

# *A Feynman-előadások fizikából*



# *A Feynman-előadások fizikából*

Richard P. Feynman  
Robert B. Leighton  
Matthew Sands



III. kötet



TYPOTEX

A könyv megjelenését támogatta:  
a Magyar Tudományos Akadémia és  
a Nemzeti Kulturális Alap a kiadói program keretében.



A frissített magyar kiadás alapjául szolgált:  
*The Feynman Lectures on Physics*  
Copyright © 1965, 2006, 2010 by California Institute of Technology,  
Michael A. Gottlieb, and Rudolf Pfeiffer

This edition published by arrangement with Basic Books,  
an imprint of Perseus Books, LLC,  
a subsidiary of Hachette Book Group Inc., New York, New York, USA.  
All rights reserved.

Hungarian translation © Benkó Lázár, Nagy Elemér,  
Dr. Somogyi Antal, Telbisz Ferenc, Vesztergombi György,  
Typotex, Budapest, 2020  
Engedély nélkül semmilyen formában nem másolható!

Szakmailag lektorálta: Patkós András

ISBN 978 963 493 081 5

Kedves Olvasó!  
Köszönjük, hogy kínálatunkból választott olvasnivalót!  
Újabb kiadványainkról és akcióinkról  
a [www.typotex.hu](http://www.typotex.hu) és a [facebook.com/typotexkiado](https://www.facebook.com/typotexkiado)  
oldalakon értesülhet.

Typotex Kiadó  
Alapította Votisky Zsuzsa, 1989  
A kiadó az 1795-ben alapított Magyar Könyvkiadók  
és Könyvterjesztők Egyesülésének tagja.  
Felelős kiadó: Németh Kinga  
Főszerkesztő: Horváth Balázs  
A kötetet gondozta: Gerner József  
Borítóterv: Somogyi Péter  
Nyomda: Séd Kft.  
Felelős vezető: Dránovits Anna

# Tartalom

<b>53. Elektromágnesesség</b>	11
53.1. Elektromos erők	11
53.2. Elektromos és mágneses terek	15
53.3. Vektorterek jellemzői	16
53.4. Az elektromágnesesség törvényei	19
53.5. Mi is a „tér”?	25
53.6. Elektromágnesesség a tudományban és a technikában	27
<b>54. Vektorterek differenciálszámítása</b>	29
54.1. Megérteni a fizikát...	29
54.2. Skalár- és vektorterek – $T$ és $\mathbf{h}$	30
54.3. Terek deriváltjai – a gradiens	34
54.4. A $\nabla$ operátor	38
54.5. Műveletek $\nabla$ -val	39
54.6. A hővezetés differenciálegyenlete	41
54.7. Vektorterek második deriváltjai	42
54.8. Buktatók	45
<b>55. Vektor-integrálszámítás</b>	48
55.1. Vektorintegrálok; $\nabla\psi$ vonalintegrálja	48
55.2. A vektortér fluxusa	51
55.3. Kockából kilépő fluxus; Gauss tétele	54
55.4. Hővezetés; a diffúziós egyenlet	56
55.5. Vektortér cirkulációja	59
55.6. Négyzet menti cirkuláció; Stokes tétele	61
55.7. Rotációmentes és divergencia mentes terek	64
55.8. Összefoglalás	66
<b>56. Elektrosztatika</b>	68
56.1. Sztatika	68
56.2. A Coulomb-törvény; a szuperpozíció elve	70
56.3. Elektromos potenciál	73
56.4. $\mathbf{E} = -\nabla\varphi$	77
56.5. $\mathbf{E}$ fluxusa	78
56.6. Gauss-tétel; $\mathbf{E}$ divergenciája	83

56.7.	Gömbtöltés erőtere . . . . .	85
56.8.	Erővonalak; ekvipotenciális felületek . . . . .	86
<b>57.</b>	<b>A Gauss-tétel alkalmazása</b>	<b>90</b>
57.1.	Az elektrosztatika nem más, mint a Gauss-tétel plusz... . . . .	90
57.2.	Egyensúly a sztatikus elektromos térben . . . . .	90
57.3.	Egyensúlyi helyzet vezetőkkal . . . . .	92
57.4.	Az atomok stabilitása . . . . .	93
57.5.	Vonal menti töltéseloszlás elektromos erőtere . . . . .	94
57.6.	Töltött sík; két sík . . . . .	95
57.7.	Töltött gömb; gömbhéj . . . . .	98
57.8.	Pontos-e a Coulomb-törvény? . . . . .	99
57.9.	Vezetők erőtere . . . . .	104
57.10.	A vezető üregében levő erőter . . . . .	106
<b>58.</b>	<b>Az elektromos tér tulajdonságai különböző fizikai körülmények között</b>	<b>108</b>
58.1.	Az elektrosztatikus potenciál egyenletei . . . . .	108
58.2.	Az elektromos dipólus . . . . .	109
58.3.	Megjegyzések a vektoregyenletekhez . . . . .	114
58.4.	A dipólus potenciálja mint gradiens . . . . .	115
58.5.	Dipólus-közelítés tetszés szerinti töltéseloszlás esetén . . . . .	118
58.6.	Töltött vezetők tere . . . . .	120
58.7.	A tükrözési módszer . . . . .	121
58.8.	Ponttöltés vezető síkfelület közelében . . . . .	122
58.9.	Ponttöltés vezető gömb közelében . . . . .	124
58.10.	Kondenzátorok; párhuzamos lemezek . . . . .	126
58.11.	Nagyfeszültségű átütések . . . . .	129
58.12.	A téremissziós mikroszkóp . . . . .	131
<b>59.</b>	<b>Az elektromos tér tulajdonságai... (folytatás)</b>	<b>134</b>
59.1.	Az elektrosztatikus tér meghatározásának módszerei . . . . .	134
59.2.	Kétdimenziós terek; komplex változós függvények . . . . .	136
59.3.	Plazmarezgések . . . . .	141
59.4.	Kolloidrészecskék elektrolitban . . . . .	144
59.5.	A rács elektrosztatikus tere . . . . .	148
<b>60.</b>	<b>Elektrosztatikus energia</b>	<b>151</b>
60.1.	Töltések elektrosztatikus energiája. A homogén gömb . . . . .	151

60.2.	A kondenzátor energiája. Elektromosan töltött vezetőkre ható erők . . . . .	153
60.3.	Ionkristály elektrosztatikus energiája . . . . .	157
60.4.	Elektrosztatikus energia az atommagokban . . . . .	160
60.5.	Az elektrosztatikus tér energiája . . . . .	166
60.6.	Pontszerű töltés energiája . . . . .	170
<b>61.</b>	<b>Légköri elektromosság</b>	<b>172</b>
61.1.	A légkör elektromos potenciálgradiense . . . . .	172
61.2.	Elektromos áramok a légkörben . . . . .	174
61.3.	A légköri áramok eredete . . . . .	177
61.4.	Zivatarok . . . . .	179
61.5.	A töltések szétválásának mechanizmusa . . . . .	185
61.6.	A villám . . . . .	190
<b>62.</b>	<b>Dielektrikumok</b>	<b>195</b>
62.1.	A permittivitás . . . . .	195
62.2.	A $P$ polarizációvektor . . . . .	197
62.3.	Polarizációs töltések . . . . .	199
62.4.	Az elektrosztatika egyenletei és a dielektrikumok . . . . .	203
62.5.	Elektromos terek és erők a dielektrikum jelenlétében . . . . .	205
<b>63.</b>	<b>A szigetelő anyag belső szerkezete</b>	<b>210</b>
63.1.	Molekuláris dipólusok . . . . .	210
63.2.	Elektronpolarizáció . . . . .	210
63.3.	Poláros molekulák; irányítási polarizáció . . . . .	214
63.4.	Elektromos tér a dielektrikum üregeiben . . . . .	218
63.5.	Folyadékok permittivitása; a Clausius–Mossotti-egyenlet . . . . .	221
63.6.	Szilárd dielektrikumok . . . . .	223
63.7.	Ferroelektromosság; $BaTiO_3$ . . . . .	224
<b>64.</b>	<b>Elektrosztatikai analógiák</b>	<b>231</b>
64.1.	Azonos egyenletek – azonos megoldások . . . . .	231
64.2.	Hőáramlás; pontszerű forrás végtelen sík határolófelület közelében . . . . .	232
64.3.	A kifestített membrán . . . . .	238
64.4.	Neutrontdiffúzió; gömb alakú, homogén forrás homogén közegben . . . . .	241
64.5.	Örvénymentes folyadékáramlás egy gömb környezetében . . . . .	244

64.6.	Világítástechnika; sík egyenletes megvilágítása . . . . .	248
64.7.	A természet „fundamentális egysége” . . . . .	251
<b>65.</b>	<b>Magnetosztatika</b>	<b>253</b>
65.1.	A mágneses tér . . . . .	253
65.2.	Az elektromos áram; a töltés megmaradása . . . . .	254
65.3.	Az áramra ható mágneses erő . . . . .	256
65.4.	Időben állandó áram mágneses tere; Ampère törvénye .	257
65.5.	Egyenes vezető és tekercs mágneses tere; atomi áramok	260
65.6.	Mágneses és elektromos terek relativitása . . . . .	264
65.7.	Áramsűrűség és töltéssűrűség transzformációja . . . . .	271
65.8.	Szuperpozíció; a jobbkéz-szabály . . . . .	272
<b>66.</b>	<b>A mágneses tér különböző fizikai körülmények között</b>	<b>274</b>
66.1.	A vektorpotenciál . . . . .	274
66.2.	A vektorpotenciál kiszámítása az áramerősségből . . . .	278
66.3.	Egyenes vezető . . . . .	280
66.4.	Hosszú szolenoid . . . . .	281
66.5.	Kis áramhurok tere; a mágneses dipólus . . . . .	284
66.6.	Áramkör terének vektorpotenciálja . . . . .	287
66.7.	A Biot–Savart-törvény . . . . .	289
<b>67.</b>	<b>Vektorpotenciál</b>	<b>291</b>
67.1.	Az áramvezető hurokra ható erők; a dipólus energiája .	291
67.2.	Mechanikai és elektromos energia . . . . .	295
67.3.	A stacionárius áramok energiája . . . . .	299
67.4.	B vagy A? . . . . .	300
67.5.	A vektorpotenciál és a kvantummechanika . . . . .	303
67.6.	Ami a sztatikában igaz, helytelen a dinamikában . . . .	312
<b>68.</b>	<b>Az indukált áram</b>	<b>316</b>
68.1.	Motorok és generátorok . . . . .	316
68.2.	Transzformátorok és tekercsek . . . . .	322
68.3.	Az indukált áramokra ható erők . . . . .	325
68.4.	Elektromos ipar . . . . .	331
<b>69.</b>	<b>Az indukció törvényei</b>	<b>336</b>
69.1.	Az indukció fizikai alapjai . . . . .	336
69.2.	Kivételek a fluxusszabály alól . . . . .	339



69.3.	Részecskegyorsítás az indukált elektromos térben; a betatron . . . . .	341
69.4.	Egy paradoxon . . . . .	344
69.5.	A váltakozó áramú generátor . . . . .	345
69.6.	A kölcsönös indukció . . . . .	350
69.7.	Az önindukció . . . . .	353
69.8.	Tekercs és mágneses energia . . . . .	355
<b>70.</b>	<b>A Maxwell-egyenletek</b>	<b>361</b>
70.1.	Maxwell-egyenletek . . . . .	361
70.2.	Mit jelent az egyenlet új tagja? . . . . .	364
70.3.	A teljes klasszikus fizika . . . . .	367
70.4.	A haladó tér . . . . .	368
70.5.	A fény terjedési sebessége . . . . .	374
70.6.	A Maxwell-egyenletek megoldása; a potenciálok és a hullámeqyenlet . . . . .	376
<b>71.</b>	<b>A legkisebb hatás elve</b>	<b>380</b>
71.1.	Egy speciális előadás – csaknem szóról szóra rögzítve . .	380
71.2.	Néhány kiegészítő megjegyzés az előadáshoz . . . . .	402
<b>72.</b>	<b>A Maxwell-egyenletek megoldása a szabad térben</b>	<b>403</b>
72.1.	Hullámok a szabad térben; síkhullámok . . . . .	403
72.2.	Háromdimenziós hullámok . . . . .	414
72.3.	Tudomány és képzelőerő . . . . .	416
72.4.	Gömbhullámok . . . . .	420
<b>73.</b>	<b>A Maxwell-egyenletek megoldása töltésekkel és áramokkal</b>	<b>426</b>
73.1.	A fény és az elektromágneses hullámok . . . . .	426
73.2.	Pontszerű forrásból kiinduló gömbhullámok . . . . .	429
73.3.	A Maxwell-egyenletek általános megoldása . . . . .	431
73.4.	A rezgő dipólus tere . . . . .	433
73.5.	Mozgó töltés tere, Liénard–Wiechert-féle általános megoldás . . . . .	440
73.6.	A Lorentz-képlet . . . . .	444
<b>74.</b>	<b>Váltakozó áramú körök</b>	<b>448</b>
74.1.	Az impedanciák . . . . .	448
74.2.	A generátorok . . . . .	455

74.3.	Ideális elemeket tartalmazó áramkörök; Kirchhoff-törvények . . . . .	459
74.4.	Ekvivalens áramkörök . . . . .	466
74.5.	Az energia . . . . .	468
74.6.	Létraáramkör . . . . .	471
74.7.	Szűrőkörök . . . . .	474
74.8.	Egyéb áramkörü elemek . . . . .	479
<b>75.</b>	<b>Üregrezonátorok</b>	<b>484</b>
75.1.	Valóságos áramkörü elemek . . . . .	484
75.2.	Az ideális kondenzátor nagyfrekvenciás viselkedése . . .	487
75.3.	Az üregrezonátor . . . . .	493
75.4.	Rezgési móduszok . . . . .	499
75.5.	A rezgőkörtől az üregrezonátorig . . . . .	503
<b>76.</b>	<b>Hullámvezetők</b>	<b>506</b>
76.1.	A távvezeték . . . . .	506
76.2.	A téglalap keresztmetszetű hullámvezető . . . . .	511
76.3.	Határfrekvencia . . . . .	516
76.4.	A hullámok sebessége a hullámvezetőben . . . . .	518
76.5.	A hullámvezető hullámainak megfigyelése . . . . .	519
76.6.	Hullámvezetők csatlakoztatása . . . . .	520
76.7.	Csőhullámmóduszok . . . . .	524
76.8.	A csőhullámok szemléletes képe . . . . .	526
	A könyvben alkalmazott jelölések . . . . .	531
	Név- és tárgymutató . . . . .	533