

# Kazalo

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>15</b>
1.1.	Kaj je teorija polja? . . . . .	15
1.2.	Koncept polja in delovanje na daljavo . . . . .	15
1.3.	So fundamentalna polja ali potenciali? . . . . .	15
1.4.	Klasična in kvantna teorija polja . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Matematični repetitorij</b>	<b>17</b>
2.1.	Vektorji . . . . .	17
2.2.	Tenzorji . . . . .	19
2.3.	Štirivektorji . . . . .	20
2.4.	Štiritenzorji . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Statično električno polje</b>	<b>23</b>
3.1.	Coulombova sila med naboji . . . . .	23
3.2.	Velikost in enota električnega naboja . . . . .	23
3.3.	Jakost električnega polja . . . . .	24
3.4.	Velikost in enota jakosti električnega polja . . . . .	24
3.5.	Električne silnice . . . . .	25
3.6.	Električna cirkulacija . . . . .	26
3.7.	Električni pretok . . . . .	27
3.8.	Električni potencial . . . . .	28
3.9.	Diferencialni operator $\nabla$ . . . . .	28
3.10.	Velikost in enota za električni potencial . . . . .	30
3.11.	Ekvipotencialne ploskve . . . . .	30
3.12.	Princip superpozicije . . . . .	31
3.13.	Gostota naboja . . . . .	32
3.14.	Diracova delta funkcija . . . . .	32
3.15.	Primeri gostote naboja . . . . .	35
3.15.1.	Točkast naboj . . . . .	35
3.15.2.	Točkast dipol . . . . .	35
3.15.3.	Površinsko porazdeljen naboj . . . . .	35
3.15.4.	Površinsko porazdeljen dipol . . . . .	36

3.15.5.	Volumsko porazdeljen naboj . . . . .	36
3.15.6.	Volumsko porazdeljen dipol . . . . .	36
3.16.	Integralna oblika Gaussovega izreka . . . . .	37
3.17.	Izrek Gaussa - Ostrogradskega . . . . .	38
3.18.	Diferencialna oblika Gaussovega izreka . . . . .	38
3.19.	Primeri električnih polj . . . . .	39
3.19.1.	Električno polje površinske porazdelitve naboja . . . . .	39
3.19.2.	Električno polje površinske porazdelitve dipola . . . . .	39
3.20.	Maxwellovi enačbi za statično električno polje . . . . .	40
3.21.	Poissonova in Laplaceova enačba . . . . .	41
3.21.1.	Greenova funkcija Poissonove enačbe . . . . .	41
3.21.2.	Greenova funkcija v neskončnem homogenem prostoru . . . . .	43
3.21.3.	Greenova funkcija v nehomogenem prostoru . . . . .	43
3.21.4.	Splošna rešitev Poissonove enačbe . . . . .	45
3.21.5.	Greenova enačba . . . . .	46
3.22.	Teorem o srednji vrednosti . . . . .	47
3.23.	Earnshawjev teorem in stabilnost snovi . . . . .	48
3.24.	Thomsonov problem . . . . .	48
3.25.	Elektrostatska energija . . . . .	49
3.25.1.	Elektrostatska energija v zunanjem polju . . . . .	49
3.25.2.	Celotna elektrostatska energija polja . . . . .	50
3.25.3.	Elektrostatska energija polja kot funkcional gostote naboja . . . . .	50
3.26.	Gostota elektrostatske energije polja . . . . .	51
3.27.	Sila kot funkcional električnega polja . . . . .	52
3.28.	Napetostni tenzor električnega polja . . . . .	53
3.28.1.	Napetosti in silnice električnega polja . . . . .	54
3.29.	Sila med točkastima nabojema . . . . .	54
3.29.1.	Enaka naboja . . . . .	54
3.29.2.	Nasprotna naboja . . . . .	55
3.30.	Multipolni razvoj električnega potenciala . . . . .	55
3.31.	Polje in potencial točkastega električnega dipola . . . . .	57
3.32.	Multipolen razvoj elektrostatske energije . . . . .	58
3.33.	Sila in navor v zunanjem električnem polju . . . . .	59
<b>4</b>	<b>Statično magnetno polje</b> . . . . .	<b>61</b>
4.1.	Ampèrova sila med tokovnimi vodniki . . . . .	61
4.2.	Električni tok . . . . .	62
4.3.	Velikost in enota električnega toka . . . . .	62
4.4.	Gostota magnetnega polja . . . . .	63
4.5.	Velikost in enota gostote magnetnega polja . . . . .	63
4.6.	Magnetne silnice . . . . .	64
4.7.	Magnetna cirkulacija . . . . .	65

4.8.	Magnetni pretok . . . . .	65
4.9.	Gostota električnega toka . . . . .	66
4.10.	Primeri gostote toka . . . . .	66
4.10.1.	Gostota toka pri gibanju zvezne porazdelitve nabojev . . . . .	66
4.10.2.	Gostota toka za linearen vodnik . . . . .	67
4.10.3.	Gostota toka pri gibanju točkastega naboja . . . . .	67
4.10.4.	Povišinsko porazdeljena gostota toka . . . . .	68
4.11.	Tokovnice . . . . .	68
4.12.	Ampèrov izrek . . . . .	69
4.13.	Vektorski potencial . . . . .	69
4.14.	Vektorski potencial tuljave . . . . .	70
4.14.1.	Vektorski potencial znotraj tuljave . . . . .	70
4.14.2.	Vektorski potencial zunaj tuljave . . . . .	70
4.14.3.	Eliminacija vektorskega potenciala . . . . .	71
4.14.4.	Diracova struna . . . . .	72
4.15.	Princip superpozicije . . . . .	73
4.16.	Magnetna sila . . . . .	73
4.17.	Magnetna sila na točkast naboj . . . . .	74
4.18.	Maxwellovi enačbi za statično magnetno polje . . . . .	74
4.19.	Helmholtzov izrek . . . . .	75
4.20.	Poissonova enačba za vektorski potencial . . . . .	76
4.20.1.	Magnetni potencial ravne žice . . . . .	77
4.21.	Biot - Savartova enačba . . . . .	78
4.21.1.	Magnetno polje ravne žice . . . . .	79
4.22.	Magnetna energija . . . . .	80
4.22.1.	Magnetna energija v zunanjem polju . . . . .	80
4.22.2.	Magnetna energija polja kot funkcional gostote toka . . . . .	81
4.22.3.	Celotna magnetna energija . . . . .	81
4.23.	Gostota magnetne energije polja . . . . .	83
4.24.	Sila kot funkcional magnetnega polja . . . . .	84
4.25.	Tenzor napetosti magnetnega polja . . . . .	84
4.25.1.	Napetosti in silnice magnetnega polja . . . . .	85
4.26.	Sila med ravnima vodnikoma . . . . .	85
4.26.1.	Tokova v različnih smereh . . . . .	86
4.26.2.	Tokova v istih smereh . . . . .	86
4.27.	Multipolni razvoj magnetnega polja . . . . .	87
4.28.	Magnetno polje točkastega magnetnega dipola . . . . .	88
4.29.	Ampérova ekvivalenca . . . . .	89
4.30.	Multipolni razvoj magnetne energije . . . . .	89
4.31.	Sila in navor v zunanjem magnetnem polju . . . . .	90

<b>5</b>	<b>Kvazistatična polja</b>	<b>93</b>
5.1.	Faradayevo in Henryjevo odkritje . . . . .	93
5.2.	Maxwellova formulacija elektromagnetne indukcije . . . . .	94
5.3.	Popravljen sistem Maxwellovih enačb . . . . .	95
5.3.1.	Elektromagnetna potenciala za kvazistatična polja . . . . .	96
5.3.2.	Elektromagnetni potenciali in Maxwellove enačbe . . . . .	96
5.4.	Prevodniki in Ohmov zakon . . . . .	97
5.4.1.	Časovna konstanta prevodnika . . . . .	98
5.5.	Površina prevodnika je ekvipotencialna ploskev . . . . .	98
5.6.	Mikroskopski izvor prevodnosti . . . . .	99
5.7.	Velikost in enota električne prevodnosti . . . . .	100
5.8.	Upornost . . . . .	100
5.8.1.	Disipacija energije . . . . .	101
5.8.2.	Disipacija in elektromagnetni potenciali . . . . .	102
5.8.3.	Disipacija in voltni člen . . . . .	102
5.9.	Kapacitivnost . . . . .	103
5.9.1.	Lastna kapacitivnost krogle . . . . .	104
5.10.	Induktivnost . . . . .	105
5.10.1.	Lastna induktivnost tuljave . . . . .	106
5.11.	Časovno spreminjanje toka v vodniku . . . . .	106
5.12.	RCL tokokrog . . . . .	107
5.12.1.	Sklopljena RCL tokokroga . . . . .	108
5.12.2.	Vodnik z vsiljenim nihanjem zunanje napetosti . . . . .	109
5.13.	Kožni pojav . . . . .	110
5.13.1.	Osnovna enačba kožnega pojava . . . . .	110
5.13.2.	Geometrija polj in ustrezna rešitev . . . . .	111
5.13.3.	Tok skozi cilindrični vodnik . . . . .	112
5.13.4.	Upor kot funkcija frekvence . . . . .	112
<b>6</b>	<b>Maxwellove enačbe</b>	<b>115</b>
6.1.	Ohranjanje naboja . . . . .	115
6.2.	Maxwellov premikalni tok . . . . .	116
6.2.1.	”Maxwellov največji prispevek k fiziki” . . . . .	117
6.3.	Popoln set Maxwellovih enačb . . . . .	117
6.4.	Kvazielastični modeli Maxwellovih enačb . . . . .	118
6.5.	Ohranitveni zakoni . . . . .	119
6.5.1.	Ohranjevanje energije . . . . .	120
6.5.2.	Ohranjevanje gibalne količine . . . . .	121
6.5.3.	Ohranjevanje vrtilne količine . . . . .	124
6.6.	Stefan - Boltzmannov zakon . . . . .	126
6.7.	Virialni teorem . . . . .	127
6.8.	Ohranitveni zakoni in hitrost širjenja motnje . . . . .	128

6.9.	Simetrizacija Maxwellovih enačb . . . . .	130
6.10.	Elektromagnetna dualnost . . . . .	130
6.11.	Magnetni monopol . . . . .	132
6.11.1.	Magnetni in električni monopol . . . . .	132
6.11.2.	Diracova kvantizacija . . . . .	133
<b>7</b>	<b>Elektromagnetno polje v snovi</b>	<b>135</b>
7.1.	Električno polje v snovi . . . . .	135
7.1.1.	Vežan naboj . . . . .	135
7.1.2.	Polarizacija . . . . .	136
7.1.3.	Konstitutivna relacija za električno polje v snovi . . . . .	136
7.1.4.	Polarizacija in gostota električnega dipolnega momenta . . .	137
7.1.5.	Klasifikacija snovi po odzivu na električno polje . . . . .	138
7.2.	Magnetno polje v snovi . . . . .	139
7.2.1.	Vežan tok . . . . .	139
7.2.2.	Magnetizacija . . . . .	139
7.2.3.	Konstitutivna relacija za magnetno polje v snovi . . . . .	140
7.2.4.	Magnetizacija in gostota magnetnega dipolnega momenta .	141
7.2.5.	Klasifikacija snovi po odzivu na magnetno polje . . . . .	142
7.3.	Maxwellove enačbe v snovi . . . . .	142
7.4.	Ohranjevalni zakoni v snovi . . . . .	143
7.4.1.	Ohranjevanje energije . . . . .	143
7.4.2.	Ohranjevanje gibalne količine . . . . .	144
7.4.3.	Napetostni tenzor: Minkowski vs. Abraham . . . . .	144
7.5.	Robni pogoji za Maxwellove enačbe . . . . .	145
7.5.1.	Robni pogoj za $\mathbf{B}$ . . . . .	146
7.5.2.	Robni pogoj za $\mathbf{D}$ . . . . .	147
7.5.3.	Robni pogoj za $\mathbf{E}$ . . . . .	147
7.5.4.	Robni pogoj za $\mathbf{H}$ . . . . .	148
<b>8</b>	<b>Frekvenčna odvisnost dielektrične funkcije</b>	<b>149</b>
8.1.	Frekvenčna dekompozicija polja . . . . .	150
8.2.	Frekvenčno odvisna dielektrična funkcija . . . . .	150
8.3.	Lastnosti frekvenčno odvisne dielektrične funkcije . . . . .	151
8.3.1.	Parnost $\varepsilon(\omega)$ . . . . .	151
8.3.2.	Limita $\varepsilon(\omega \rightarrow 0)$ . . . . .	152
8.3.3.	Analitičnost $\varepsilon(\omega)$ . . . . .	152
8.3.4.	Limita $\varepsilon(\omega \rightarrow \infty)$ . . . . .	153
8.4.	Kramers-Kronigove relacije . . . . .	153
8.4.1.	Glavna vrednost integrala in Hilbertova transformacija . . .	153
8.4.2.	Plemljeva enačba . . . . .	154
8.4.3.	Hilbertove transformacije za pozitivne $\omega$ . . . . .	155

8.4.4.	Kramers - Kronigove relacije . . . . .	155
8.5.	Disipacija energije in $\Im\epsilon(\omega)$ . . . . .	156
8.6.	Modeli $\epsilon(\omega)$ . . . . .	158
8.6.1.	Gibalna enačba za vezani naboj . . . . .	158
8.6.2.	Debyejeva relaksacija . . . . .	159
8.6.3.	Lorentzova relaksacija . . . . .	160
8.6.4.	Plazemska relaksacija . . . . .	160
8.6.5.	Shematski pogled na frekvenčno disperzijo . . . . .	161
8.7.	Dielektrična disperzija vode . . . . .	162
8.8.	Frekvenčni odziv prevodnikov . . . . .	163
8.8.1.	Frekvenčno odvisna prevodnost . . . . .	164
8.8.2.	Frekvenčno odvisna prevodnost in dielektrična funkcija . . . . .	165
8.8.3.	Plazma . . . . .	166
<b>9</b>	<b>Elektromagnetno valovanje</b>	<b>169</b>
9.1.	Valovna enačba v vakuumu . . . . .	169
9.2.	Rešitve valovne enačbe v vakuumu . . . . .	170
9.3.	Valovna enačba v snovi . . . . .	171
9.4.	Geometrija elektromagnetnega vala . . . . .	172
9.5.	Polarizacija elektromagnetnega vala . . . . .	174
9.5.1.	Linearno polariziran val . . . . .	174
9.5.2.	Eliptično polariziran val . . . . .	175
9.5.3.	Dekompozicija polarizacije . . . . .	175
9.6.	Energijski tok in svetlobni tlak . . . . .	176
<b>10</b>	<b>Elektromagnetni potenciali</b>	<b>181</b>
10.1.	Definicija elektromagnetnih potencialov . . . . .	181
10.2.	Umeritvena transformacija . . . . .	181
10.2.1.	Lorentzova umeritev . . . . .	182
10.2.2.	Umeritvena transformacija in ohranjevanje naboja . . . . .	183
10.3.	Riemann - Sommerfeldove enačbe . . . . .	184
10.3.1.	Retardirani potenciali . . . . .	185
10.3.2.	Avansirani potenciali . . . . .	187
10.4.	Lienard - Wiechertovi potenciali . . . . .	188
10.4.1.	Električno polje gibajočega se naboja . . . . .	190
10.4.2.	Magnetno polje gibajočega se naboja . . . . .	192
10.4.3.	Geometrija polj . . . . .	192
10.5.	Hitrostni in sevalni del polja . . . . .	193
10.5.1.	Hitrostni del polja - prvič . . . . .	194
10.5.2.	Hitrostni del polja - drugič . . . . .	196

<b>11 Sevanje</b>	<b>199</b>
11.1. Sevalni del Lienard - Wiechertovega polja . . . . .	199
11.2. Sevanje pospešenega naboja . . . . .	200
11.2.1. Hitrost in pospešek vzporedna . . . . .	200
11.2.2. Hitrost in pospešek pravokotna . . . . .	203
11.2.3. Ciklotronsko sevanje . . . . .	205
11.2.4. Sinhrotronsko sevanje . . . . .	205
11.3. Nestabilnost klasičnega atoma . . . . .	206
11.4. Splošna teorija elektromagnetnega sevanja . . . . .	207
11.4.1. Sevalna umeritev . . . . .	207
11.4.2. Transverzalna gostota toka . . . . .	208
11.4.3. Sevalni potencial transverzalnih tokov . . . . .	209
11.4.4. Sevalni del EM polj . . . . .	211
11.4.5. Sevalno polje transverzalnih tokov . . . . .	211
11.4.6. Izsevana moč transverzalnih tokov . . . . .	212
11.5. Dipolno sevanje . . . . .	213
11.6. Sevanje linearne antene . . . . .	214
11.7. Reakcijska sila sevanja . . . . .	215
11.7.1. Potenciali in polja . . . . .	216
11.7.2. Sila radiacijske reakcije . . . . .	218
11.7.3. Elektromagnetna renormalizacija mase . . . . .	219
11.7.4. Pobegle rešitve Abraham - Lorentzove enačbe . . . . .	220
11.7.5. Diracova rešitev Abraham - Lorentzove enačbe . . . . .	221
11.7.6. Diracov predpospešek . . . . .	221
11.7.7. Možne razrešitve paradoksa Diracovega predpospeška . . . . .	222
<b>12 Hamiltonske metode v teoriji polja</b>	<b>223</b>
12.1. Ponovitev osnov hamiltonskih metod v klasični fiziki . . . . .	223
12.2. Lagrangeova funkcija nabitega delca v polju . . . . .	224
12.2.1. Lagrangeova funkcija in umeritvena transformacija . . . . .	225
12.3. Hamiltonova funkcija nabitega deleca v polju . . . . .	226
12.4. Schwarzschildova invarianta . . . . .	227
12.5. Lagrangeova funkcija elektromagnetnega polja . . . . .	227
12.5.1. Euler-Lagrangeove enačbe in Riemann-Sommerfeldove enačbe	228
12.5.2. Riemann-Sommerfeldove enačbe . . . . .	230
12.6. Hamiltonova funkcija elektromagnetnega polja . . . . .	231
12.6.1. Status lagrangeovske in hamiltonovske formulacije teorije elektromagnetnega polja . . . . .	233
12.7. Hamiltonova funkcija kot prvi integral . . . . .	234
12.8. Darwinova hamiltonka . . . . .	235
12.9. Umeritvena invariantnost in kvantna mehanika . . . . .	237

<b>13 Posebna teorija relativnosti</b>	<b>241</b>
13.1. Galilejeva transformacija . . . . .	241
13.2. Postulat univerzalnosti svetlobne hitrosti . . . . .	242
13.3. Štiridimenzionalni vrtež . . . . .	243
13.4. Kot vrtenja . . . . .	243
13.5. Lorentzova transformacija . . . . .	244
13.5.1. Časovni raztezek . . . . .	245
13.5.2. Prostorski skrček . . . . .	246
13.6. Valovna enačba in Lorentzova transformacija . . . . .	246
13.7. Prostor Minkowskega . . . . .	247
13.8. Lorentzova transformacija v prostoru Minkowskega . . . . .	248
13.9. Invariantni interval . . . . .	251
13.9.1. Lastni čas . . . . .	252
13.10. Princip splošne kovariantnosti . . . . .	253
13.11. Štirivektor gradienta . . . . .	253
13.12. Štirivektor hitrosti . . . . .	254
13.13. Štirivektor gibalne količine . . . . .	255
13.14. Štirivektor pospeška . . . . .	256
13.14.1. Paradoks dvojčkov . . . . .	257
13.15. Sila Minkowskega . . . . .	259
13.16. Valovni štirivektor . . . . .	261
13.16.1. Dopplerjev pojav . . . . .	262
13.16.2. Aberacija . . . . .	263
<b>14 Kovarianten zapis Maxwellovih enačb</b>	<b>265</b>
14.1. Štirivektor toka izvorov polja . . . . .	265
14.2. Štirivektor elektromagnetnega potenciala . . . . .	266
14.3. Schwarzschildova inavarianta . . . . .	267
14.4. Kovariantna akcija nabitega delca . . . . .	268
14.5. Relativistične Euler-Lagrangeove enačbe za nabit delec . . . . .	269
14.6. Lorentzova sila . . . . .	270
14.7. Kovariantna oblika Riemann - Sommerfeldovih enačb . . . . .	270
14.7.1. Lorentzova umeritev in kontinuitetna enačba . . . . .	271
14.8. Kovariantni tenzor elektromagnetnega polja . . . . .	272
14.9. Lorentzove transformacije za polja . . . . .	273
14.9.1. Hitrosti del polja gibajočega se naboja . . . . .	273
14.10. Kontravariantni in mešani tenzor elektromagnetnega polja . . . . .	275
14.11. Kovariantna akcija elektromagnetnega polja . . . . .	276
14.12. Dve Maxwellovi enačbi skozi tenzor elektromagnetnega polja . . . . .	277
14.13. Dualni tenzor elektromagnetnega polja . . . . .	278
14.14. Še dve Maxwellovi enačbi skozi dualni tenzor elektromagnetnega polja . . . . .	279



14.15. Koviariantna oblika Lorentzove sile . . . . .	281
14.16. Tenzor napetosti elektromagnetnega polja . . . . .	283
14.17. Komponente štiridimenzionalnega tenzorja napetosti . . . . .	284
14.17.1. Tenzor napetosti elektromagnetnega polja in ohranjevalni zakoni . . . . .	285
14.17.2. Gostote toka gibalne količine in energije . . . . .	286
14.18. Gibalna enačba klasične teorije EM polja . . . . .	287
14.18.1. Tenzor toka gibalne količine . . . . .	288