagujících těles, a dokonce nemusí ani splňovat Newtonův zákon akce a reakce.

Elektrický náboj má některé základní vlastnosti, které vyplývají z experimentálních pozorování a uplatňují se i při vzájemné interakci nabitých částic. Tyto vlastností vyjadřuje:

---

1 Objevitelem atomu je anglický fyzik *Ernest Rutherford*, který úspěšně interpretoval výsledky rozptylu α částic H. Geigera a Marsdena (Proc. Roy. Soc. 82 (1909) 495); jeho základní práce byla publikována v Phil. Mag. 21 (1911), str. 669.

1. **Zákon zachování náboje**. *Elektrický náboj je nestvořitelný a nezničitelný*. Jinak řečeno, celkové množství elektrického náboje v elektricky izolované soustavě (jejíž hranicí nemohou procházet náboje) zůstává neměnné. Dochází-li ke srážkám částic, je celkový náboj před reakcí roven celkovému náboji po reakci. První experimentální důkaz tohoto zákona podal Faraday v r. 1843 elektrometrickým měřením náboje nabité koule v izolovaném prostoru. Matematické vyjádření tohoto zákona je dáno tzv. rovnicí kontinuity proudu, kterou uvedeme v článku 3.1.3.

2. **Zákon invariantnosti náboje**. *Velikost elektrického náboje se při pohybu nemění.* Jinak řečeno, při všech transformacích vztažné soustavy zůstává velikost náboje invariantní. Takovou vlastnost má jen málo fyzikálních veličin; například hmotnost částice roste jak známo s rychlostí.

Jedním z experimentálních argumentů svědčících o invariantnosti náboje je skutečnost, že atomy a molekuly jsou elektricky neutrální. Atom helia a molekula těžkého vodíku $D_2$ jsou tvořeny týmiž částicemi – dvěma protony, dvěma neutrony a dvěma elektrony. Pohyb nabitých částic v těchto dvou soustavách je jistě podstatně odlišný a přitom obě zůstávají elektricky neutrální. V šedesátých letech 20. století byly prováděny přesné pokusy s odchylováním svazků atomů cesia a molekul vodíku v silném elektrickém poli, které prokázaly, že atomy jsou elektricky neutrální s přesností na dvacet desetinných míst velikosti elementárního náboje.[2]

3. **Zákon kvantování náboje**. *Existuje nejmenší, dále nedělitelný elektrický náboj, který nazýváme elementárním, a všechny elektrické náboje mají velikost, která je jeho celistvým násobkem.* Tento atomismus elektřiny souvisí s tím, že elektrický náboj je vlastností částic látky. Velikost elementárního náboje je možné určit pomocí celé řady experimentů, např. klasického Millikanova pokusu (1911), viz článek 1.1.3.

Kladný elementární náboj má například proton, který patří mezi hadrony. Kvarky jako komponenty hadronů mají podle předpokladů náboje o velikosti jedné třetiny a dvou třetin elementárního náboje. Tato okolnost však nemění nic na faktu kvantování náboje.

Pokud jde o vlastnosti nabitých částic, jsou pozoruhodné ještě dvě okolnosti. Jednou z nich je existence *částic a antičástic*. Ke každé částici existuje antičástice, které se vzájemně liší znamením elektrického náboje.[3] Protože elektrické síly závisejí pouze na souhlasnosti či nesouhlasnosti znamení náboje, mohla by existovat antilátka, kde by nukleony v atomových jádrech byly nahrazeny antinukleony a elektrony atomových obalů svými antičásticemi – pozitrony. Tyto úvahy mají velký význam i pro kosmologii a vyjadřují jednu ze základních symetrií přírody.

Druhá ze zmíněných okolností je *nábojová kvazineutralita* vesmíru. V dostatečně velkých objemech se celkový počet kladných i záporných nábojů vždy

---

2 J. C. Zorn et al. Phys. Rev. 129 (1963), str. 2566, J. G. King, Phys. Rev. Lett. 5 (1960), str. 562.

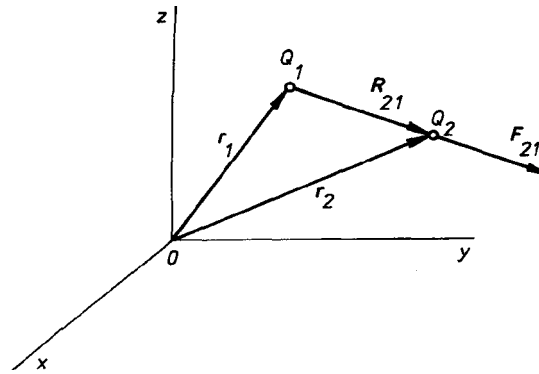
3 Částice a antičástice se liší též znaménkem magnetického momentu a některých dalších tzv. kvantových čísel (leptonový a baryonový náboj, podivnost, půvab aj.), která charakterizují jejich vzájemné interakce. Existuje několik částic, které jsou se svými antičásticemi totožné (například foton) [1].

vyrovnává a látka, jak se s ní běžně setkáváme v tuhém, kapalném a plynném skupenství, se jeví elektricky neutrální. Odchylky od elektrické neutrality v makroskopických měřítcích se projevují elektrickými silami, které se opět snaží elektrickou neutralitu obnovit.

### 1.1.2 COULOMBŮV ZÁKON

Při kvantitativním popisu silového působení mezi makroskopickými nabitými tělesy je výhodné v prvním přiblížení abstrahovat od způsobu rozložení náboje v objemu tělesa. Můžeme zavést pojem *bodového náboje*, který je analogický pojmu hmotného bodu v mechanice. Za bodový náboj můžeme tedy považovat nabité těleso, jehož rozměry jsou zanedbatelně malé ve srovnání se vzdálenostmi, na nichž silové působení uvažujeme.

Dvojice bodových nábojů o velikostech, $Q_1$ , $Q_2$ , které jsou umístěny ve vakuu v bodech o polohových vektorech $\boldsymbol{r}_1$, $\boldsymbol{r}_2$ a které jsou nehybné v dané inerciální soustavě souřadnic (obr. 1.1), tvoří nejjednodušší makroskopickou soustavu, na níž je možné silové působení mezi náboji studovat. Experimenty tohoto druhu provedl r. 1785 Ch. A. Coulomb s použitím torzních vah, které představují jeden z nejcitlivějších fyzikálních přístrojů.




Obr. 1.1 K vzájemnému silovému působení dvou bodových nábojů.

Sílu působící mezi dvěma malými nabitými kuličkami lze měřit z úhlu zkrutu α dlouhého a tenkého vlákna délky $l$ a poloměru průřezu $R$. Úhel α se zjišťuje odrazem světelného paprsku od zrcátka Z spojeného s vláknem. Na konci vlákna je zavěšeno vodorovné vahadélko s malými stejnými kuličkami na koncích. Jedna z těchto pohyblivých kuliček nesoucí elektrický náboj $Q_2$ se ustálí v rovnovážné poloze vůči nehybné kuličce o náboji $Q_1$ ve vzdálenosti $R_{21}$ (viz obr. 1.2). Jak uvidíme později, nabitá kulička se navenek chová tak, jakoby elektrický náboj byl umístěn v jejím středu a popsané uspořádání tedy umožňuje měřit síly působící mezi bodovými náboji. Moment tangenciální síly $\boldsymbol{F}_t$ se musí rovnat torznímu momentu $\boldsymbol{D}$ takže platí