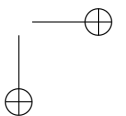
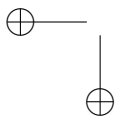
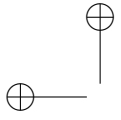
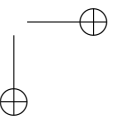
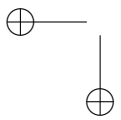
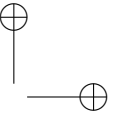


A Feynman-előadások fizikából





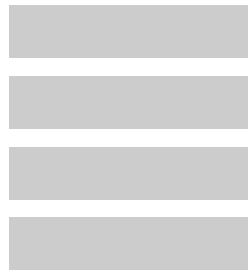
“feynman” — 2018/4/10 — 19:47 — page 2 — #2



A Feynman-előadások fizikából

Richard P. Feynman
Robert B. Leighton
Matthew Sands

I. kötet



tt
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

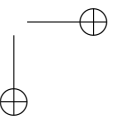
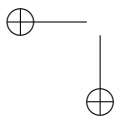
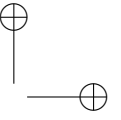
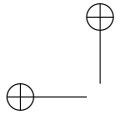
Előszó a magyar kiadáshoz	11
A szerzőkről	13
Előszó az új, millenniumi kiadáshoz	16
Feynman előszava	23
1. Atomok mozgásban	27
1.1. Bevezetés	27
1.2. Az anyag atomokból épül fel	29
1.3. Atomi folyamatok	34
1.4. Kémiai reakciók	38
2. A fizika alapjai	43
2.1. Bevezetés	43
2.2. A fizika 1920 előtt	46
2.3. 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

<i>Tartalom</i>	7
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. Téridő	304
17.1. A téridő geometriája	304
17.2. Téridő-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

<i>Tartalom</i>	9
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 jelentette meg az a hallgató, aki egy előadásomat okostelefonján követve rám szolt: „az Univerzum életkora nem 13,7 milliárd, hanem 13,82 milliárd év”. A gyorsan változó hangsúlyok és tartalmak a kiadót 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 tanulóitok kezdőknek óvatosság 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 jelenségkörben a legegyszerűbb (néha az előadás céljaira kitalált) kísérletekre alapozva építi ki a legalkalmasabb fogalmakat, majd olyan jelenségeknek és módszereknek a megbeszélésére koncentrálnak, amelyek túl a fizikán is visszaköszönnek. Nem sajnálja az időt, részletesen kifejti például a rezonancia jelenségének széles természeti jelenségkörben 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 részecskékké történő azonosításában a kvarkhipotézis kimondásáig. Ma a kvarkok léte kétségbevonhatatlan 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 természetet 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 alaptételeket 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 Technologyn 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 kvark-elmélet 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 szinthe 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 kiüntetés között különösen büszke volt az Oersted-éremre, amelyet 1972-ben kapott meg, és a legjobb oktatókat jutalmazzák 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

¹A *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 kivizsgáló 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 részecskék 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 tányéranennák 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 Leightont 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 projektnél 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 szerzte 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 elektrongyorsítóknakban.

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 aligazgatójának, 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 merítettek 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 tördelő-programban – 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 hallgatóknál 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-ból) – 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 megszőpítheti 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 tisztában 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 örökségként 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. Látva a hibajegyzéket és megismerkedve a javasolt új kötet tartalmával, könnyen ráálltam, hogy a Caltech képviselőjében magamra vállaljam 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 utánnomlásában (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.

Érdemes 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 Track, 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 kívülágra. 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 újraszédését jelentette, s hogy biztosan ne kerülhessenek újabb hibák az oldalra, a szédést két szedő is elvégezte, a két levonatot összehasonlítták és korrigálták – ez valóban nagyon költséges eljárás, ha több száz hibáról van szó.

Gottliebet, Pfeiffert és Ralph Leightont nagyon elkeserítette 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 próbaféjezetét, azt javasoltam, hogy a Caltech működjön együtt Gottliebvel, 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 képviselőként, 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 érdekes 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 meglévőkhöz.

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 diákhoz 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 tetulajdonképpen 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 fő tárgyként 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). Mindamelllett 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 lehetőségessé 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

1. fejezet

Atomok mozgásban

1.1. Bevezetés

E könyvnek ugyanaz a célkitűzése, mint az eredeti kétéves fizikatanfolyamnak. Azzal a gondolattal állítottuk össze, hogy Önök, az olvasók, fizikusnak készülnek. Természetesen ez nem feltétlenül szükséges szempont, de melyik professzor nem tételez fel hasonlót tantárgya előadásakor! Ha Önök fizikával óhajtanak foglalkozni, nagyon sok mindent kell megtanulniuk: egy gyorsan fejlődő tudományág kétszáz év alatt felhalmozódott eredményei állnak Önök előtt. Oly hatalmas ismeretanyag, hogy joggal vethetik fel a gondolatot, négy év alatt nem is tudják majd mindezt megtanulni. S valóban nem, hiszen a négy év elvégzése után még mesterképzésre is be kell iratkozniuk!

Élég meglepő, hogy a kétszáz év alatt véghezvitt hatalmas munka ellenére az eredmények óriási halmaza mégis összefogható, vagyis tudunk találni *törvényeket*, amelyek köré ismereteink csoportosíthatók. Azonban ezeket a törvényeket olyan nehéz jól átlátni, hogy e hatalmas ismeretanyag magyarázatának megkezdése előtt legalábbis vázlatosan körvonaloznunk kell a különböző tudományok egymáshoz való viszonyát. Az első három fejezetben vázlatosan ismertetjük a fizika és a többi tudományág kapcsolatát, a tudományágak egymás közti viszonyát, s azt is, hogy mit is kell értenünk tudományon. Mindez segítségünkre lesz majd a tárgy iránti „érzék” kialakításában.

Mellünknek szegezhetnék a kérdést, vajon miért nem úgy tanítjuk a fizikát, hogy mindjárt az első oldalon megadjuk az alapvető törvényeket, s aztán bemutatjuk, hogy ezek érvényesek minden elképzelhető körülményre – ugyanis az euklideszi geometriát így tanítjuk, előbb kimondjuk az axiómákat, aztán mindenfajta következtetést vonunk le azokból. (Más szóval, nem négy év alatt szeretnék a fizikát megtanulni, hanem négy perc alatt?) Két okból nem taníthatunk ilyen módon. Elsősorban azért nem, mert mindeddig nem ismerjük valamennyi alapvető törvényt; sőt az ismeretlen jelenségek köre állandóan tágul. Másodsorban, a fizika törvényeinek pontos megfogalmazása néhány olyan – az olvasó számára talán szokatlan – fogalom bevezetésével jár, amelynek leírásához magasabb matematika is szükséges. Ezért komoly előtanulmányt igényel pusztán annak megértése, hogy maguk a fizikában használatos szavak mit jelente-

nek. Lehetetlen lenne a fizikát ilyen módon tanítani. Csakis fokozatosan, részletről részletre haladhatunk előre.

A természet valamely részletének vagy töredékének ismerete a teljes igazságnak mindig csak pusztán *megközelítése*, vagy ha úgy tetszik, a teljes igazság, már amennyire ismerjük. Valójában minden ismeretünk bizonyos mértékű közelítés csupán, miután *tudjuk, hogy eddig még nincsen birtokunkban minden természettörvény*. Pusztán azért tanulunk, hogy a megtanultakat elfelejtsük, vagy ahogy gyakrabban fordul elő, korrigáljuk.

A tudomány alapelvét nagyjából a következőképpen határozhatnánk meg: *Minden ismeretünk próbaköve a kísérlet*. A tudományos „igazság” *kizárólagos kritériuma* a kísérlet. De mi az ismeret forrása? Honnan kerülnek elő az ellenőrzésre váró törvények? Maguk a kísérletek segítségünkre vannak ugyan a törvények megalkotásában, olyan értelemben, hogy útbaigazítást adnak, de *képzelőerő* szintén szükséges, hogy ezekből az utalásokból nagy általánosításokat hozzunk létre – hogy megtaláljuk a mögöttük meghúzódó csodálatosan egyszerű, de rendkívül újszerű mozzanatokat, hogy azután újra kísérlettel ellenőrizzük, vajon a helyes megfejtés került-e a kezünkbe. Ez utóbbi folyamat olyan bonyolult, hogy munkamegosztást követel a fizikán belül: vannak *elméleti* fizikusok, akik elképzéléseket, elméleteket hoznak létre, következtetnek és új törvényekre bukkannak, de nem kísérleteznek. És vannak *kísérleti* fizikusok, akik kísérleteznek, elveket dolgoznak ki, következtetnek és találgatnak.

Azt mondtuk, hogy a természet törvényei közelítőek; vagyis hogy először a „rossz”, majd a „helyes” törvényeket találjuk meg. Mármost hogyan lehet egy kísérlet „rossz”? Először is a legegyszerűbb módon: készülékünkben valami hiba van, amit nem vettünk észre. De ezek a hibák könnyen megállapíthatók, visszamenőleg és előzetesen is ellenőrizhetők. Tehát ezektől a kis jelentőségű esetektől eltekintve, hogyan *lehet* egy kísérlet rossz? Csakis pontatlanságból eredően. Például egy tárgy tömege állandóan azonosnak tűnik: a forgásban levő pörgettyűnek ugyanakkora a súlya, mint a nyugvóé. Egy „törvényt” fedeztünk hát fel: a tömeg állandó, független a sebességtől. Ma már tudjuk, hogy ez a „törvény” *hibás*. Kiderült ugyanis, hogy a tömeg nő a sebességgel, csak hogy jelentős tömegnövekedéshez a fénysebességhez közeli sebesség szükséges. *Igaz* törvény a következő: ha egy tárgy 100 km/s-nál kisebb sebességgel halad, tömege állandó egymilliomodnyi pontosságon belül. Ilyen közelítő formában ez a törvény helytálló. Azt gondolhatnánk viszont, hogy ezek szerint az új törvény nem jelent különbséget. Igen is és nem is. Közönséges sebességek esetén nyugodtan elfelejthetjük, és egyszerűen az állandó tömeg törvé-

nyét használhatjuk mint jó közelítést. Nagy sebességek esetén azonban ez rossz, s minél nagyobb a sebesség, annál nagyobbat tévedünk.

Végül a legérdekesebb, hogy *általános filozófiai szempontból tekintve, bármely közelítő törvény teljes mértékben hibás*. Világképünket akkor is módosítanunk kell, ha a tömeg a sebességgel csupán a legcsekélyebb mértékben is változik. Ez a törvények mögött húzódó filozófia vagy felfogások különös tulajdonsága. Néha a legkisebb jelenség miatt is mélyrehatóan módosítanunk kell elképzeléseinket.

Mármost, mit tanítsunk először? Tanítsuk talán a *helyes*, de szokatlan törvényt a maga különös és nehéz fogalmaival, például a relativitás elméletét, a négydimenziós téridőt stb.? Vagy pedig tanítsuk először az egyszerű „állandó tömeg” törvényt, amely csupán közelítő, de nem foglal magában ilyen nehéz fogalmakat? Az első út érdekesítőbb, szebb és szórakoztatóbb, de az utóbbi könnyebb előszörre, és első lépcsőfoka az első út valódi megértésének. Ez a kérdés mindig felmerül a fizika tanításában, és a tárgyalás során mindig másképpen kell majd megoldanunk. A tanulás minden fázisában, mindig érdemes azonban utánanézni, mi ismert már addig, és mennyire pontos, hogyan illeszkedik a többi ismerthez, és hogyan módosulhat, ha többet tanulunk róla.

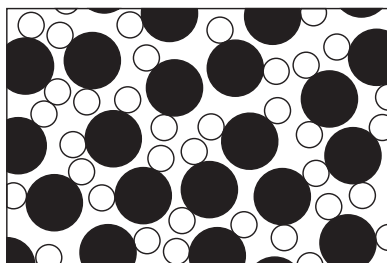
Folytassuk most a körvonalazását, vagy ha tetszik az általános áttekintését annak, mit értünk ma a tudomány fogalmán (elsősorban a fizikán, de kitérünk a hozzákapcsolódó más tudományágakra is). Ezáltal, ha később bizonyos kérdéseket vizsgálunk, megfelelő fogalmunk lesz azok háttéréről, érdekességük mibenlétéről, és arról, hogyan illeszkednek bele a tudomány nagy szerkezetébe. Tehát: *Mi is a mi mindent átfogó világképünk?*

1.2. Az anyag atomokból épül fel

Ha egy világtasztrófa következtében minden tudományos ismeretanyag megsemmisülne, és csak egyetlenegy mondat maradna örökségül a következő civilizációra, mi lenne az a mondat, amely a legtömörebb megfogalmazásban a legtöbb információt sűrítene magában? Úgy vélem, ennek a mondatnak az *atomok hipotézisét* (vagy ha úgy tetszik, az atomok létezésének *tényét*) kellene tartalmaznia: azt, hogy *minden dolog atomokból épül fel – állandóan mozgó kis részecskékből, amelyek vonzzák egymást, ha kis távolságra vannak, és taszítják egymást, ha egyiket a másikba préselik*. Mint látni fogjuk, ez a megállapítás hihetetlen mennyiségű információt tartalmaz a világról, csupán egy kis logika és fantázia kell hozzá.

Az atomi világkép akár egy csepp vízben is tükröződik. Képzeljünk magunk elé egy fél centiméter átmérőjű vízcseppet. Bármily közletről vizs-

gáljuk, semmi egyebet nem látunk, csak sima, folytonos vizet. Ha a rendelkezésünkre álló legjobb optikai mikroszkóppal kb. 2000-szeresére felnagyítjuk – ekkor a csepp átmérője 10 m, tehát kb. akkora, mint egy nagyobb terem –, még mindig viszonylag folytonos vizet látunk, melyben itt-ott különös, futball-labda alakú képződmények úszkálnak. Ezek a furcsa képződmények: paraméciumok. Itt meg is állhatnánk egy pillanatra, mert kíváncsivá tett bennünket a paramécium az ő tekergőző testecskéjével és sajátosan izgő-mozgó nyúlványaival. Ez azonban már a biológia tárgykörébe vágná. Erőt véve kíváncsiságunkon, hagyjuk most a paraméciumot, inkább figyeljük meg a víz anyagát még közelebről, újabb kétezerszeres nagyításban. Most már a vízcsepp mérete 20 km.

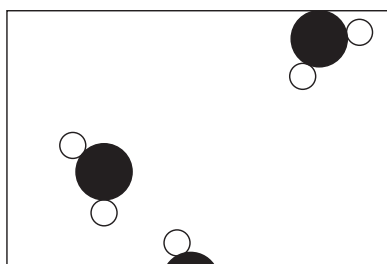


1.1. ábra. Vízcsepp egymilliárdszoros nagyításban

Valamiféle nyüzsgés észlelhető, de ez már nem kelti a folytonosság benyomását, inkább olyan, mintha rögbimérkőzést látnánk nagy távolságból. Hogy kifürkészessük, miféle nyüzsgés ez, alkalmazzunk még egy 250-szeres nagyítást; ekkor olyasféle látvány tűnik elő, mint amilyent az 1.1. ábra mutat: egymilliárdszorosára nagyított vízcsepp több szempontból is idealizált képe. Elsősorban azért idealizált, mert a részecskéket leegyszerűsített formában, határozott kontúrral rajzoltuk meg, ami pontatlan megközelítése a valóságnak. Másodsorban az egyszerűség kedvéért kétdimenziós elrendezésben, sematikusan vázoltuk fel őket, holott a valóságban természetesen három dimenzióban mozognak. Az ábrán kétféle jel – „paca”, illetve kör – van feltüntetve, az egyik (fekete) az oxigénatomot, a másik (fehér) a hidrogénatomot képviseli. Látható, hogy minden oxigénatomhoz két hidrogénatom tapad. (Az egy oxigén- és két hidrogénatomból álló csoportot vízmolekulának nevezzük.) E kép még azért is idealizált, mert a természetben a valódi részecskék állandóan sűrögnek-forognak, kergetőznek egymás körül, ide-oda ugrálnak, összetapadnak, majd szétválnak. Sztatikus kép helyett dinamikus képet kell elképzelnünk. Az sem tűnik ki a rajzból, hogy a részecskék „ragadnak egymáshoz” – itt az egyik részecske vonzza a másikat, ezt meg magához rántotta amaz, stb. Az egész együttl, hogy úgy mondjuk, „rugalmas szálak” tartják össze. Másrészt viszont ezek a részecskék nem préselődnek egymásba. Ha megpróbálnánk kettőt közülük összepréselni, taszítanák egymást.

Az atomok sugara $(1 \dots 2) \cdot 10^{-8}$ cm. A 10^{-8} cm távolság egyenlő egy *angströmmel*,¹ vagyis azt mondjuk, hogy az atomok sugara 1–2 Å. Az atomok nagyságrendjét más módon is emlékezetben tarthatjuk: ha egy almát a földgolyó méretére megnagyítanánk, atomjai kb. az eredeti alma nagyságára nőnének.

Most próbáljuk magunk elé képzelni ezt az óriás vízcseppet a benne ugrándozó, egymáshoz tapadó, fogócskát játszó részecskékkal. A víz megtartja a térfogatát, nem esik szét, mert a molekulák kölcsönösen vonzzák egymást. Ha a vízcsepp lejtős helyre kerül, ahol egy pontból a másik pontba átgördülhet, lefolyik, de azért nem tűnik el, mint ahogyan általában a tárgyak nem foszlanak szerte, mivel a molekuláik közti vonzás összetartja őket. Az imént említett ugráló mozgás nem más, mint a *hőmozgás*: ha növeljük a hőmérsékletet, egyúttal fokozzuk a mozgást. Ha melegítjük a vizet, az ugráló mozgás fokozódik, s ezáltal nő az atomok közötti térfogat is, ha pedig a melegítést sokáig folytatjuk, elkövetkezik egy időpont, amikor a kölcsönös vonzás már nem elegendő a molekulák összetartásához, s így azok egymástól különválva *szerterepülnek*. Ez nyilvánvaló, hiszen így módon állítunk elő vízből gőzt: a hőmérséklet növekedésével a részecskék fokozódó mozgásuk következtében egymástól szerterepülnek.



1.2. ábra. Vízpára felnagyított vázlata

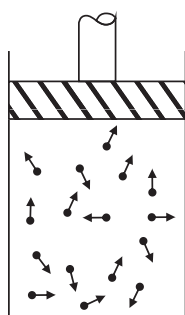
Az 1.2. ábra a gőz sematikus vázlata. A vázlat egy szempontból nem állja meg a helyét: az általunk választott nagyítás esetén közönséges légköri nyomás mellett biztosan háromnál kevesebb molekula jutna a rajzra. A legtöbb – az ábrával azonos méretű – négyzetecske a valóságban nem tartalmazhat semmit, s mi csak a szemléltetés kedvéért mutatunk be olyan négyzetecskét, ahová véletlenül jutott két és fél vagy három molekula (üres ábrát értelmetlen lett volna bemutatnunk!). A gőz esetében a molekulák jellegzetességeit tisztábban látjuk. Az egyszerűség kedvéért úgy rajzoltuk fel őket, hogy a két hidrogénatom 120° -os szöget zárjon be egymással. Ez a szög ténylegesen $105^\circ 3'$, az oxigén- és hidrogénatom középpontja közötti távolság pedig $0,957$ Å. Mindebből látható, hogy ezt a molekulát elég jól ismerjük.

Fordítsuk most figyelmünket a gőznek vagy általában a gázoknak néhány tulajdonságára. Az egymástól elkülönült molekulák állandó mozgásuk közben a terem falának ütköznek. Az egészet úgy képzelhetjük

Fordítsuk most figyelmünket a gőznek vagy általában a gázoknak néhány tulajdonságára. Az egymástól elkülönült molekulák állandó mozgásuk közben a terem falának ütköznek. Az egészet úgy képzelhetjük

¹1 angström = 0,1 nanométer (a szakmai lektor).

el, mintha a teremben, mondjuk, száz teniszlabda pattogna szüntelenül ide-oda. Amikor a falhoz csapódnak, löknek egyet rajta. (Természetesen arról gondoskodtunk, hogy a fal ne mozduljon el.) Ez azt jelenti, hogy a gáz a falra vibráló, szabálytalanul ismétlődő lökésekkel hat, amelyeknek – durva érzékelésünkkel – csak az *átlagát* észleljük (minthogy nem nagyítottuk fel magunkat is milliárdszorosan). Ahhoz, hogy a gázt valamilyen térfogatba bezárjuk, nyomást kell rá gyakorolnunk. Az 1.3. ábra gázok tárolására általánosan elterjedt edényt mutat (minden tankönyvben ilyen található): egy hengert a benne elhelyezett dugattyúval. Jelen esetben a vízmolekula alakja nem lényeges, az egyszerűség kedvéért teniszlabdának vagy pontnak ábrázoltuk. Ezek a pontocskák minden irányban állandóan mozognak. Sokan közülük felül nekiütköznek a dugattyúnak; az állandó lökdösődés következtében a dugattyú szép lassan kilökődhet. Ennek megakadályozására egy bizonyos erővel lefelé kell nyomnunk. Ezt az erőt *nyomásnak* nevezzük (ténylegesen a nyomás szorozva a felülettel adja az erőt). Világos, hogy ez az erő a felülettel arányos, mert ha a felületet megnöveljük, miközben az egy köbcéntiméterre eső molekulák számát állandónak tartjuk, ezzel megnöveljük a dugattyút érő ütközések számát, mégpedig olyan arányban, ahogy a felület megnagyobbodott.

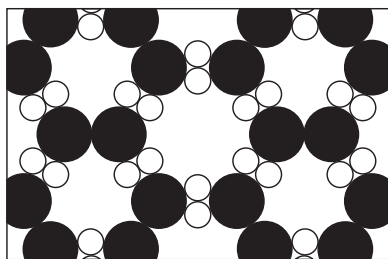


1.3. ábra

Tegyünk most kétszer annyi molekulát a tartályba, vagyis duplázzuk meg a sűrűséget, de legyen a molekulák sebessége az előbbihez képest változatlan, vagyis maradjon a hőmérséklet azonos. Ekkor az ütközések száma jó közelítéssel megkétszereződik, tehát azt mondhatjuk, hogy a nyomás arányos a sűrűséggel, minthogy minden ütközés ugyanolyan „energikus”, mint előbb. Figyelembe véve az atomok között fennálló erők tényleges természetét, arra következtethetünk, hogy a nyomás a kölcsönös vonzás miatt csekély mértékben csökkenni, míg az atomok rendelkezésére álló térfogat véges volta miatt csekély mértékben növekedni fog. Mindazonáltal – elég alacsony nyomás esetén, vagyis ha a gáz kevés atomot tartalmaz – kitűnő közelítés az, hogy *a nyomás a sűrűséggel arányos*.

Feleletet kaphatunk egy másik kérdésre is: Mi lesz a nyomással, ha a hőmérsékletet a gáz sűrűségének megváltoztatása nélkül megnöveljük, vagyis megnöveljük az atomok sebességét? Az atomok, mivel gyorsabban mozognak, erőteljesebben s ráadásul gyakrabban ütköznek a dugattyúhoz, tehát a nyomás megnövekszik. Látható, milyen egyszerűen következik mindez az atomi szemléletből.

Vegyünk egy másik esetet. Tétélezzük fel, hogy a dugattyú befelé mozog, s így az atomokat lassacskán kisebb térfogatra szorítja össze. Mi történik, amikor egy atom a mozgó dugattyúba ütközik? Nyilvánvalóan sebességet nyer az ütközés során. Gondoljunk csak arra, hogy ha például egy pingponglabda a vele szembe haladó ütőbe ütközik, nagyobb sebességgel pattan le az ütőről, mint amivel nekiütközött. (Speciális eset: ha egy nyugvó atomot ér a dugattyú, az atom mozgásba jön.) Az atomokat a dugattyúval való találkozás „forróbbá” teszi, s ily módon az edényben található valamennyi atom sebessége megnövekszik. Ez azt jelenti, hogy *ha a gázt lassan összenyomjuk, hőmérséklete megnő*. Vagyis lassú összenyomás közben a gáz hőmérséklete *megnő*, lassú *kitágulás* közben pedig *csökken*.



1.4. ábra. Jégkristály

Térjünk vissza vízcseppünkhöz, vizsgáljuk most más szempöngböl. Csökkenve hőmérsékletét, tétélezzük fel, hogy hűlés közben az atomok alkotta vízmolekulák ugrándoazása is alább-hagy. Tudjuk, hogy az atomok között ható vonzóerő miatt a molekulák egy idő múlva kevésbé élénken mozognak. Az 1.4. ábrán látható, mi történik majd egészen alacsony hőmérsékleten: a molekulák egy új alakzattá kapcsolódnak – s ez a *jég*. A jégnek a fenti vázlatos képe nem helytálló abból a szempöngből, hogy kétdimenziós, de kvalitatíve helyes. A jelenség érdekessége az, hogy ez esetben az anyag *minden atomjának meghatározott helye van*, s könnyen ellenőrizhető, hogy ha valamilyen módon a csepp egyik végén az atomokra valamilyen elrendezést kényszerítünk, minden atomot bizonyos helyre ültetve, a közöttük fennálló merev kapcsolat következtében a csepp másik végén kilométernyi távolságban is (felnagyított méreteknben gondolkodunk!) meghatározott elrendezés alakul ki. Az egyik végén befogott tő alakú jégkristály másik vége ellenáll az oldalirányú kitérítő erőnek, ellentétben a vízzel, ahol az atomok nagymérvő ugrándoazása folytán a szerkezet lazább, s így az atomok a legkülönbözöbb irányokban mozoghatnak. A szilárd anyagok és a folyadékok közötti különbség az, hogy a szilárd anyagokban az atomok bizonyos alakzatba, úgynevezett *kristályos alakzatba* rendeződnek, és hosszú távon nem véletlenszerűen helyezkednek el; a kristály egyik végén levő atomok helyzetét meghatározzák a tőlük millió atomnyi távolságra, a kristály másik végén elhelyezkedő atomok. Az

Térjünk vissza vízcseppünkhöz, vizsgáljuk most más szempöngböl. Csökkenve hőmérsékletét, tétélezzük fel, hogy hűlés közben az atomok alkotta vízmolekulák ugrándoazása is alább-hagy. Tudjuk, hogy az atomok között ható vonzóerő miatt a molekulák egy idő múlva kevésbé élénken mozognak. Az 1.4. ábrán látható, mi történik majd egészen alacsony hő-

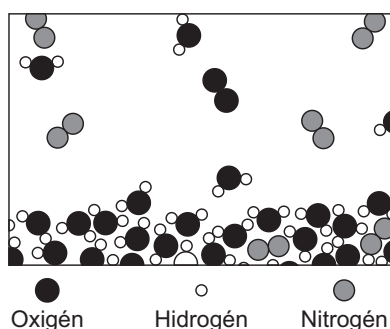
1.4. ábrán a jégkristály egy elképzelt elrendeződése látható, s jóllehet az ábra számos vonatkozásban helytálló, mégsem ez a valóságos elrendeződés. Helytálló például az, hogy az elrendeződés bizonyos szimmetriát mutat, azaz hexagonális. Látható, hogy ha ezt a képet egy tengely körül 60° -kal elforgatjuk, önmagába tér vissza. A jég tehát bizonyos fajta *szimmetriát* rejt magában, ami egyben a hópehely hatszögletű alakját magyarázza. Egy másik jelenség is megérthető az 1.4. ábra nyomán, az ugyanis hogy az olvadással miért lesz kisebb a jég térfogata. Az itt bemutatott sajátos kristályalakzatban sok „üreg” található, akár csak a valódi jég kristályszerkezetében. Ha a szerkezet bomladozni kezd, ezeket az üregeket elfoglalják a molekulák. A legtöbb anyag – a víz és a betűfém kivételével – olvadásakor *kiterjed*; a szilárd kristályban szorosan elhelyezkedő atomok olvadás után nagyobb teret igényelnek mozgásukhoz. Ezzel szemben egy üreges szerkezet összeesik olvadáskor, mint a jég.

Bár a jégnek „merev” kristályos szerkezete van, hőmérséklete mégis megváltozhat – a jégben szintén van hőmozgás. Mi a hőmozgás formája a jég esetében? Az atomok nincsenek nyugalomban. Ugrálnak és rezegnek. Jóllehet a kristályban meghatározott rend van – minden atomja „helyben” vibrál. Amint növeljük a hőmérsékletet, rezgésük amplitúdója hasonló mértékben nő, míg végül is kiszakadnak a helyükről. Ezt nevezzük *olvadásnak*. Amint a hőmérsékletet csökkentjük, a vibrálás egyre jobban csökken, míg végül az abszolút nulla hőmérséklet körül el nem ér egy minimális – de *nem nulla* – értéket. Ez a minimális mozgás egyetlen anyagnak, a héliumnak a kivételével nem elegendő az olvadáshoz. A héliumban pusztán az atomok mozgása csökken le annyira, amennyire csak tud, de még az abszolút nulla hőmérsékleten is marad annyi mozgás, amennyi elegendő a fagyás megakadályozásához. A hélium még az abszolút nulla fokon sem fagy meg, hacsak nem alkalmazunk olyan nagy nyomást, amely az atomokat egymáshoz tudja préselni. A nyomás növelésével héliumot *szilárd* alakban is előállíthatunk.

1.3. Atomi folyamatok

Az előbbieken szilárd anyagokat, folyadékokat és gázokat írtunk le az atomi szemlélet segítségével. Az atomi szemlélet azonban *folyamatok* leírására is alkalmas, most tehát néhány folyamatot az atomok nézőpontjából mutatunk be. Az első ilyen folyamat, amelyet érdemes megvizsgálunk, a víz felszínével kapcsolatos. Mi megy végbe a víz felszínén? A képet bonyolultabbá, de egyben valószerűbbé is tesszük, ha elképzeljük, hogy a vizsgált vízfelszín levegővel érintkezik (1.5. ábra). Itt is, mint előbb,

jelen vannak a víztestet alkotó vízmolekulák, de most a víz felszínét is látjuk. Utóbbit szemlélve sok mindent észrevehetünk: mindenekelőtt vízmolekulákat gőz formájában. Ez a *vízpára*, amely mindig megtalálható a víz felett. (A víz és a vízpára között egyensúly áll fenn, erről később még szó lesz.) A párán kívül másfajta molekulákat is látunk, itt például két oxigénatom tapadt össze, *oxigénmolekulát* képezve, amott meg két nitrogénatom, szintén összetapadva, nitrogénmolekulát képez. A levegő csaknem teljes egészében nitrogénből, oxigénből és egy kevés vízpárából áll, de kisebb mennyiségben szén-dioxidot, argont és egyéb anyagot is tartalmaz. Tehát a víz felszíne felett található levegő: gáz, amely némi vízpárát tartalmaz. Lássuk, mi is történik ezen a képen? A víz molekulái állandóan „ugrándoznak”, mozgásban vannak. Előfordul időnként, hogy egyik-másik a felszín közelében egy kicsit nagyobb lökést kap és kilöködik.



1.5. ábra. Levegőbe párolgó vízfelület

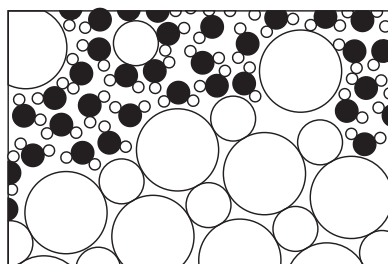
Nehéz észrevenni az ábrán, hogy valójában mi játszódik le, mivel képzünk *álló*. De azért el tudjuk képzelni, hogy az egyik molekula, eltalálva a többiektől, éppen kifelé tart, majd talán az a másik is kap egy lökést, az is tovarepül. Vagyis molekuláról molekulára eltűnik a víz: elpárolog. De ha *lezárjuk* felülről az edényt, egy idő múlva nagyszámú vízmolekulát fogunk találni a levegőmolekulák között. Időről időre

egy-egy gőzmolekula a vízbe csapódik vissza, s ott fogva marad. Ez a látzólag érdektelen, mozdulatlan, eseménytelen valami – egy pohár fedett víz, amely talán már húsz éve itt áll a helyén – valójában mozgalmas, érdekes, soha meg nem szűnő jelenségeket tartalmaz. Szemünkkel, ezzel a durva optikai eszközzel ugyan semmi változást nem észlelünk, de milliárdszoros nagyításban már észrevennénk, hogy a molekulák saját kis világa szüntelen változások színhelye: molekulák távoznak a vízfelszínből, és molekulák érkeznek vissza oda.

Miért nem látunk *mi* változást? Mert amennyi molekula eltávozik, ugyanannyi érkezik vissza! Hosszú időtávlatban „semmi nem történik”. De ha az edény fedőjét levéve elfújjuk a párával telt levegőt, és szárazat engedünk a helyébe, a távozó molekulák száma nem változik (ez csak a vízmolekulák mozgásától függ), de a visszatérő molekulák száma nagymértékben csökken, minthogy most sokkal kevesebb vízmolekula található

a víz felszíne felett. Tehát több molekula megy el, mint amennyi érkezik, és így a víz elpárolog. Ezért kapcsoljuk be a ventilátort, ha vizet akarunk elpárologtatni!

Következő kérdésünk: Mely molekulák távoznak el? Mikor egy molekula kirepül, véletlenül az átlagosnál egy kicsit több energia halmozódik fel benne, éppen annyi, amennyi ahhoz szükséges, hogy a szomszédos molekulák vonzását legyőzze. Tehát ha a kirepülők az átlagosnál több energiával rendelkeznek, akkor a visszamaradottak átlagos energiája *kisebb* lesz. Ezért a folyadék párolgás közben fokozatosan *lehűl*. Természetes viszont, hogy amikor a gőzmolekula a levegőből a vízbe érkezik, a felszínhez közeledve alulról hirtelen nagyfokú vonzás támad feléje. Ez felgyorsítja a beérkező molekulát, aminek eredményeként hő fejlődik. Tehát a távozó molekulák hőt visznek magukkal, a visszatérők hőt fejlesztenek. Nyilvánvaló, ha nincs valódi párolgás, a két jelenség eredője zérus – a víz hőmérséklete nem változik. Amikor ráfújunk a víz felszínére, és ezáltal biztosítjuk a távozó molekulák túlsúlyát, hűtjük a vizet. Fűjd a levest, ha hűteni akarsz!



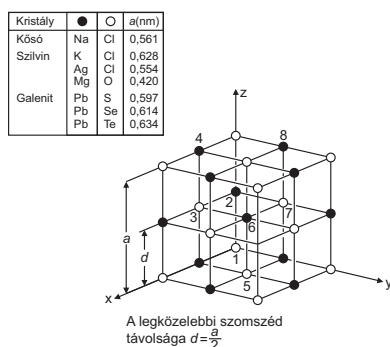
1.6. ábra. Só oldódása vízben

lítjuk az edény feletti levegőt, a vízből sokkal gyorsabban távoznak el a levegőmolekulák, mint ahogy oda behatolnak, s ekközben buborékok keletkeznek. Bizonyára sokan tudják, hogy ez a jelenség a bűvárok ellensége.

Térjünk át egy másik folyamatra. Az 1.6. ábrán atomi szempontból mutatjuk be egy szilárd test feloldódását vízben. Mi történik, ha egy sókristályt vízbe helyezünk? A só szilárd anyag, kristály, vagyis a „sóatomok” egy szervezett elrendeződése. Az 1.7. ábra a közönséges só, vagyis a nátriumklorid háromdimenziós szerkezetének a vázlata. Pontosabban szólva: a kristály nem atomokból, hanem úgynevezett *ionokból* épül fel.

Ne feledjük azonban, hogy ezek a folyamatok a valóságban sokkal bonyolultabbak, mint amilyenek ábrázoltuk őket. Nemcsak a vízmolekula jut ki a levegőbe, hanem olykor az oxigén- vagy nitrogénmolekulák egyike-másika is behatol a vízbe, „betéved” a vízmolekulák közé, utat vágva magának a vízben. Vagyis a levegő feloldódik a vízben; az oxigén- és nitrogénmolekulák utat törnek maguknak, és a vízben levegő gyűlik fel. Ha most hirtelen eltávo-

Az ion a semleges atomhoz képest néhány elektronnyi hiánnyal vagy felesleggel rendelkezik. A sókristályban kloridion (klóratom egy többletelektronnal) és nátriumion (nátriumatom egy elektron hiányával) található. A sóban az ionok elektromos vonzás hatására egymáshoz vannak tapadva, de a kristályt vízbe helyezve azt tapasztaljuk, hogy a negatív oxigénnek és a pozitív hidrogénnek az ionokra gyakorolt vonzása következtében néhány ion elszabadul. Az 1.6. ábrán látható egy kloridion, amint éppen leszakad, valamint több olyan atom, amely már ion formájában lebeg a vízben. Nézzük meg figyelmesen a rajzot. Észre kell vennünk például, hogy a vízmolekula hidrogénoldala nagyobb valószínűséggel a kloridionhoz van közel, míg az oxigén felőli vége közelében nagyobb gyakorisággal található nátriumionok, minthogy a nátrium pozitív, a víz oxigén felőli vége pedig negatív, és így ezek elektromosan vonzzák egymást. Meg tudnánk-e állapítani a képről, vajon a só éppen *oldódik* vagy *kikristályosodik*? Természetesen *nem*, mert míg néhány atom a kristálytól eltávozik, néhány másik éppen visszacsatlakozik hozzá. A folyamat *dinamikus*, ugyanúgy, mint a párolgás esetében, és attól függ, hogy több vagy kevesebb sót tartalmaz-e a víz annál a mennyiségnél, amennyi az egyensúlyhoz szükséges. Egyensúlyon azt az állapotot értjük, amikor a távozó és visszatérő atomok száma megegyezik. Ha alig van só a vízben, több atom távozik, mint amennyi visszaérkezik, ezért a só feloldódik. Viszont ha túl sok „sóatom” van a vízben, azaz több érkezik, mint amennyi távozik, a só kikristályosodik.



1.7. ábra

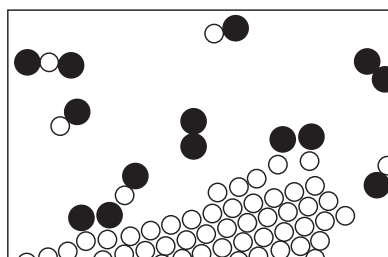
Közbevetőleg megjegyezzük, hogy bármely anyagra nézve, a molekula fogalma nem általános érvényű, hanem az anyagoknak csak egy bizonyos osztályára alkalmazható. A víz esetében világos, hogy a három atom valóban össze van tapadva. De már nem ennyire világos a szilárd állapotú nátrium-klorid esete, itt csupán a nátrium- és kloridionoknak egy köbös elrendeződéséről beszélhetünk. Ugyanis természetes úton nem tudjuk „sómolekulákba” csoportosítani őket.

Térjünk vissza az oldódás és kikristályosodás kérdéséhez. A hőmérséklet növelésével mind a kristályból eltávozó, mind pedig az oda visszatérő atomok száma növekszik. Általában nehéz előre megjósolni, hogy a kettő közül melyik folyamat kerekedik a másik fölé, s hogy több vagy kevesebb

só oldódik-e majd fel. A legtöbb anyag könnyebben, de néhány anyag nehezebben oldódik, ha a hőmérsékletet növeljük.

1.4. Kémiai reakciók

Az eddig leírt folyamatokban az atomok és ionok még nem cseréltek „partnert”, de természetesen előadódnak olyan körülmények is, amikor az atomok kombinációja megváltozik és egy új molekula jön létre. Ezt mutatja be az 1.8. ábra. Azt a folyamatot, amelyben az atomi partnerek átrendeződnek, *kémiai reakciónak* nevezzük. Az eddig leírt folyamatokat fizikai folyamatoknak hívjuk, ámbár a kettő között nincsen éles különbség. (A Természet nem törődik vele, milyen neveket adunk, csak csinálja a magáét.) Ábránkon a szénnek oxigénben való elégését szeretnénk bemutatni. Az oxigénben két oxigénatom tapad egymáshoz igen szorosan. (Hogy miért nem *három* vagy akár *négy*? Ez éppen az ilyen jellegű atomi folyamatok egy igen jellemző tulajdonsága. Az atomok nagyon sajtóságosak: bizonyos meghatározott partnereket, meghatározott irányokat előnyben részesítenek. A fizika feladata, hogy megvizsgálja, miért vágyódik az atom éppen arra, amire vágyódik. Szó, ami szó, két oxigénatom képez – boldogan és kölcsönösen kielégítve egymást – egy molekulát.)



1.8. ábra. Szén égése oxigénben

Az ábrán feltételeztük, hogy a szénatomok szilárd kristályban (ami lehet grafit vagy gyémánt²) foglalnak helyet. Ha most például egy oxigénmolekula közel férközhet a szénhez, mindegyik atom felkaphat egy-egy szénatomot, s aztán továbbállhat egy új kombinációban – „szén-oxigén” alakjában –, amely a szén-monoxidnak nevezett gáz egy mole-

kulája. A gáznak a CO kémiai elnevezést adták. Hogy miért, nagyon egyszerű: a „CO” betűk gyakorlatilag a molekula képét tükrözik. Ámde a szén sokkalta jobban vonzza az oxigént, mint az oxigén az oxigént, vagy a szénatom a másik szénatomot. Épp ezért, bár a folyamatba belépő oxigénnek esetleg kicsi az energiája, az oxigén és a szén olyan nagy hévvel, olyan vadul egyesül, hogy környezetükben minden feldúsul energiában. Vagyis nagy mennyiségű mozgási energia (kinetikus energia) szabadul fel. És ez nem más, mint az *égés*: az oxigén és szén kombinálódásából *hőt* nyertünk. A hőmennyiség keletkezése általában a forró gáz molekuláinak mozgása-

²A gyémánt szintén el tud égni a levegőben.

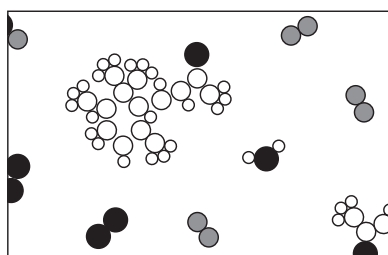
ként nyilvánul meg, de bizonyos körülmények között oly hatalmas lehet, hogy *fényt* hoz létre. Így keletkezik a *láng*.

Ráadásul a szénmonoxid nem teljesen telített. Lehetősége van még egy oxigén megkötésére, s ezáltal egy bonyolultabb reakció is végbemehet, amikor az oxigén a szénnel kapcsolatba lépve ugyanakkor egy másik szénmonoxid-molekulával összeütközik. Az egyik oxigénatom a CO-hoz köti magát, amellyel végül is egy molekulát alkot (amelyet CO₂-vel jelölünk, és széndioxidnak nevezünk). Ha szenet nagyon kevés oxigénben és nagyon gyors reakció során égetünk el (pl. autó motorjában, ahol a robbanás olyan gyors, hogy nincsen idő széndioxid-képződésre), jelentős mennyiségű szénmonoxid keletkezik. Számos effajta átrendeződésben nagy mennyiségű energia szabadul fel, és a reakciótól függően robbanás, láng stb. észlelhető. A vegyészek az atomok ilyen átrendeződéseit tanulmányozva megállapították, hogy minden anyag: az *atomok* egy bizonyos típusú *elrendeződése*.

Hogy a gondolatot illusztráljuk, tekintsünk egy másik példát. Ha virágzó ibolyák közelében járunk, könnyen felismerjük őket az illatukról. Ez azt jelenti, hogy bizonyos fajtájú *molekula*, illetve atomokból álló rendszer az orrunkba hatolt. Mindenekelőtt, *hogyan* került oda? Meglehetősen egyszerű módon. Ha az illat nem más, mint valamilyen típusú, a levegőben ide-oda cikázó molekula, amelyet minden irányból lökések érnek, *véletlenül* bekerülhet az orrunkba. Természetesen nem volt szándékában odajutni. Az illat csupán a molekulák nyüzsgő sokaságának egy magatehetetlen része, és céltalan vándorlása közben az anyagnak ez a piciny töredéke egyszerre csak az orrunkban találja magát.

A kémikusok ezeket a speciális molekulákat is, mint például az ibolya illata, analizálni tudják, meg tudják mondani nekünk, milyen az atomok *valóságos térbeli elhelyezkedése*. Tudjuk, hogy a széndioxid-molekula egyenes és szimmetrikus: O–C–O. (Ez könnyen, fizikai módszerekkel is megállapítható.) A kémiában előforduló legbonyolultabb atomi elrendeződés is felderíthető, igaz, hogy csak hosszas detektív munkával. Az 1.9. ábrán a levegő egy részlete látható az ibolya környezetében. Újra itt találjuk az oxigént, a nitrogént és a vízpárát. (Miért van itt vízpára? Mert az ibolya *nedves*. Minden növény párát lehel ki magából.) De ezúttal látunk még egy szén-, hidrogén- és oxigénatomokból kialakult „csodabogarat” is, amely különleges alakzatával ragadja meg a figyelmünket. Ez a széndioxidnál sokkal bonyolultabb elrendeződés valóban hallatlanul bonyolult. Sajnos nem tudjuk mindazt bemutatni, amit kémiailag tudunk róla, mivel az atomok elrendeződését valójában három dimenzióban ismerjük, az

ábránk pedig csak kétdimenziós. A hat szénatom által alkotott gyűrű nem lapos, hanem harmonikaalakban összegyűrt. Ismert az összes szög és távolság. Látható tehát, egy kémiai *képlet* az ilyenfajta molekulának csupán vázlata. Amikor a kémikus effajta dolgokat ír fel a táblára, megpróbál két dimenzióban „rajzolni”. Például látunk egy hat szénatomból álló „gyűrűt”, amelyen egy szénlánc függ. Utóbbi utolsó előtti tagján egy oxigén helyezkedik el. Aztán látunk három hidrogént, amely a szénhez kapcsolódik, majd megint két szénatomot és három hidrogént, és így tovább.



1.9. ábra. Az ibolya illata

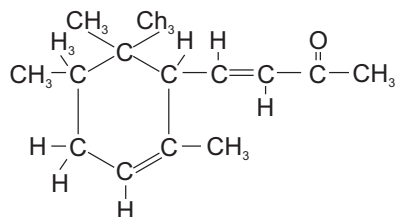
állapíthassa az atomok elhelyezkedését ebben a rendkívül bonyolult elrendeződésben, a kémikus azt vizsgálja, mi történik, ha két különböző anyagot összekever. A fizikus sohasem tudta elhinni, hogy a kémikus tudta, miről beszél, amikor leírta az atomok elrendeződését. Körülbelül húsz éve vált lehetővé, hogy néhány fajta molekulát (nem olyan bonyolultakat, mint az előbbiek, hanem néhány olyat, amelyek az előbbinek egy részét alkotják) fizikai módszerekkel vizsgáljunk, és meghatározzuk a molekula minden atomjának helyét – de nem a színeződés alapján, hanem *megmérjük, hol vannak ténylegesen*. És lám! A kémikusoknak majdnem minden esetben igazuk volt.

Kiderült, hogy az ibolya illatában valóban három, egymástól csak a hidrogénatomok elrendeződésében különböző molekula foglal helyet.

A kémia egyik problémája, hogy olyan nevet adjon az anyagoknak, amelyből következtethetünk a molekulaszervezetükre. Találjunk ki nevet például az 1.10. ábrán látható molekula alakjára! De a névnek nem csak az alakzatot kell leírnia, meg kell mondja azt is, hogy itt egy oxigén-, ott egy hidrogénatom, tehát pontosan hol és milyen atom foglal helyet. Láthatjuk, hogy a kémiai nevek szükségképpen bonyolultak, mert másképp nem lehetnének tökéletesek. Az 1.10. ábra molekulájának neve pontosabb formában a molekula szerkezetéről is számot ad: 4-(2,2,3,6-tetrametil-5-

Hogyan mutatja ki a kémikus az elrendeződést? Különböző anyagokkal teli üvegcsék tartalmát önti egymásba, s ha a keverék vörös lesz, ez arról árulkodik, hogy itt egy szén és egy hidrogén van összekapcsolódva, ha viszont kék lesz, ez csak annyit mond, hogy másképp áll a helyzet. A szerves kémia nagy képzelőerőt kívánó detektív munka! Hogy meg-

ciklohexén-1-il)-3-butén-2-on. Ebből is fel tudjuk mérni, hogy a kémikusok milyen nehézséggel állnak szemben, s megérthetjük, mi az oka az effajta hosszú neveknek. Nem ködösíteni akartak az elnevezésekkel, hanem rendkívül nehéz feladatot oldottak meg: megpróbálták a molekulákat szavakkal leírni!



1.10. ábra. Az ibolya illatának szerkezeti képlete

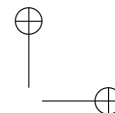
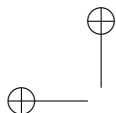
Honnan *tudjuk*, hogy vannak atomok? A már említett egyik logikai módszer segítségével: *feltételezzük*, hogy léteznek, és sorra olyan kísérleti eredmények adódnak, mint amelyeket azzal a feltételezéssel jósoltunk meg, hogy minden atomokból épül fel. Van azonban egy valamivel közvetlenebb bizonyítéka is az atomok létezésének, amelyre jó példa a

következő: Az atomok olyan parányiak, hogy nem láthatók mikroszkóp segítségével, de még *elektronmikroszkóppal* sem.³ (Fénymikroszkóppal csak sokszorta nagyobb tárgyakat lehet látni.) Mármost ha az atomok állandóan mozgásban vannak, mondjuk, például a vízben, és a vízbe valamilyen labdát helyezünk, a labda ide-oda fog ugrálni, mint a „pushball” játékban, ahol egy óriási labdát rugdosnak a játékosok. A játékosok különböző irányban rugdalják a labdát, ami teljesen szabálytalan mozgást végez a játéktéren. Hasonlóan mozog a „nagy labda” a vízben, a különböző oldalait különböző mértékben érő, szüntelen lökések következtében. Tehát amikor mikroszkóp segítségével egészen parányi részecskéket (kolloidokat) vizsgálunk a vízben, az állandó, ide-oda ugrádozó mozgás, amit észlelünk, az atomok lökdösődésének az eredménye. Ezt a jelenséget *Brown-mozgásnak* nevezik.

A kristályok szerkezetében további bizonyítékokat is találunk az atomok létezésére. Számos esetben a röntgensugarak segítségével meghatározott szerkezet megegyezik a kristálynak a természetben megjelenő térbeli „formájával”. A kristálylapok által bezárt szögek szögmásodpercnyi pontossággal megegyeznek azokkal a szögekkel, amelyeket abból a feltételezésből kiindulva számítottak ki, hogy a kristály atomok számtalan „rétegeből” tevődik össze.

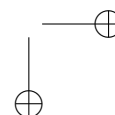
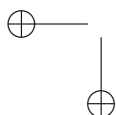
Minden atomokból épül fel. Ez kulcsfeltevés. Az egész biológiának például a legfontosabb feltevése az, hogy az *élőlények minden életjelenségét atomok viszik végbe*. Más szóval, *az élő anyagnak nincs olyan tevékenysége, amelyet ne lehetne megérteni annak a szemléletnek az alapján, hogy*

³Az úgynevezett atomerő-mikroszkóppal egy kristályrács ionjait egymástól elkülönítve mutató kép készíthető egy 1983-as, azóta Nobel-díjjal kitüntetett, új rendszerű mikroszkóp révén (*a szakmai lektor*).



minden atomokból épül fel, és ezek a fizikai törvényeknek engedelmeskednek. Mindez nem volt kezdetől fogva ismert; sok-sok kísérletezés és elmélkedés előzte meg ezt a feltevést, amely ma már általánosan elfogadott, nagyon eredményes elmélet, és a biológia egész területén új gondolatokra vezet.

Ha egy darab vasnak vagy sónak, amely egymással szomszédos atomokból áll, ennyire érdekes tulajdonságai lehetnek; ha a tengervíz – ami nem más, mint ugyanannak a kis cseppnek az ismétlődése megannyi kilométeren át – végig a Föld felszínén hullámokat és habokat formálhat, a part kövének ütközve robajt kelt, s furcsábbnál furcsább alakzatokat vesz fel; ha mindaz az élet, amely egy folyamba szorult, atomoknak egy hatalmas halmaza csupán, *milyen hatalmas akkor a további lehetőségek száma?* Képzeljük el, még mennyivel csodálatosabban viselkedne az anyag, ha atomjai nemcsak meghatározott alakzatokban, mindig ugyanazt a sorrendet ismételve, vagy az ibolya illatához hasonló, kis összetett halmazokat formálva helyezkednének el, hanem úgy építenénk fel, hogy mindenütt és *mindig más lenne*, a legkülönbözőbb atomok legkülönbözőbb szerkezeti elrendeződése adódna, folytonosan változva és önmagát sohasem ismételve! Lehetséges, hogy az a „valami”, ami Önök előtt fel-le járkal és magyaráz, atomoknak egy ilyesfajta összetett halmaza, amely olyannyira bonyolult, hogy már el sem lehet képzelni, mire képes? Mikor azt mondjuk, hogy mi is atomokból állunk, nem azt értjük alatta, hogy *pusztán* egy halom atom vagyunk, mivel az atomoknak egy olyan elrendezése, amelyben nincsen ismétlődés, nagyon is rendelkezhet olyan tulajdonságokkal, amelyeket Önök a tükörben láthatnak.



2. fejezet

A fizika alapjai

2.1. Bevezetés

E fejezetben a fizika legfontosabb fogalmait tekintjük át, mégpedig úgy, hogy a jelenségek természetét mai szemszögből igyekszünk megítélni. Nem tárgyaljuk azonban a történeti folyamatot, amelynek során sikerült megtudni, hogy e fogalmak helyesek, később úgylis részletesen beszélünk róluk.

A tudomány által vizsgált jelenségek számtalan formában és a legkülönbözőbb tulajdonságokban nyilvánulnak meg. Például a tengerpartról nem csupán vizet látunk, hullámokat, amint megtörnek a parton, tajtékos habokat, ahol összezsapnak a hullámok, hangokat hallunk, érezzük a levegőt, a szelet, felhőt, a Nap melegét, kék ég és fény vesz körül bennünket; a tengerparton homokot látunk, és a legváltozatosabb korú, színű, szerkezetű és keménységű sziklák a tűnnek szemünkbe. Állatok és tengeri növények, éhség és betegség, de maga a megfigyelő is, az ő életérzése és gondolatvilága is a képhez tartozik. Mindegy, hogy hol, a természet minden apró részlete ilyen gazdag tárgyakban és bonyolult azok egymásra hatásában. Kíváncsiságtól sarkallva kérdéseket teszünk fel, megpróbálunk összefüggést keresni a jelenségek között, összevetjük a tapasztalatokat, és a sokarcú természetet olyan, viszonylag kis számú elemi tényezők eredőjeként próbáljuk felfogni, amelyek végtelen sok változatban és sokféleképpen hatnak.

Ilyen kérdések például: Más-e a homok, mint a szikla? Lehetséges, hogy a homok parányi kövek sokasága? A Hold talán egyetlen nagy kődarab? Ha megértettük a kőzet természetét, megérthetjük-e egyúttal a homok vagy a Hold mibenlétét? A szél a levegőnek ugyanolyan mozgása lenne, mint amilyen a tengervíz partnak csapódása? Milyen közös vonásai vannak a különböző mozgásoknak? Mi a közös a különböző fajta hangokban? Hány szín létezik? És így tovább. Lépésről lépésre haladva próbálunk mindent elemezni, csoportosítva az első pillantásra különbözőknek látszó tényezőket, abban a reményben, hogy ezzel *csökken az eltérő jelenségek száma*, s így jobban megérthetjük majd azokat.

Néhány száz éve, hogy szabatosan megfogalmazták a módszert, amelynek segítségével ilyen kérdésekre – legalább részben – feleletet lehet kapni. *Megfigyelés, megfontolás és kísérlet* – ezekből épül fel a tudományos módszer. A következőkben csak azoknak a fontosabb elveknek, gyűjtőnéven a

fizika alapjainak a puszta leírására szorítkozunk, amelyek már a tudományos módszerek alkalmazásának az eredményei.

Mit jelent az, hogy „megértünk” valamit? Képzeld el, hogy a „világ”, az állandóan mozgásban lévő tárgyak bonyolult elrendeződése, egyetlen hatalmas sakkjátszma, az istenek játsszák, s mi csak megfigyelői vagyunk. Nem tudjuk, csupán *megfigyelhetjük* a játék szabályait. Természetesen, ha már jó ideje figyelünk, esetleg felfedezünk néhány szabályt. E világméretű játszma szabályai: a *fizika alapjai*. Viszont ha az összes szabályt ismer-nénk is, akkor sem lennénk képesek megérteni, miért pont a megfigyelt sakkhúzásra került sor a játszmában – ez már túlságosan bonyolult, és értelmünk véges. A sakkozók jól tudják, hogy a szabályok megtanulása nem nehéz feladat, mégis gyakran nehéz a legjobb lépést kiválasztani, vagy megérteni, hogy egy játékos az adott helyzetben miért éppen azt húzza, amit húz. Mindez a természet nagy sakkjátszmájára sokkalta inkább érvényes. Jelenleg még az összes szabályt sem ismerjük, bár nincsen kizárva, hogy valamikor mindezeknek a birtokába jutunk. (Egyelőre még sok a számunkra érthetetlen dolog, mint például a kezdő sakkozó számára a sáncolás.) Az ismert szabályok segítségével sem tudunk mindent megmagyarázni, mert majdnem minden eset hallatlanul bonyolult, nem tudjuk követni a „játszmát” a szabályok alkalmazásával, s még kevésbé tudjuk megjósolni, mi fog bekövetkezni. Ezért a játék szabályainak ele-mi kérdéseire kell korlátozni magunkat. Ha ismernénk a szabályokat, úgy tekinthetnénk, hogy „megértettük” a világot.

Hogyan tudjuk megállapítani, hogy azok a szabályok, amelyekre „rá-jöttünk”, valóban helyesek, ha nem tudjuk a játékot megfelelően analizálni? Ennek lényegében három módja van. Az első: lehetnek olyan esetek, amikor a természet nagyon egyszerű formában nyilvánul meg, vagy mi alakítjuk egyszerűvé, olyanná, hogy néhány részletében pontosan meg tudjuk jósolni, mi következik be, s ily módon ellenőrizhetjük, mennyiben érvénye-sek szabályaink. (A tábla egyik sarkában csak néhány sakkfigura fér el, ezek mozgását pontosan ki tudjuk számítani.)

A második mód: a szabályokat közvetve, a belőlük levont, általáno-sabb érvényű szabályokon keresztül ellenőrizzük. Például a futóra vonat-kozó sakkszabály az, hogy a futó csak átlós irányban mozoghat a táblán. Ebből következik, hogy tetszőleges lépés megtétele után is az egyik fu-tó mindig világos mezőn lesz. Tehát anélkül, hogy a részleteket követni tudnánk, a futóra vonatkozó szabályt állandóan ellenőrizhetjük. Termé-szetesen mégis megtörténhet, hogy a futót egyszerre csak *sötét* mezőn látjuk viszont (a futót időközben leütötték, majd egy gyalog, áthaladva

az alapvonalon, sötét mezőre állított futóvá alakult). Valahogy így van ez a fizikában is. A részletek ismerete nélkül megalkotott szabály általánosságban sokáig beválik, majd idővel *új szabályt* fedezünk fel. A fizika alapjainak a szempontjából a legérdekesebb jelenségek az *új* területeken adódnak, tehát ott, ahol az ismert szabályok *nem érvényesíthetők*. Így fedezünk fel új szabályokat.

Szabályaink ellenőrzésének harmadik módja kevésbé igazolható, de talán mindhárom közül a leghatásosabb. Ez a *durva közelítések* módszere. Például nem tudjuk megmondani, hogy Aljechin miért *éppen azzal a figurával* lépett, de talán *nagy vonalakban* átlátjuk, hogy figuráit a király védelmére sorakoztatta fel, s megértjük, hogy az adott bonyolult állásban ez észszerű dolog lehetett.

Ugyanígy, gyakran többé-kevésbé megértjük a természetet is anélkül, hogy az *összes apró részletének* a mozgását ismernénk.

Kezdetben a természet jelenségeit durván osztályozták: például hőjelenségek, elektromosság, mechanika, mágnesség, az anyagok tulajdonságai, kémiai folyamatok, fényjelenségek és optika, röntgensugarak, magfizika, gravitáció, mezonok fizikája stb. A cél azonban az, hogy a *természet egészét* mint a jelenségek *egy bonyolult csoportjának* különböző megnyilvánulásait lássuk magunk előtt. Ma az elméleti alap kutatásnak ez a problémája: meg kell találnia a *kísérletek mögött rejtőző törvényeket*, hogy a fenti *osztályokat egyesíteni* lehessen. A fejlődés során mindig adódott lehetőség ilyen egyesítésekre, azonban időről időre új törvényekre is bukantunk. Már-már egységes fizikai világgép állt előttünk, amikor egyszerre csak felfedezték a röntgensugarakat. Végül ezt az új jelenséget is sikerült egybeötvözni az előzőkkel... ekkor meg a mezonokat fedezték fel... A „játszma” minden fázisában meglehetősen áttekinthetetlen, befejezetlen a kép. Nagy ismeretanyagot sikerül egybekapcsolni, de mindig maradnak szanaszét lógó szálak.

Ez ma is a helyzet, amit most megpróbálunk leírni.

A jelenségek összeötvöződését néhány történeti példán is szemléltetjük. Vegyük először a *mechanika* és a *hőjelenségek* összefüggését. Amikor az atomok mozgásban vannak, annál több hőt tartalmaz a rendszer, minél jobban fokozódik a mozgás, és így a *hőjelenségeket és a hőmérsékleti hatásokat a mechanika törvényeivel lehet leírni*. Hasonlóan nagy jelentőségű volt az elektromosság, a mágnesség és a fény közötti kapcsolat felfedezése, mely a ma *elektromágneses térnek* nevezett dolog különböző oldalainak mutatkozott. Az elméleti egyesítés következő állomása a kémia kvan-