

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 © Benkő 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 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

53. Elektromágnesesség	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
54. Vektorterek differenciálszámítása	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 ∇ operátor	38
54.5. Műveletek ∇ -val	39
54.6. A hővezetés differenciálegyenlete	41
54.7. Vektorterek második deriváltjai	42
54.8. Buktatók	45
55. Vektor-integrálszámítás	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 divergenciamentes terek	64
55.8. Összefoglalás	66
56. Elektrosztatika	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
57.	A Gauss-tétel alkalmazása	90
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 töltéeloszlás 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
58.	Az elektromos tér tulajdonságai különböző fizikai körülmények között	108
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 töltéeloszlás 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
59.	Az elektromos tér tulajdonságai. . . (folytatás)	134
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
60.	Elektrosztatikus energia	151
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
61.	Légköri elektromosság	172
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
62.	Dielektrikumok	195
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
63.	A szigetelő anyag belső szerkezete	210
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
64.	Elektrosztatikai analógiák	231
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
65.	Magnetosztatika	253
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
66.	A mágneses tér különböző fizikai körülmények között	274
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
67.	Vektorpotenciál	291
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
68.	Az indukált áram	316
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
69.	Az indukció törvényei	336
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
70.	A Maxwell-egyenletek	361
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 hullámegyenlet	376
71.	A legkisebb hatás elve	380
71.1.	Egy speciális előadás – csaknem szóról szóra rögzítve . .	380
71.2.	Néhány kiegészítő megjegyzés az előadáshoz	402
72.	A Maxwell-egyenletek megoldása a szabad térben	403
72.1.	Hullámok a szabad térben; síkhullámok	403
72.2.	Háromdimenziós hullámok	414
72.3.	Tudomány és képzelőerő	416
72.4.	Gömbhullámok	420
73.	A Maxwell-egyenletek megoldása töltésekkel és áramokkal	426
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
74.	Váltakozó áramú körök	448
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 áramköri elemek	479
75.	Üregrezonátorok	484
75.1.	Valóságos áramköri 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
76.	Hullámvezetők	506
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

53. fejezet

Elektromágnesesség

53.1. Elektromos erők

Képzeljünk el egy olyan erőt, mint a gravitáció, amely – mint ismeretes – lényegében a távolság négyzetével fordítottan arányos, de ez az erő milliárd-milliárd-milliárd-milliárdszor erősebb, mint a gravitáció. Van még egy másik különbség is. Ellentétben a gravitációval, ahol csak vonzás létezik, tételezzük fel azt is, hogy kétféle „anyag” van: pozitív és negatív, és az egyműiek taszítják, a különböző neműek pedig vonzzák egymást.

A pozitív anyagok óriási erővel taszítanak egymást és szétszóródnának a szélrózsa minden irányába. A negatív anyagokkal ugyanez történné. De egészen más a helyzet, ha a pozitív és negatív anyagokat egyenlő arányban összekeverjük. Az óriási vonzóerő egymáshoz vonzaná az ellentétes részeket. Végeredményben ezek az iszonyú erők majdnem teljesen kiegyenlítődnének, sűrű, „finomszemcsés” pozitív-negatív keverék képződne, és e keverék két szétválasztott darabja között gyakorlatilag sem vonzó-, sem taszítóerő nem lépne fel.

Van ilyen erő: az elektromos erő. Ugyanis minden anyag a pozitív protonok és negatív elektronok keveréke, melyek ezzel az óriási erővel vonzzák és taszítják egymást. Azonban az egyensúly olyan tökéletes, hogy ha közel megyünk is valakihez, semmiféle erőhatást nem érzünk. Pedig már igen kis kiegyensúlyozatlanság is észrevehető lenne. Ha két ember kartávolságnyira állna egymástól és mindegyiküknek egy százalékkal több elektronja lenne, mint protonja, a taszító erő hihetetlenül nagy lenne. Milyen nagy? Az Empire State Building felemeléséhez lenne elég? Nem! A Mont Everest felemeléséhez lenne elég? Nem! Ez a taszító erő elég lenne az egész Földgolyó súlyával egyenlő nagyságú „súly” felemeléséhez!

Ha elgondoljuk, hogy ebben a finom keverékben a hatalmas erők tökéletesen kiegyensúlyozottak, nem nehéz megérteni, hogy az anyag, amely igyekszik fenntartani pozitív és negatív töltéseinek finom egyensúlyát, igen merev és szilárd lehet. Az Empire State Buildingnek például csak körülbelül 2 cm-nyi kilengése van, mert az elektromos erők az összes elektront és protont többé-kevésbé megtartják eredeti helyükön. Másrészt, ha a semleges anyagot olyan kis részekre osztjuk, hogy az egyes részecskék csak néhány atomot tartalmaznak, akkor általában nem mindegyik anyagrészben lesz egyenlő a pozitív és negatív töltések száma, ezért nagy elektro-

mos erők lépnek fel az egyes anyagdarabkák között. De akkor is kialakulhat nagy eredő elektromos erő, ha a két szomszédos darabkában egyenlő számban van a kétféle töltés, ugyanis az egyedi töltések közti erők a távolságnégyzetek reciprokával arányosak. Eredő erő ébredhet, ha az egyik darabnak a negatív töltése közelebb van a másik darab pozitív töltéséhez, mint a negatívjaihoz. A vonzóerők ekkor nagyobbak lehetnek, mint a taszítók, és a két kis darab között végeredményben töltéstöbblet nélkül is vonzás léphet föl. Az atomokat összetartó erők és a molekulákat összetartó kémiai erők valójában olyan tartományokban ható elektromos erők, amelyekben a töltésegyensúly nem tökéletes, vagy a távolságok igen kicsik.

Olvasóink már tudnak róla, hogy az atommagban pozitív protonok, a magon kívül pedig elektronok vannak. Joggal kérdezhetik: „Ha az elektromos erő olyan roppant nagy, miért nem zsúfolódnak egymásra a protonok és elektronok? Ha finom keveréket akarnak alkotni, miért nem tömörülnek még jobban?” A választ a kvantumeffektusok szolgáltatják. Ha megpróbáljuk az elektronokat a protonok körül nagyon kis tartományba bezárni, minél összébb szorítjuk őket, annál nagyobbra szabja meg a határozatlansági elv impulzusnégyzetük átlagát. Ez a mozgás – melyet a kvantummechanika törvényei határoznak meg – akadályozza meg, hogy az elektromos vonzóerők a töltéseket valamivel is közelebb vigyék egymáshoz.

Másik kérdés: „Mi tartja össze az atommagot?” Hiszen az atommagban több proton van, és mindegyik proton pozitív. Miért nem taszítják ezek széjjel egymást? Kiderült, hogy a magokban az elektromos erőn kívül más, úgynevezett magerők is hatnak, melyek nagyobbak az elektromos erőnél és képesek az elektromos taszítás ellenére összetartani a protonokat. A magerőknek azonban rövid a hatótávolságuk, az erőhatás $1/r^2$ -nél sokkal gyorsabban csökken, és ennek fontos következménye van. Ha túl sok a proton egy magban, a mag túl nagyvá válik és szétesik. Jó példa erre a 92 protonnal rendelkező uránium. A magerők döntően csak a szomszédos protonok (vagy neutronok) között hatnak, ellenben az elektromos erők nagy távolságokat hidalnak át, minden egyes proton taszítja az összes többi. Minél több proton van egy magban, annál erősebb az elektromos taszítás, egészen addig, amíg – mint az urániumban is – az egyensúly olyan labilissá nem válik, hogy a mag majdnem szétesik a taszító elektromos erők hatására. Ha egy ilyen magot egész könnyedén „meglökünk” (például egy lassú neutronnal), két pozitív töltésű darabra esik, s ezeket szétrepíti az elektromos taszítás. Az így felszabaduló energia: az atombomba energiája. Ezt az energiát gyakran „nukleáris” energiának is nevezik, pedig valójá-

ban elektromos energia, mely akkor szabadul fel, ha az elektromos erők túlsúlyba kerülnek a vonzó magerőkkel szemben.

Végül megkérdezzhetjük, hogy mi tart össze egy negatív töltésű elektront? (Az elektronban ugyanis nincsenek magerők.) Ha az elektron egyféle alapanyagból áll, minden részének taszítania kell a többit. Miért nem repül akkor széjjel? De vannak-e az elektronnak „részei”? Talán azt mondhatjuk, hogy az elektron csak egyetlen pont, és az elektromos erők csak *különböző* ponttöltések között hatnak, így az elektron nem hat saját magára? Lehetséges. Arról a kérdéstről, hogy mi tartja össze az elektront, egyelőre csak annyit mondhatunk, hogy igen sok nehézséget támasztott, amikor az elektromágnesesség összefoglaló elméletét igyekeztek megalkotni. E kérdésre mindeddig még senki sem tudott választ adni. Részletesebb elemzésre a későbbi fejezetekben még sor kerül.

Mint láttuk, feltételezhető, hogy az elektromos erők és a kvantummechanikai hatások együttesen határozzák meg az anyag makroszkopikus szerkezetét, tehát a tulajdonságait. Vannak kemény anyagok, és vannak lágyak. Egyes anyagok elektromos *vezetők* – ugyanis elektronjaik szabadon mozoghatnak; mások *szigetelők* – mivel elektronjaik szorosan kötődnek az egyes atomokhoz. Később meg is vizsgáljuk, hogyan jönnek létre ezek a tulajdonságok, ez a vizsgálat azonban nagyon bonyolult, ezért kezdetben inkább csak egyszerű körülmények között tanulmányozzuk az elektromos erőket. Azzal kezdjük, hogy csupán az elektromosság törvényeit vizsgáljuk, beleértve a mágnesességet is, amely lényegében ugyanazon jelenségcsoporthoz tartozik.

Már mondtuk: az elektromos erők, a gravitációs erőhöz hasonlóan, a töltések közti távolság négyzetének reciprokával arányosan csökkennek. Ezt az összefüggést nevezik Coulomb-törvénynek. De ez a törvény már nem teljesen igaz a mozgó töltésekre; az elektromos erők bonyolult módon a töltések mozgásától is függenek. A mozgó töltések között ható erők egy részét *mágneses* erőnek nevezzük. Valójában ez is az elektromos hatás egyik megnyilvánulása. Ezért is nevezik ezt a tárgyat „elektromágnesesség”-nek.

Van egy fontos, általános elv, amely lehetővé teszi az elektromágneses erők viszonylag egyszerű tárgyalását. Kísérleti tapasztalatok szerint ugyanis egy adott töltésre ható erő, függetlenül a többi jelen levő töltések számától, mozgásától, kizárólag csak az adott töltés helyzetétől, sebességétől és nagyságától függ. A \mathbf{v} sebességgel mozgó q töltésre ható \mathbf{F} erő a következőképpen írható fel:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (53.1)$$

ahol \mathbf{E} az *elektromos tér*, \mathbf{B} pedig a *mágneses tér* a töltés helyén¹. Az a lényeg, hogy e két vektor megadásával a világegyetem összes többi töltéséből eredő elektromos erők összefoglalhatók. E vektorok értéke függ a töltés *helyétől* és *időben* változhat. Ha az adott töltést egy másikkal helyettesítjük, az új töltésre ható erő éppen arányos lesz e töltés nagyságával, hacsak a világegyetemben maradó többi töltés nem változtatja meg helyzetét, illetve mozgását. (Gyakorlati körülmények között persze minden töltés erőhatást gyakorol a környezetében levő összes többi töltésre, mozgásba hozhatja azokat, s így előfordulhat, hogy a terek megváltoznak, ha egyik töltést a másikkal helyettesítjük.)

A 9. fejezet alapján meg tudjuk határozni egy részecske mozgását, ha ismerjük a rá ható erőt. Az (53.1) egyenletet a mozgásegyenlettel kombinálva adódik a következő egyenlet:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{m\mathbf{v}}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} \right] = \mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (53.2)$$

Vagyis, ha \mathbf{E} és \mathbf{B} ismert, a mozgás meghatározható. De tudni szeretnénk azt is, hogy hogyan jön létre \mathbf{E} és \mathbf{B} .

A terek létrejöttére vonatkozóan az egyik legfontosabb egyszerűsítő szabály a következő: Képzeld el, hogy mozgó töltések egy csoportja \mathbf{E}_1 teret kelt, egy másik csoport pedig \mathbf{E}_2 -t. Ha mindkét töltéscsoport egyszerre van jelen (azaz ugyanabban a helyzetben és mozgásállapotban, mint voltak akkor, mikor külön-külön létezőnek tekintettük őket), akkor az általuk keltett tér éppen összegeződik:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2. \quad (53.3)$$

Ez a szabály a terekre vonatkozó *szuperpozíció elve*. A szuperpozíció elve természetesen a mágneses terekre is érvényes.

A szuperpozíció elve tehát kimondja: ha az *egyetlen* tetszőlegesen mozgó töltés által keltett elektromos és mágneses tér törvényét ismerjük, akkor az elektrodinamika összes törvényét ismerjük. Ha meg akarjuk tudni, milyen erők hatnak az A töltésre, akkor csak ki kell számítanunk egyenként a B, C, D stb. töltés által keltett \mathbf{E} és \mathbf{B} tereket, majd az \mathbf{E} -ket és \mathbf{B} -ket összeadjuk; az így kapott eredő térből kell kiszámítani az A töltésre ható erőket. Ha az derült volna ki, hogy az egyedi töltés által keltett tér egyszerű, akkor valóban így lehetett volna az elektrodinamika törvényeit a legtisztábban leírni. Ezt a – sajnos meglehetősen bonyolult – törvényt a 28. fejezetben egyszerűen már felírtuk.

¹Itt a tér nem tévesztendő össze a térerősséggel. A magyar terminológia szerint \mathbf{E} valóban az elektromos térerősség, \mathbf{B} -t viszont mágneses indukciónak nevezzük. (A fordító megjegyzése.)