

A Feynman-előadások fizikából

A Feynman-előadások fizikából

Richard P. Feynman
Robert B. Leighton
Matthew Sands

I. kötet



TYPOTEX

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



Copyright © 1964, 2006, 2010 by California Institute of Technology,
Michael A. Gottlieb, and Rudolf Pfeiffer
All rights reserved.

A fordítás a következő kiadás alapján készült:

The Feynman Lectures on Physics

Published in 2011 by Basic Books,

A Member of the Perseus Books Group

Hungarian translation © dr. Bozóky György, dr. B. Gombosi Éva,
Nagy Elemér, Typotex, Budapest, 2017
Engedély nélkül semmilyen formában nem másolható!

Szakmailag lektorálta: Patkós András

ISBN 978 963 279 979 7

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.

Kiadja a Typotex Elektronikus Kiadó Kft.
Felelős vezető: Votisky Zsuzsa
Főszerkesztő: Horváth Balázs
A kötetet gondozta: Gerner József
Borítóterv: Somogyi Péter
Nyomás: Séd Nyomda Kft.
Felelős vezető: Katona Szilvia

Tartalom

Előszó a magyar kiadáshoz	11
A szerzőkről	13
Előszó az új, millenniumi kiadáshoz	16
Feynman előszava	23
1. Atomok mozgásban	27
1.1. Bevezetés	27
1.2. Az anyag atomokból épül fel	29
1.3. Atomi folyamatok	34
1.4. Kémiai reakciók	38
2. A fizika alapjai	43
2.1. Bevezetés	43
2.2. A fizika 1920 előtt	46
2.3. Kvantumfizika	51
2.4. Atommagok és részecskék	56
3. A fizika kapcsolata más tudományágakkal	62
3.1. Bevezetés	62
3.2. Kémia	62
3.3. Biológia	64
3.4. Csillagászat	72
3.5. Geológia	74
3.6. Pszichológia	75
3.7. Fejlődéstörténet	76
4. Az energiamegmaradás tétele	79
4.1. Mi az energia?	79
4.2. Gravitációs helyzeti energia	81
4.3. Mozgási energia	87
4.4. Az energia egyéb formái	88
5. Idő és távolság	93
5.1. A mozgásról	93
5.2. Az idő fogalma	94
5.3. Rövid időtartamok	95

5.4.	Hosszú időtartamok	97
5.5.	Az idő mértékegységei és etalonjai	100
5.6.	Nagy távolságok	101
5.7.	Kis távolságok	105
6.	Valószínűség	110
6.1.	Esély és valószínűség	110
6.2.	Véletlen ingadozások	113
6.3.	Bolyongási probléma	117
6.4.	Valószínűségeloszlás	121
6.5.	Határozatlansági reláció	125
7.	A gravitáció elmélete	129
7.1.	A bolygók mozgása	129
7.2.	Kepler törvényei	130
7.3.	A dinamika fejlődése	131
7.4.	A gravitáció Newton-féle törvénye	132
7.5.	Egyetemes tömegvonzás	137
7.6.	Cavendish kísérlete	142
7.7.	Mi a gravitáció?	143
7.8.	A gravitáció és a relativitáselmélet	147
8.	A mozgás	148
8.1.	A mozgás leírása	148
8.2.	Sebesség	151
8.3.	A sebesség mint derivált	156
8.4.	A távolság mint integrál	158
8.5.	Gyorsulás	160
9.	A dinamika Newton-féle törvényei	165
9.1.	Impulzus (lendület) és erő	165
9.2.	Gyorsaság és sebesség	168
9.3.	Sebesség-, gyorsulás- és erőkomponensek	168
9.4.	Mi az erő?	170
9.5.	A dinamika egyenleteinek jelentése	171
9.6.	Az egyenletek numerikus megoldása	172
9.7.	A bolygók mozgása	175
10.	Az impulzus megmaradása	181
10.1.	Newton harmadik törvénye	181

10.2. Az impulzus megmaradása	183
10.3. Az impulzus megmarad!	187
10.4. Impulzus és energia	192
10.5. Relativisztikus impulzus	194
11. Vektorok	198
11.1. Szimmetriák a fizikában	198
11.2. Eltolások	199
11.3. Forgatások	201
11.4. Vektorok	205
11.5. Vektoralgebra	207
11.6. Newton törvényei vektorjelölésben	210
11.7. Vektorok skalárszorzata	212
12. Az erő jellemzői	216
12.1. Mit értünk erőn?	216
12.2. Súrlódás	220
12.3. Molekuláris erők	224
12.4. Alaperők. Terek	227
12.5. Pszeudoerők	232
12.6. Magerők	235
13. Munka és helyzeti energia (A)	237
13.1. A szabadon eső test energiája	237
13.2. A nehézségi erő által végzett munka	241
13.3. Energiaösszegzés	246
13.4. Nagy testek gravitációs tere	248
14. Munka és helyzeti energia (befejezés)	253
14.1. Munka	253
14.2. Kényszermozgás	256
14.3. Konzervatív erők	257
14.4. Nemkonzervatív erők	262
14.5. Potenciálok és terek	264
15. Speciális relativitáselmélet	269
15.1. A relativitás elve	269
15.2. Lorentz-transzformáció	272
15.3. A Michelson–Morley-kísérlet	273
15.4. Az idő transzformációja	276

15.5. Lorentz-kontrakció	280
15.6. Egyidejűség	281
15.7. Négyesvektorok	282
15.8. Relativisztikus dinamika	283
15.9. A tömeg és az energia egyenértékűsége	285
16. Relativisztikus energia és impulzus	288
16.1. A relativitás és a filozófusok	288
16.2. Az ikerparadoxon	292
16.3. A sebességek transzformációja	293
16.4. A relativisztikus tömeg	296
16.5. A relativisztikus energia	300
17. Tér-idő	304
17.1. A tér-idő geometriája	304
17.2. Tér-idő-intervallumok	307
17.3. Múlt, jelen és jövő	309
17.4. Még néhány szó a négyesvektorokról	311
17.5. Négyesvektorok algebrája	314
18. Forgás két dimenzióban	318
18.1. A tömegközéppont	318
18.2. Merev test forgómozgása	321
18.3. Impulzusmomentum (perdület)	325
18.4. Az impulzusmomentum megmaradása	328
19. Tömegközéppont. Tehetetlenségi nyomaték	331
19.1. A tömegközéppont tulajdonságai	331
19.2. A tömegközéppont meghatározása	336
19.3. A tehetetlenségi nyomaték meghatározása	338
19.4. A forgás kinetikus energiája	342
20. Forgás három dimenzióban	347
20.1. Forgatónyomaték három dimenzióban	347
20.2. A forgómozgás egyenletei vektoralakban	353
20.3. A pörgettyű	354
20.4. A merev test impulzusmomentuma	359
21. A harmonikus oszcillátor	362
21.1. Lineáris differenciálegyenletek	362

21.2. Harmonikus oszcillátor	363
21.3. Harmonikus rezgőmozgás és körmozgás	367
21.4. Kezdeti feltételek	368
21.5. Kényszerrezgések	370
22. Algebra	373
22.1. Összeadás és szorzás	373
22.2. Fordított műveletek	375
22.3. Elvonatkoztatás és általánosítás	376
22.4. Irracionális számok közelítése	378
22.5. Komplex számok	384
22.6. Képzetes hatványkitevők	388
23. Rezonancia	391
23.1. Komplex számok és a harmonikus rezgőmozgás	391
23.2. Csillapított kényszerrezgés	394
23.3. Elektromos rezonancia	397
23.4. Rezonancia a természetben	401
24. Átmeneti jelenségek	408
24.1. Az oszcillátor energiája	408
24.2. Csillapított rezgések	411
24.3. Elektromos áramkörök átmeneti (tranziens) jelenségei	414
25. Lineáris rendszerek. Összefoglalás	418
25.1. Lineáris differenciálegyenletek	418
25.2. Megoldások szuperpozíciója	420
25.3. Rezgések lineáris rendszerekben	425
25.4. Analógiák a fizikában	428
25.5. Soros és párhuzamos impedanciák	431
A könyvben alkalmazott jelölések	434
Név- és tárgymutató	437

Előszó a magyar kiadáshoz

Két kérdésre kellene hatásosan válaszolnunk. Az első: Érdemes-e egyáltalán korunkban a fizika egészét átfogó bevezetést kínálni a felsőfokú tanulmányokat kezdő mérnök-, orvostan- vagy természettudományi hallgatóknak? Igenlő válasznál jön a második: Miért éppen „A Feynman”-t ajánljuk?

Erős érv a monografikus terjedelmű tankönyvsorozatok ellen a tudományos ismeretek terjedelme növekedésének fokozódó üteme. Ha az elmúlt 500 év fizikájának egészét modern felfogásban bemutató könyvsorozat elkészítésének és kiadásának munkáját tekintjük, fel kell ismerni, hogy a megírás folyamata alatt az ismeretanyag szinte megjósolhatatlan mértékben és irányban bővül. A tankönyvíró számára reménytelen versenyfutást jelenítette meg az a hallgató, aki egy előadásomat okostelefonján követve rám szólt: „az Univerzum életkora nem 13,7 milliárd, hanem 13,82 milliárd év”. A gyorsan változó hangsúlyok és tartalmak a kiadók is inkább az előadásjegyzetek (lecture notes) gyorsan cserélhető írásos változatainak kiadására ösztönzik a nagy klasszikus tankönyvsorozatok helyett.

Jelen sorozatról biztosan állítható, hogy a nem avuló klasszikusok közé tartozik. A négy évtizeddel korábbi első magyar kiadás szövegének kritikai javítása utáni, a 2010-es amerikai utolsó variánst követő újabb kiadását a tanulmányaikat kezdőknek óvatossággal nélkül ajánlhatjuk figyelmébe.

A tartós érdeklődés fennmaradásának titka Richard P. Feynman egyéni tudományfelfogásában rejlik. Számára a fizika nem pusztán saját tárgykörére, hanem minden természeti jelenség vizsgálatára, sőt a társadalmi kihívások univerzális megközelítésére is módszert kínál. Így aztán nem csábítja a tematikus teljességre törekvés. Minden jelenségekörben a legegyszerűbb (néha az előadás céljaira kitalált) kísérletekre alapozva építi ki a legalkalmasabb fogalmakat, majd olyan jelenségeknek és módszereknek a megbeszélésére koncentrálni, amelyek túl a fizikán is visszaköszönnek. Nem sajnálja az időt, részletesen kifejti például a rezonancia jelenségének széles természeti jelenségekörben megtapasztalható felbukkanását. Gondosan részletezett apró lépésekben mutatja a kezdő olvasónak, hogyan juthat egyre közelebb a harmonikus rezgés vagy a bolygómozgás teljes kvantitatív jellemzéséig. Az eredmény megfogalmazása nála nem a téma lezárásának a pillanata, hanem a részletes újraelemzésé, ahol a matematikai képleteket lehetőleg mellőzve keresi a legáttekinthetőbb kifejtést az eredmény távlatot nyitó értelmezésére.

Természetesen Feynman a természet ismeretének korabeli szintjén érvel, amikor az akkor legkorszerűbb eredményekért és azokban a fizika szerepéért lelkesedik. Nem tudhatta, például, a DNS-szerkezet felderítésében azóta elért óriási előrelépésről vagy (hogyan visszautaljak az Univerzum kozmikus életkorának fentebb már említett kérdésére) az elmúlt 25 év kozmológiai jelentőségű csillagászati felfedezéseiről. A részecskefizika éppen a Caltech-előadások időszakában jutott el a véges élettartamú rezonanciák részecskéikkel történő azonosításában a kvarkhipotézis kimondásáig. Ma a kvarkok léte kétségszítványtalan tény, sőt az atommagok szerkezetét meghatározó erőhatásoknak a kvarkok közötti fundamentális erőhatásokra való visszavezetésében is jelentős előrelépést tehetett a tudomány a szuperszámítógépek segítségével. Így aztán, amikor Feynman a bolygómozgás numerikus integrálásának időigényét a korabeli számítógépek aritmetikai műveleti sebessége alapján becsüli meg, a kezdő olvasó is elmosolyodik.

Egyet azonban ne felejtsünk! Fél évszázad minden tudományos előrelépése összhangban van Richard Feynmannak a tudomány hatóköre állandó kiterjedéséről az 1960-as években lelkesen hirdető, a természetén kívül/felül álló bármilyen hatás feltételezésének szükségtelenségét valló felfogásával.

Az előadásoknak még egy fontos sajátosságára érdemes felhívnom az olvasók figyelmét. Az előadás a vektor- és a differenciálszámítás elemeitől a differenciálegyenletek numerikus megoldási algoritmusainak gyakorlatias részletezéséig helyben megtanítja az aktuálisan szükséges matematikai segédeszközöket. Nem követel speciális előismereteket az Egyesült Államok 10 legjobb egyeteme között számontartott Caltechre frissen felvett hallgatóktól, nem hivatkozik párhuzamos algebrai vagy kalkulus-előadásokra. Valószínűleg ugyanazzal az élvezettel magyarázta a matematikai alaptéchnikákat a diákoknak, amivel egykor Los Alamosban szervezett csapatokat a Bomba működési elvét ellenőrző számítások elvégzésére a fizikusok családtagjaiból.

Aki hallgathatta Richard Feynman bongójátékát 1972-ben a balatonfüredi Marx-villában, majd 1986-ban találkozott Wangerooge szigetének homokdűnéi között a széllel és előrehaladó súlyos betegségével küszködő idős tudóssal, előadásait olvasva az ő élőhangját véli hallani. Hallja a gondolatok bűvészt, aki hihetetlenül egyszerű megfontolásokkal hirtelen elővarázsolja a fizika nagyjelentőségű törvényeit, miközben kicsit gúnyos hanglejtésével szinte provokál: „Ezt csináljátok utánam!”

Fogadják el a kihívást, és tanulják el Feynmantól a természettörvények feltárásának „pofonegyszerű” technikáját! A távolságskála alján és tetején még bőven rejtőzködnek törvények, amelyek feltárásában „A Feynman”-ból ellesett bűverőnek hasznát vehetik!

PATKÓS ANDRÁS

A szerzőkről

Richard Feynman

Richard P. Feynman 1918-ban született, és 1942-ben a Princeton Universitytől nyert PhD-fokozatot. Fiatalkora ellenére a második világháború alatt fontos szerepet kapott a Los Alamos-i Manhattan Projectben. Azután a Cornell Universityn és a California Institute of Technologyon oktatott. 1965-ben kvantum-elektrodinamikai munkásságáért Sin-Itiro Tomonagával és Julien Schwingerrel közösen fizikai Nobel-díjat kapott.

Dr. Feynman a Nobel-díjat a kvantum-elektrodinamika elméletével sikeresen megoldott problémák soráért kapta meg. Alkotott egy olyan matematikai elméletet is, mellyel leírható a szuperfolyékonyság folyékony héliumban tapasztalható jelensége. Azután Murray Gell-Mann-nal alapvető eredményt ért el a gyenge kölcsönhatásnak, úgymint a béta-bomlásnak a vizsgálatában. A későbbi években Feynmannak kulcsszerepe volt a kvarkelmélet kialakulásában azáltal, hogy a nagyenergiájú protonbomlási folyamatokra kidolgozta partonelméletét.

Mindezen eredményeken túl dr. Feynman alapvetően új számolási technikákat és jelölési módokat vezetett be a fizikába – főként a szinte mindenütt előforduló Feynman-gráfok azok, amelyek a modern tudománytörténet minden más formalizmusánál jobban megváltoztatták az elemi fizikai folyamatokról alkotott felfogásunkat és azok kiszámítását.

Feynman figyelemre méltóan eredményes pedagógus volt. Számos kitüntetése között különösen büszke volt az Oersted-éremre, amelyet 1972-ben kapott meg, és a legjobb oktatókat jutalmazták vele. Az először 1963-ban megjelent *The Feynman Lectures on Physics* a *Scientific American* ismertetője a „nehéz, de tápláló és ízekkel teli” ételhez hasonlította. „25 év elteltével ez a könyv az oktatók számára vezérfonal, az elsőéves hallgatók számára pedig a legjobb bevezető.” Azért, hogy a nagyközönség is jobban értse a fizikát, Feynman megírta a *The Character of Physical Law* és a *QED: The Strange Theory of Light and Matter* című könyveket.¹

¹ A fizikai törvények jellege (Magvető, 1984; Akkord 2004, ford. Gajzágó Éva) és QED: a megszilárdult fény (Scolar, 2003, ford. Alföldy Bálint)

Számos jelentős publikáció kötődik a nevéhez, amelyek azóta klasszikus hivatkozássá váltak, írt továbbá tankönyveket kutatók és egyetemi hallgatók számára.

Richard Feynman tevékeny közéleti ember volt. A Challenger űrrepülőgép katasztrófáját vizsgáló bizottságban végzett munkája közismert, különösen a tömítőgyűrűk hidegre való érzékenységet demonstráló híres kísérlete. Ehhez az elegáns kísérlethez nem volt szüksége másra, csak egy pohár jeges vízre és egy C-szorítóra. Kevésbé ismert Feynmannak az 1960-as években a California State Curriculum Committeeben végzett munkája, ahol folyamatosan szót emelt a tankönyvek közepszerűsége ellen.

Feynman számtalan tudományos és oktatási eredményének felsorolásával képtelenség megragadni ennek az embernek a lényegét. Elvont szakmai cikkeinek bármely olvasója is tudja, hogy Feynman életteli és sokoldalú személyisége sugárzik minden művéből. Amellett, hogy fizikus volt, alkalmanként rádiót szerelt, titkos zárat nyitott ki, képzőművészettel is foglalkozott, táncolt, bongón dobolt, még maja hieroglifák megfejtésébe is belevágott. A világ jelenségei iránti kíváncsisága sosem szűnt meg, példamutató empirista volt.

Richard Feynman 1988. február 15-én, Los Angelesben hunyt el.

Robert Leighton

Robert B. Leighton 1919-ben Detroitban született. Élete során úttörő munkát végzett a szilárdtestfizikában, a kozmikus sugárzás fizikájában, a modern részecskefizika kezdeti fázisában, a napfizikában, a bolygófényképezésben, az infravörös csillagászatban, a milliméteres és szubmilliméteres asztronómiában.

Széles körben ismert volt a tudományos mérőműszerek újszerű megtervezésében megnyilvánuló tehetsége miatt, csodálták oktatói képességeiért. Még mielőtt a *The Feynman Lectures on Physics* csapatához csatlakozott volna, írt egy nagyhatású könyvet *Principles of Modern Physics* címmel.

Az 1950-es évek elején Leighton kulcsszerepet játszott a müon két neutrínóra és egy elektronra való bomlásának kimutatásában, és elsőként mérte meg a bomlástermékként keletkező elektron energiaspektrumát. Ő volt az, aki felfedezésük után először vizsgálta az úgynevezett ritka részecskek bomlását, s az új ritka részecskék számos tulajdonságát tisztázta.

Az 1950-es évek közepén Leighton kifejlesztette a Doppler-eltolódáson és a Zeeman-effektuson alapuló napkamerát. A Zeeman-kamera segítségével Leighton és tanítványai kitűnő felbontásban feltérképezték a Nap mág-

neses terét, s ez vezetett el a Nap felszíni sebességében mérhető ötperces oszcillációinak és a Nap felszínét borító szupergranuláris mintázatnak a felfedezéséhez – egy új kutatási területet: a napszeizmológiát nyitva meg. Leighton megtervezett és megépített egy olyan eszközt is, amely tisztább képet alkotott a bolygókról, és megnyitott egy másik új kutatási területet, az adaptív optikát. Egészen a világűrnek az 1960-as években kezdődött szondás kutatásáig az ő berendezéseinek alkalmazásával készültek a legjobb bolygófelvételek.

Az 1960-as évek elején Leighton kifejlesztett egy újszerű, olcsó infravörös távcsövet, amely 2,2 mikron hullámhosszon pásztázta végig az égboltot, s ez a kutatás váratlanul nagyszámú olyan objektumot mutatott ki galaxisunkban, amelyek túl hidegek ahhoz, hogy az emberi szem számára észrevehetőek legyenek. A hatvanas évek közepén ő vezette a Jet Propulsion Laboratorynak (JPL) azt a csoportját, amely a Mariner 4, 6 és 7 marskutató űrszondákhoz a képalkotási kutatásokat elvégezte. Leightonnak kulcsszerepe volt a JPL első, *mély űrben* használható, nagyfelbontású digitális televíziós rendszerének kifejlesztésében, és hozzájárult az első képfeldolgozási és -erősítési technikák kialakulásához is.

Az 1970-es években Leighton érdeklődése a nagy és olcsó tányéran-tennák felé tolódott el, amelyeket a milliméteres hullámhossz-tartományú interferometriában és a szubmilliméteres csillagászati megfigyelésekben lehet felhasználni. A kísérleti munkában tanúsított figyelemre méltó képességeinek köszönhetően megint csak egy új területet nyitott a tudományban, melyet folyamatosan és erőteljesen alkalmaznak az Owens Völgyi Rádióobszervatóriumban és az Atacamai Nagy Méretű Milliméteres/Szubmilliméteres Hálózatnál (ALMA) Chilében.

Robert Lightont 1997. március 9-én, a kaliforniai Pasadenában érte utol a halál.

Matthew Sands

Matthew Sands 1919-ben, a Massachusetts állambeli Oxfordban született. Alapképzést a Clark Universityn kapott, a mesterfokozatot a Rice Universityn szerezte meg 1941-ben. A második világháború alatt Los Alamosban, a Manhattan projekt-nél szolgált, elektronikával és műszerezéssel foglalkozott. A háború után Sands részt vett a Los Alamos Federation of Atomic Scientists megalakításában, mely a nukleáris fegyverek további alkalmazásának megakadályozásáért lobbizott. Ez alatt az idő alatt szerezte meg a PhD-fokozatot az MIT-n, Bruno Rossi vezetésével a kozmikus sugárzást kutatta.

1950-ben Sandset felvette a Caltech, hogy segédkezzen az 1,5 GeV-os szinkrotron megépítésében és működtetésében. Ő volt az első, aki – elméleti és kísérleti úton – megmutatta, mennyire fontos szerepet játszanak a kvantumeffektusok az elektrongyorsítókban.

1960 és 1966 között Sands részt vett a Főiskolai Fizika Bizottságának munkájában, élharcosa volt a Caltech alapfokú fizikaprogramja reformjának, amelynek egyik eredményeként a *The Feynman Lectures on Physics* megszületett. Ebben az időben Sands tanácsadóként az Elnök Tudományos Tanácsadói Bizottságának, a Fegyverzet-ellenőrzési és Leszerelési Ügynökségnek, valamint a Védelmi Minisztériumnak is dolgozott.

1963-ban Sandset kinevezték a Stanford Linear Accelerator (stanfordi lineáris gyorsító, SLAC) építésért és működésért felelős igazgatójának, ahol a 3 GeV-os Stanford Positron Electron Asymmetric Rings (stanfordi aszimmetrikus elektron-positron tárológyűrű, SPEAR) megvalósításán is dolgozott.

1969-től 1985-ig a University of California (Santa Cruz) fizikaprofesszora volt, 1969 és 1972 között az egyetem tudományos kancellárhelyetteseként is tevékenykedett. 1972-ben Kiváló Szolgálatért éremmel tüntette ki az Amerikai Fizikatanárok Egyesülete. Emeritus professzor-ként egészen 1994-ig aktívan részt vett a gyorsító kutatásban. 1998-ban az Amerikai Fizikai Társulat „a gyorsítófizikához történt sokoldalú hozzájárulásáért, valamint az elektron-positron és a protonütköztetők felépítéséért” Robert R. Wilson-díjjal tüntette ki.

Nyugdíjasként Sands Santa Cruzban helybeli elemi és középiskolai természettudomány-tanároknak segített a számítógépeket üzembe helyezni, illetve a bemutató kísérleteket megtervezni. Felügyelte a *Feynman's Tips on Physics* című gyűjtemény szerkesztését is, sőt a könyvhöz egy memoárral is hozzájárult, amelyben a *The Feynman Lectures on Physics* keletkezésének körülményeiről írt.

Matthew Sands 2014. szeptember 3-án, a kaliforniai Santa Cruzban hunyt el.

Előszó az új, millenniumi kiadáshoz

Hozzávetőleg ötven év telt el azóta, hogy Richard Feynman először adta elő a Caltechben bevezető fizikakurzusát, a *The Feynman Lectures on Physics* (magyarul: *Mai fizika*) című könyvsorozatának alapját. Ez alatt az ötven év alatt a fizikai világ megértésében jelentős változások álltak be, de a *The Feynman Lectures on Physics* nem veszítette el aktualitását

ennek a fejlődésnek a hatására. Feynman előadásai ma is olyan átütő erejűek, mint első kiadásuk idején, köszönhetően Feynman egyedi fizikai látásmódjának és pedagógiai érzékének. Kezdő és érett fizikusok egyaránt merítették és merítenek belőle szerte a világon; vagy egy tucat nyelvre lefordították, csak angol nyelven több mint másfél millió példányt nyomtattak belőle. Talán egyetlen fizikatan könyvnek sem volt ilyen hosszan tartó és széles körű hatása.

Ezzel az új, millenniumi kiadással új korszak nyílik meg a *The Feynman Lectures on Physics (FLP)* történetében: az elektronikus kiadás immár 21. századi praxisába lép be. Az *FLP*-ből *eFLP* lett azáltal, hogy a szöveg és a képletek LaTeX-ben – egy elektronikus szedő- és tördelőprogramban – íródtak, s valamennyi ábrát újra elkészítették egy modern rajzolóprogram segítségével.

Ez a változás a jelen, *papír alapú* kiadásra nézve nem jár lényeges következményekkel; szinte ugyanúgy néz ki, mint a fizikushallgatók által évtizedeken keresztül ismert és kedvelt eredeti, vörös kötetek. A változást a kibővített és javított index, az olvasók által az előző kiadás első kinyomtatása óta eltelt öt év folyamán felfedezett 885 hiba kijavítása, valamint a jövőbeli olvasók által felfedezhető hibák kijavításának technikai megkönnyítése jelenti. Erre később még visszatérek.

E kiadás *e-book-változata*, és a *kiterjesztett elektronikus változat* elektronikus innovációk. A 20. századi műszaki könyvek e-book-változataival ellentétben, amelyekben a nagyítás során az egyenletek, ábrák, sőt olykor még a szöveg minősége is jelentősen romlott, az új, millenniumi kiadás LaTeX forráskódja a lehető legjobb minőségű e-book előállítását teszi lehetővé, egy-egy oldal összes eleme (a fényképek kivételével) változatlan élesség mellett korlátlanul nagyítható. A kiterjesztett elektronikus változat Feynman eredeti előadásainak táblavázlatairól készült fényképekkel, hangbejátszásokkal, továbbá más forrásokhoz vezető mutatóival olyan innováció, amely minden bizonnyal nagy örömet szerezne Feynmannak.

Visszaemlékezések Feynman előadásaira

Ez a három kötet [a fizika] önmagában teljes didaktikus tárgyalása. Egyben Feynman 1961–64-es bevezető fizikai előadásainak történelmi dokumentuma, mely előadásokat a Caltech összes első- és másodéves hallgatójának látogatni kellett, függetlenül attól, hogy mi volt a főszakja.

Az olvasó – akárcsak én – kíváncsi lehet, vajon mekkora hatást gyakorolt Feynman a hallgatóságára. Könyvének előszavában a szerző ebben a tekintetben meglehetősen negatív véleményen van. „Nem hiszem, hogy

a hallgatónál jól szerepeltem.” – írja. Matthew Sands *Feynman's Tips on Physics* című memoárjában jóval pozitívabb álláspontot képvisel. 2005 tavaszán e-levéllal megkerestem, illetve beszélgettem Feynman 1961–63-as előadásainak 17, nagyjából véletlenszerűen kiválasztott egykori hallgatójával (a 150-ből) – olyanokkal, akiknek nehézséget okozott az előadás követése, és olyanokkal is, akik könnyedén felfogták az elhangzottakat. Volt, akinek a biológia, a kémia, a műszaki tudomány, a geológia, a matematika és a csillagászat volt a főtárgya, volt, akinek természetesen a fizika.

Az eltelt idő ugyan megszépítheti az emlékeket, de a megkérdezettek mintegy 80 százaléka egyetemi éveinek csúcspontjaként idézte fel Feynman előadásait. „Olyan volt, mintha templomba mentem volna.” Az előadások egyfajta „transzformációs élményt” jelentettek, „életre szóló élményt, valószínűleg a legfontosabb dolgot, amit a Caltechtől kaptam”. „Biológia volt a főtárgyam, de Feynman előadásai első egyetemi éveim csúcspontját jelentették... bár el kell ismernem, hogy nem tudtam megoldani a házi feladatokat, alig tudtam beadni közülük néhányat.” „A kurzus legkevésbé ígéretes hallgatói közé tartoztam, de nem hagytam ki egyetlen előadást sem... Emlékszem rá, és még most is képes vagyok átérezni Feynman felfedezés iránti lelkesedését... Előadásai érzelmeket gerjesztettek, ami valószínűleg nem vihető át az előadások nyomtatott változatába.”

Ellentétképpen, néhány volt hallgatónak negatívak az emlékei, általában a következő két okból kifolyólag: 1. „Az előadáson nem derült ki, hogyan fogj hozzá a házi feladat megoldásához. Feynman ravasz volt – ő ismerte a trükköket és a megfelelő közelítéseket; rendelkezett továbbá tapasztalaton alapuló intuícióval és zsenialitással, amivel egy kezdő hallgató nem rendelkezhet.” Feynman és munkatársai tisztaban voltak a kurzus e hiányosságával, részben pótolták is a *Feynman's Tips on Physics*-be foglalt anyaggal: ez Feynman három problémamegoldó előadását tartalmazza, valamint Robert B. Leighton és Rochus Vogt által összegyűjtött feladatokat és megoldásukat. 2. „A bizonytalanság, hogy nem tudtuk, mi hangzik majd el a következő előadáson, a tankönyv, illetve az előadott anyaggal bármiféle kapcsolatban álló referenciamunka hiánya, és hogy következőképp soha nem tudtunk az előadásra felkészülni – mindez nagyon nyomasztó volt... Az előadást nagyon izgalmasnak és érthetőnek találtam az előadóteremben, de azon kívül [amikor megpróbáltam részleteiben rekonstruálni] szanszkritnak tűnt.” A három kötet, a *The Feynman Lectures on Physics* nyomtatott változata természetesen orvosolja ezt a problémát. Ez lett az a tankönyv, amelyből a Caltech hallgatói aztán sok éven keresztül tanultak, s Feynman egyik legfőbb örökségeként ma is tovább él.

A hibajegyzék története

A *The Feynman Lectures on Physics* nagyon gyorsan készült el. Feynman és szerzőtársai, Robert B. Leighton és Matthew Sands az előadások magnófelvételeiből és táblafotóiból dolgoztak, azokat bővítették ki² (az új, millenniumi kiadás kiterjesztett elektronikus változata mind a táblafotókat, mind a magnófelvételeket tartalmazza). Feynman, Leighton és Sands munkatempója mellett szinte törvényszerűen sok hiba csúszott az első kiadásba. A következő években Feynman hosszú listákat készített a valószínűsíthető hibákról, amelyeket részben a hallgatók, részben a Caltech oktatói, részben pedig a könyv olvasói fedeztek fel szerte a világon. Az 1960-as években és az 1970-es évek elején Feynman megfeszített életmódja ellenére is talált időt arra, hogy az I. és II. kötetben felfedezett hibák legtöbbször – de nem mindet – ellenőrizze, s az újabb és újabb utánnyomásokat korrekciókkal lássa el. De Feynman kötelességtudata soha nem nyomta el annyira az új dolgok felfedezése iránti lelkesedését, hogy rávegye magát a III. kötet hibajegyzékének összeállítására.³ 1988-ban bekövetkezett korai halála után mindhárom kötet hibajegyzéke a Caltech archívumába került, s ott pihent elfeledve.

2002-ben Ralph Leighton (Robert B. Leighton fia és Feynman honfitársa) tájékoztatott engem a régi hibajegyzékről és egy új, hosszú hibalistáról, amit Ralph barátja, Michael Gottlieb állított össze. Leighton azt javasolta, hogy a Caltech adja ki a *The Feynman Lectures on Physics* új, javított kiadását, megtoldva a kiegészítő *Feynman's Tips on Physics* kötettel, amelyet ő és Gottlieb készítettek elő.

Feynman a példaképem volt, és szoros barátság fűzött hozzá. Látni a hibajegyzéket és megismerkedve a javasolt új kötet tartalmával, könnyen ráálltam, hogy a Caltech képviselőiben magamra vállaltam ennek a projektnek az irányítását (hosszú időn át a Caltech volt Feynman tudományos otthona, ezért Feynman, Leighton és Sands a Caltechre ruházta át a *The Feynman Lectures on Physics* jogait és az ezzel járó kötelezettségeket). Gottlieb másfél éves aprólékos munkáját és dr. Michael Hartl (a Caltech kiváló posztdoktora, aki a hibák javítását ellenőrizte, továbbá az új kötetet lektorálta) gondos ellenőrzését követően, 2005-ben megszületett a

²A Feynman-előadások és e kötetek keletkezési körülményeiről lásd Feynman előszavát, továbbá Matthew Sands memoárját a *Feynman's tips on Physics* című gyűjteményben, valamint David Goodsteinnek és Gerry Neugebauernek az *FLP* emlékkiadásához írt alkalmi előszavát, amely egyébként a végleges kiadás 2005-ös utánnyomásában is olvasható.

³1975-ben elkezdte ellenőrizni a III. kötet hibajegyzékét, de egyéb kötelezettségei elvonták a figyelmét, ezért soha nem fejezte be ezt a feladatot, így nem történt kiigazítás.

Definitive Edition of The Feynman Lectures on Physics, amely körülbelül 200 javítást tartalmazott, továbbá a *Feynman Tips on Physics* című új kötet, amelynek Feynman, Gottlieb és Leighton voltak a szerzői.

Én valóban úgy *gondoltam*, hogy ez lesz a „végleges” kiadás. Nem kalkuláltam az olvasók lelkes reakciójával, akik Gottlieb felhívására világszerte további hibákat kutattak fel és tettek közzé az általa létrehozott és azóta is élő weboldalon, a www.feynmanlectures.info-n. Az azóta eltelt 5 év alatt 965 olyan hibát jeleztek, amelyek Gottlieb, Hartl és Nate Bode (a Caltech kiváló, végzett hallgatója, Hartl hibakereső munkájának örököse a Caltechen) pedáns ellenőrzésének próbáját is kiállták. A végleges kiadás negyedik utánnnyomásában (2006. augusztus) ezek közül a hibák közül 80-at kijavítottak, a maradék 885 javítására ebben az új, *millenniumi kiadásban* került sor (332 az I. kötetben, 263 a II. kötetben, és 200 a III. kötetben). A részleteket lásd a www.feynmanlectures.info-n.

Nyilvánvaló, hogy a *The Feynman Lectures on Physics* hibamentesítése egy nemzetközi vállalkozás. A Caltech nevében megköszönöm annak az 50 olvasónak a munkáját, akik 2005 óta részt vettek ebben a vállalkozásban, s azoknak is, akik a jövőben fognak. A közreműködők névsorát a www.feynmanlectures.info/flp_errata.html oldalon olvashatják.

A hibák zöme három csoportba sorolható: (1) a szövegben előforduló elütések; (2) elütések, illetve matematikai hibák a képletekben, a táblázatokban és az ábrákban – ezek hibás előjelek vagy számok (mondjuk, 4 helyett 5 szerepel), lemaradt indexek, összegzőjelek, zárójelek és képletekből hiányzó tagok; (3) hibás fejezet-, táblázat- és ábrahivatkozások. Ezek a hibák – jóllehet egy képzett fizikus szemében nem komolyak – elkedvetleníthetik, összezavarhatják Feynman elsődleges olvasóközönségét: az egyetemi hallgatókat.

Érdeemes megemlíteni, hogy az én védnökségem alatt kijavított 1165 hiba közül alig néhány volt igazi, elvi jellegű hiba. Ilyenre példa az 59. fejezet 10. szakaszának egy állítása, mely most így hangzik: „...zárt, földelt vezető gömb belsejében semmilyen sztatikus eloszlású töltés nem hozhat létre külső [elektromos] teret” (a korábbi kiadásokban nem szerepel a földelt szó). Erre a hibára több olvasó is felhívta Feynman figyelmét, többek között Beluah Elizabeth Cox, a The College of William and Mary hallgatója is, aki egy vizsgán Feynman hibás kitételére hivatkozott. Cox kisasszonynak Feynman ezt írta 1975-ben:⁴ „Oktatójának igaza volt, amikor nem adott Önnek egyetlen pontot sem az Ön rossz válaszára, amint

⁴ *Perfectly Reasonable Deviations from the Beaten Truck, The Letters of Richard P. Feynman*, (szerk.: Michelle Feynman), Basic Books, New York, 2005, 288–289.

azt a Gauss-törvény segítségével meg is mutatta. A tudományban hangsúlyozottan a logikának és az érveknek kell hinnie, nem a tekintélyeknek. Ön is figyelmesen elolvasta a könyvet és megértette azt. Hibát vétettem, tehát a könyv hibás. Valószínűleg földelt vezető gömbre gondoltam, vagy arra a tényre, hogy a belsejében mozgatott töltések semmiféle hatással nincsenek a külvilágra. Nem tudom pontosan, hogyan történt, de bakot lőttem. És Ön is hibázott, mert hitt nekem!”

Hogyan keletkezett az új, millenniumi kiadás?

2005 novembere és 2006 júliusa között 340 hibajelzés érkezett be a *The Feynman Lectures on Physics* weboldalára, a www.feynmanlectures.info-ra. Említésre érdemes, hogy ezek nagy része egyetlen személytől, a bécsi egyetem kutatói ösztöndíjasától, dr. Rudolf Pfeiffertől származott. A kiadó, az Addison Wesley, 80 hibát ki is küszöbölt, de a további hibajavítást leállította a költségek miatt: a könyvet ofszet-eljárással nyomtatták, s az 1960-as kiadás lemezeivel dolgoztak. Egy-egy hiba kijavítása a megfelelő oldal újraszedését jelentette, s hogy biztosan ne kerülhessenek újabb hibák az oldalra, a szedést két szedő is elvégezte, a két levonatot összehasonlították és korrigálták – ez valóban nagyon költséges eljárás, ha több száz hibáról van szó.

Gottliebet, Pfeiffert és Ralph Leightont nagyon elkésérítette ez a hozzáállás, s terveket kezdtek szőni, melyek az összes hiba kijavítását, valamint a *The Feynman Lectures on Physics* e-könyv, illetve kiterjesztett elektronikus változat formájában való megjelentetését célozták. Tervüket 2007-ben mutatták be nekem, mint a Caltech képviselőjének. Lelkes, ám óvatos voltam. Miután megismertem a részleteket, többek közt a tervezett *kiterjesztett elektronikus kiadás* egy próbafejezetét, azt javasoltam, hogy a Caltech működjön együtt Gottliebbel, Pfeifferrel és Leightonnal a terv megvalósításában. A javaslatot a Caltech fizikai, matematikai és csillagászati osztályának három egymást követő elnöke – Tom Tombrello, Andrew Lange és Tom Soifer – is elfogadta; a jogok és szerződések részleteinek kidolgozását Adam Cochran, a Caltech szerzői jogi tanácsadója végezte el. Az új, millenniumi kiadás közreadásával a tervet sikeresen végrehajtottuk, annak ellenére, hogy ez egy rendkívül komplex munka volt. Nevezetesen:

Pfeiffer és Gottlieb az *FLP* mindhárom kötetét konvertálta LaTeX-be (azt a több mint 1000 feladatot is, amelyek a *Feynman Tips on Physics*-be kerültek). Az *FLP* ábráit modern, elektronikus formában Indiában rajzolták újra az *FLP* német fordítója, Henning Heinze irányításával. Pfeiffer

és Gottlieb nem kizárólagos jogosultsággal eladták LaTeX-fájljaik felhasználási jogát a német kiadás számára (ami az Oldenbourg Verlagnál jelent meg), cserébe Heinze ábráinak nem kizárólagos felhasználási jogáért, amelyeket ez az új, millenniumi kiadás tartalmaz. Pfeiffer és Gottlieb aprólékos gonddal ellenőrizte a LaTeX-fájlok szövegállományát, képleteit és újrarajzolt ábráit, s elvégezték a szükséges korrekciókat. Nate Bode és én, a Caltech képviselőjében, szűrőpróbaszerűen ellenőriztük a szöveget, a képleteket és az ábrákat; figyelemre méltó, hogy nem találtunk hibát. Pfeiffer és Gottlieb hihetetlenül gondos és alapos munkát végzett. Megegyeztünk John Sullivannal, a Huntington Library fotóarchívumának vezetőjével, hogy digitalizálják Feynman 1962–64-es táblafelvételeit, valamint a George Blood Audioval, hogy digitalizálják az előadások magnófelvételeit – az egyezséghez anyagi támogatást és buzdítást adott Carver Mead, a Caltech professzora, logisztika támogatást Shelley Erwin, a Caltech archiválási szakembere, jogi segítséget pedig Cochran.

Komoly jogi nehézségeink voltak: A Caltech az 1960-as években a nyomtatott kiadás jogát, majd az 1990-es években a Feynman-előadások hangfelvételeinek terjesztési jogát, valamint egy elektronikus változat kiadási jogát is az Addison Wesleynek adta át. A 2000-es években, egymást követő jogvásárlások eredményeként, a nyomtatott formában való kiadás joga a Pearson kiadói csoporthoz került, míg a hangfelvételek és az elektronikus kiadás joga a Perseus kiadói csoporthoz. Cochran a kiadói jogokra szakosodott ügyvéd, Ike Williams segítségével elérte, hogy az összes kiadói jog a Perseushoz (Basic Books) kerüljön át. Így vált lehetségessé ez az új, millenniumi kiadás.

Köszönetnyilvánítás

A Caltech nevében köszönetet mondok mindazoknak, akik lehetővé tették ezt az új, millenniumi kiadást. Külön köszönöm a fentebb már említett kulcsszereplők: Ralph Leighton, Michael Gottlieb, Tom Tombrello, Michael Hartl, Rudolf Pfeiffer, Henning Heinze, Adam Cochran, Carver Mead, Nate Bode, Shelley Erwin, Andrew Lange, Tom Soifer és Ike Williams munkáját. Köszönet illeti azt az 50 embert is, aki a (www.feynmanlectures.info-n közzétett) hibákat felfedezte. Hálás vagyok Michelle Feynmannak (Richard Feynman lányának) folyamatos támogatásáért és tanácsaiért, Alan Rice-nek, a Caltech munkatársának háttérasszisztenciájáért és tanácsaiért, Stephan Pucheggernek és Calvin Jacksonnak az *FLP* LaTeX-re konvertálásában nyújtott segítségükért, Michael Figlnek, Manfred Smoliknak és Andreas Stanglnak az errata korrekcióinak megvitatásáért, vala-

mint a Perseus/Basic Books és (a korábbi kiadásokért) az Addison Wesley munkatársainak.

2010. október

KIP S. THORNE
az elméleti fizika emeritus Feynman-professzora

Feynman előszava

A könyv alapjául szolgáló fizika-előadásokat az 1962–1963-as és az azt megelőző tanévben adtam elő a California Institute of Technology (Caltech) első- és másodéves hallgatóinak. A leírtak az elmondottakkal természetesen nem egyeznek szó szerint, a szöveg néhol erőteljesen, néhol kevésbé át van dolgozva. A 180 diákból álló teljes csoport hetente kétszer hallgatta óráimat, majd 15–20 tagból álló kis csoportokba osztva, egy-egy tanársegéd vezetésével ellenőrző tankörökön vettek részt. Továbbá egyszer egy héten laboratóriumi foglalkozás is volt.

Az előadások kidolgozásában az a cél vezetett, hogy fenntartsuk a középiskolából kikerült és a Caltechbe beiratkozott, nagyon lelkes és eleven gondolkodású diákok érdeklődését a fizika iránt. Ezek a diákok már igen sokat hallottak arról, milyen szórakoztató és érdekfeszítő a fizika, a relativitáselmélet, a kvantummechanika stb. A korábbi évfolyamokban a hallgatók közül a második év vége felé már sokan elveszítették kedvüket, mert valóban csak kevés kiemelkedően új és korszerű gondolattal ismerkedhettek meg. Lejtőkről, elektrosztatikáról és egyéb hasonlókról tanultak, s bizony két év után mindez meglehetősen szegényesnek tűnt. Feladatunkat tehát abban láttuk, vajon tudunk-e olyan előadási, illetve tárgyalási módszertant létrehozni, amely a fejlett gondolkodású és felcsigázott érdeklődésű hallgató lelkesedését megőrzi a fizika számára.

Az itt közöltek nem egyszerűen áttekintést kívánnak adni. Az évfolyam legjobbjai számára terveztem előadásaimat, mégpedig úgy, hogy lehetőleg még ezek a hallgatók se értsék meg azonnal mindazt, amit az előadás tartalmaz. Sok helyen utalok a gondolatoknak és elveknek a fővonalától eltérő, különböző irányú alkalmazásaira. E cél érdekében azonban igen következetesen arra törekedtem, hogy minden megállapítást a lehető legpontosabban mondjak ki, minden esetben rámutatva, hol illeszkednek a fogalmak és egyenletek a fizika törzsébe, és hogyan kell a későbbiek során majd módosítani egyes elképzeléseket. Éreztem azt is, hogy fontos megemlíteni, mi az, amire az elmondottakból következtetés útján nekik

maguknak kell rájönniük, és mi az, amit újdonságként kell kezelniük. Ha új elképzelés tárgyalására tértem rá, megpróbáltam vagy levezetni, ha levezethető volt, vagy megértetni, hogy az új elképzelés az addig tanultak révén nem alapozható meg, bebizonyíthatóságát sem kell feltételezni, egyszerűen hozzá kell illeszteni a meglevőkhöz.

Az előadás-sorozat kezdetén feltételeztem, hogy a hallgató hozott magával bizonyos ismereteket a középiskolából (geometriai optika, egyszerűbb kémiai fogalmak stb.). Nem láttam értelmét annak, hogy az előadásokban meghatározott sorrendet tartsak abban az értelemben, hogy ne szabadjon addig valamit megemlítenem, ameddig a részletekbe menő tárgyalásig el nem jutottunk. Számos esetben említettem meg teljes kifejtés nélkül olyan dolgokat, amelyeknek részletesebb ismertetésére csak később, a felkészültség magasabb fokain került sor. Például az indukció jelenségeivel vagy az energiaszintekkel kapcsolatos fogalmakat először csak kvalitatíve vezettem be, s csak jóval később fejtettem ki.

Előadásaimban mindig és elsősorban a legaktívabb diákhhoz szóltam, de igyekeztem gondot fordítani arra a diákra is, akire a gondolatok tűzijátéka és a legkülönbözőbb alkalmazási területek bemutatása talán fárasztóan és nyugtalanítóan hatott, és akitől nem várhattam el, hogy az előadások egész anyagát megeméssze. Szem előtt tartottam, hogy az ilyen hallgató részére legalább legyen az anyagnak olyan magva, gerince, amelyet képes befogadni. Reméltem, hogy nem kedvetlenedik el, ha nem ért meg mindent az előadásokból. Nem is vártam, hogy mindent megértsen, csupán a döntő és kézenfekvő kérdéseket. Természetesen e hallgató részéről is bizonyos intelligenciát kell feltételeznünk, hogy látja, melyek a döntően fontos fogalmak és elméletek, s melyek azok a mellékeredmények és alkalmazások, amelyeknek megértését a későbbi évekre kell halasztania.

Az előadások folyamán egy komoly nehézség támadt: nem volt „visszacsatolás” a diáktól az előadóhoz, amely megmutatta volna, milyen mértékben valósul meg az előadott anyag átadása. Enélkül így nagyon nehéz eldönteni, vajon mennyire is voltak jók és eredményesek az órák. Az egész tulajdonképpen kísérletnek szántam. És ha netalán újra kezdeném, biztosan másképp csinálnám! Kételyeim ellenére ma úgy érzem, hogy – legalábbis ami a fizikát illeti – az első évben kielégítően sikerült a témákat kidolgoznom.

A második évben már kevésbé voltam megelégedve. Az előadások első felében az elektromossággal és mágnességgel foglalkoztam, és nem tudtam kiokoskodni „egyéni” vagy legalábbis a szokásostól eltérő tárgyalásmódot, amely a réginél lényegesen érdekfeszítőbb lett volna. Nem hiszem, hogy

sok újat adtam az elektromosságról és mágnességről szóló előadások felépítésében. A második év végén eredeti módon szándékoztam tovább haladni, az elektromosság és mágnesség után néhány előadásban az anyag tulajdonságait, de főként olyan témákat szerettem volna érinteni, mint az alaprezgések, a diffúziós egyenletek megoldásai, rezgő rendszerek, az ortogonális függvények stb., kiépíteni az első lépcsőfokát annak, amit „a fizika matematikai módszereinek” nevezünk. Visszatekintve úgy gondolom, ha még egyszer csinálnám, visszatérnék ehhez az eredeti elképzeléshez. Minthogy ez nem aktuális, az előadások anyagát kiegészítettük egy kvantummechanikai bevezetővel.

Az a tanuló, aki főtárgyként a fizikát választotta, nyilván várhat a kvantummechanikával a harmadik évig. Figyelembe kellett azonban vennem, hogy a résztvevők közül sokan csak kiegészítésként hallgatják a fizikát. És a kvantummechanika szokásos tárgyalása ezt a tantárgyat a többség számára szinte elérhetetlenné teszi, minthogy megtanulása nagyon hosszú időt vesz igénybe. Pedig a gyakorlati alkalmazásokban – például a bonyolult elektronikai vagy kémiai alkalmazásokban – a differenciálegyenletekkel való tárgyalás teljes apparátusát valójában nem is használják. Ezért megpróbáltam a kvantummechanika elveit olyan módszerrel leírni, amely nem követeli meg a tanulótól a parciális differenciálegyenletek matematikájának ismeretét. Azt hiszem, a hivatásos fizikus számára is érdekes kísérlet a kvantummechanikát ezen a fordított úton bemutatni (ennek okai az előadásokból majd érthetővé válnak). Mindamellettt újszerű tárgyalási kísérletem a kvantummechanikai részben nem volt egészen sikeres, főként azért nem, mert a vége felé kifutottam az időből. (Három-négy további előadásra lett volna szükség, hogy például az energiasávokkal vagy az amplitúdók térbeli függésével még részletesebben foglalkozzam.) Ezt a tárgyat ilyen módszerrel még soha nem adtam elő, s így a visszacsatolás hiánya itt különösen komoly hátrányt jelentett. Arra a meggyőződésre jutottam, hogy a kvantummechanikát inkább a tárgyalás egy későbbi szakaszában kell előadni. Nincs kizárva, hogy valamikor lesz még alkalmam az előadás-sorozat megismétlésére, akkor majd a helyes utat választom.

Feladatmegoldással azért nem foglalkoztam az előadásaim során, mert erre tanköri foglalkozásokon kerítettünk sort. Bár az első évben tartottam három olyan előadást, amelyeken feladatok megoldási módszereiről beszéltem, ezek az előadások nem kerültek bele a könyvbe. Ugyancsak kimaradt az az előadás, amely az inerciális navigációs rendszerről szólt,

szoros összefüggésben a forgómozgással. Az ötödik és a hatodik előadást Matthew Sands tartotta meg, mivel én távol voltam.

Felmerül természetesen a kérdés, mennyiben sikerült a kísérlet. Az én véleményem – amelyben azonban úgy látszik, a diákokkal foglalkozók többsége nem osztozik – borúlátó. Nem hiszem, hogy a hallgatóknál jól szerepeltem. Ha csak azt nézem, hogy többségük miként kezeli a problémákat a vizsgákon, az az érzésem, hogy ez az új előadási rendszer nem váltotta be a hozzáfűzött reményeket. Barátaim ugyan hangoztatják, hogy volt tíz vagy húsz olyan diák, akik – és ez igen meglepő – majdnem mindent megértettek az előadásokból, fogékonyan és önállóan bánni tudtak az anyaggal, izgatottan, feszült érdeklődéssel gyötrődtek a sok kérdésen. Ezek most valóban jól megalapozott fizikai tudással rendelkeznek, s végül is ők azok, akiknek az előadásaimat terveztem. Persze, ne feledjük, hogy: „A nevelésre fordított erőfeszítésnek ritkán van nagy hatása, kivéve azokat a szerencsés eseteket, ahol az erőfeszítés majdnem felesleges.” (Gibbons)

Mindenesetre nem akartam egyetlen diákot sem teljesen magára hagyni, bár ez talán mégis előfordult. Úgy látom, az egyetlen mód, hogy a diákoknak több segítséget nyújtsunk, az lenne, ha még több munkát fektetnénk egy sor feladat kidolgozásába, s ezzel elősegítenénk néhány fogalom jobb megvilágítását. A feladatokkal jól kiegészíthető az előadások anyaga, segítségükkel a bemutatott fogalmakat világosabban tisztázva, biztosabban be lehet építeni a gondolkodásmódba.

Mégis azt hiszem, hogy az oktatás problémájának nincsen más megoldása, mint belátni, hogy a legjobb tanítási rendszer is csak akkor valósulhat meg, ha közvetlen, egyéni kapcsolat létesül a diák és egy jó tanár között, a hallgató megvitathatja az anyagot, gondolkodva fogadja el az elveket, és elbeszélgethet a tanultakról. Lehetetlen sokat tanulni pusztán az előadásokon ülve, vagy pusztán csak a kijelölt feladatokon dolgozva. Korunkban azonban olyan sok tanulót kell oktatni, hogy az ideális helyett közvetítő megoldással kell megpróbálkoznunk. Talán az én előadásaim is hozzájárulnak ehhez. Szűkebb körben, ahol lehetségessé válik a hallgatókkal való egyéni foglalkozás, néhány ötletet vagy inspirációt nyerhetnek belőlük. Talán szórakozást is jelent majd, ha átgondolják őket, és esetleg néhány gondolatot továbbfejlesztenek.

1963. június

RICHARD P. FEYNMAN