

Richard Phillips Feynman s-a născut la New York în 1918. Din copilărie, înzestrările sale excepționale s-au manifestat în pasiunea pentru experimente și în capacitatea de a descoperi pe cont propriu matematica. A studiat la Institutul Tehnologic din Massachusetts și la Princeton. În timpul războiului, la Los Alamos, a participat la Proiectul Manhattan pentru construirea bombei atomice. După război, a predat la Universitatea Cornell, apoi, din 1951, la Institutul Tehnologic din California.

Principala sa contribuție în fizică a fost elaborarea metodei integralelor de drum, care i-a permis să formuleze o teorie deopotrivă riguroasă și intuitivă a electrodinamicii cuantice și pentru care a primit în 1965 Premiul Nobel (împreună cu Julian Schwinger și Sin-Itiro Tomonaga). Preocupările sale au cuprins un spectru uimitor de larg: fizica particulelor elementare, proprietățile heliului lichid, informatică, biologie, muzică, desen. Cunoscut pentru nonconformismul lui printre fizicieni, a dobândit și o celebritate publică în 1986, când a explicat pe înțelesul tuturor cauzele dezastrului navetei Challenger. A murit în 1988.

RICHARD P. FEYNMAN

ȘASE LECȚII UȘOARE

BAZELE FIZICII EXPLICATE
DE CEL MAI STRĂLUCIT PROFESOR

Text redactat de
RICHARD P. FEYNMAN,
ROBERT B. LEIGHTON și MATTHEW SANDS

Traducere din engleză de
MIHAI GAVRILĂ și OLIVIU GHERMAN

 HUMANITAS
BUCUREȘTI

<i>Notă asupra traducerii</i>	5
<i>Nota editorului american</i>	7
<i>Introducere</i> de Paul Davies	9
<i>Prefață</i> de David L. Goodstein și Gerry Neugebauer	21
<i>Prefața lui Feynman</i>	27
1. Atomi în mișcare	33
2. Concepțiile de bază ale fizicii	57
3. Legătura fizicii cu alte științe	83
4. Conservarea energiei	105
5. Teoria gravitației	125
6. Comportarea cuantică	153

Atomi în mișcare

INTRODUCERE

Acest curs de fizică de doi ani este conceput considerând că dumneata, cititorule, vei deveni fizician. Desigur, nu e absolut necesar, dar asta presupune orice profesor, de orice specialitate ar fi el! Dacă vei deveni fizician, vei avea mult de studiat: cei două sute de ani ai domeniului de cunoaștere care se dezvoltă cel mai rapid dintre toate câte există. Atât de multe cunoștințe încât ai putea crede că n-o să le poți învăța în patru ani și, de fapt, nici n-ai să poți; va trebui să urmezi și cursuri de specializare.

E surprinzător faptul că, în ciuda imensei cantități de muncă depusă în tot acest răstimp, e posibil să se condenseze într-o mare măsură această enormă cantitate de rezultate, găsindu-se *legi* care rezumă toată cunoașterea noastră. Totuși, legile sunt atât de greu de înțeles încât ar fi incorect față de dumneata dacă am porni în explorarea acestui vast subiect fără un plan sau o schiță a relațiilor dintre o ramură a științei și alta. De aceea, conform acestor observații preliminare, primele trei capitole vor schița legătura fizicii cu restul științelor, legăturile științelor una cu alta și semnificația generală a științei, pentru a ne ajuta să căpătăm o „intuiție“ a subiectului.

Respect pentru nemuritorii...

Ai putea să te întrebi de ce nu se poate preda fizica dând legile de bază pe prima pagină şi apoi arătând cum se aplică ele în toate împrejurările posibile, aşa cum se face în geometria euclidiană, unde se enunţă axiomele, iar apoi se fac tot felul de deducţii. (Astfel, nemulţumit că trebuie să înveţi fizica în patru ani, ai vrea s-o înveţi în patru minute?) Nu putem proceda aşa din două motive. Mai întâi, nu *cunoaştem* încă toate legile fundamentale: există o frontieră a necunoaşterii care se extinde. În al doilea rând, enunţarea corectă a legilor fizicii implică unele idei foarte puţin obișnuite, care cer o matematică avansată pentru descrierea lor. De aceea e nevoie de o importantă pregătire prealabilă chiar şi pentru a înţelege ce semnificaţie au *cuvintele*. Nu, nu e posibil să procedăm în felul acesta. Putem înainta doar din aproape în aproape.

Fiecare element sau parte din întregul naturii reprezintă întotdeauna doar o *aproximaţie* a adevărului întreg sau, mai bine spus, a adevărului întreg în măsura în care îl cunoaştem noi. De fapt, tot ce cunoaştem e numai un fel de aproximaţie, fiindcă *ştim că nu ştim încă toate legile*. De aceea, lucrurile trebuie învăţate doar pentru a fi dezvăţate din nou sau, mai probabil, pentru a fi corectate.

Principiul ştiinţei, aproape definiţia ei, este: *Testul oricărei cunoaşteri e experimentul*. Experimentul e singurul judecător al „adevărului” ştiinţific. Dar care-i sursa cunoaşterii? De unde vin legile care trebuie verificate? Experienţa însăşi ajută la găsirea acestor legi, în sensul că ne dă sugestii. Dar e de asemenea necesară multă *imaginaţie* pentru a obţine din aceste sugestii marile generalizări — pentru a ghici minunatele, simplele, dar foarte straniile structuri aflate în spatele tuturor, iar apoi a experimenta, spre a verifica iarăşi dacă am ghicit bine. Acest proces de imaginare este atât de dificil încât a dus la o diviziune a muncii în fizică: există fizicieni *teoreticieni* care imaginează, deduc şi ghicesc noile

legi, dar nu fac experienţe; şi apoi, există fizicieni *experimentatori* care experimentează, imaginează, deduc şi ghicesc.

Am spus că legile naturii sunt aproximative: că întâi le găsim pe cele „greşite”, iar apoi le găsim pe cele „corecte”. Dar cum poate fi o experienţă „greşită”? În primul rând, într-un mod banal: dacă ceva nu e în ordine cu aparatul şi nu ai băgat de seamă. Dar aceste lucruri pot fi uşor puse la punct, verificând minuţios aparatura. Aşa că, fără a ne lega astfel de lucruri minore, cum *pot* fi greşite rezultatele unei experienţe? Doar fiind neprecise. De exemplu, masa unui obiect nu pare să se schimbe vreodată: un titirez care se învârteşte are aceeaşi greutate ca şi unul în repaus. Astfel, a fost inventată o „lege”: masa este constantă, independenţă de viteză. Se constată că această „lege” este incorectă. Se dovedeşte că masa creşte cu viteza, dar creşterile apreciable necesită viteze apropiate de cea a luminii. O lege *adevărată* este următoarea: dacă un obiect se mişcă cu o viteză mai mică decât 100 kilometri pe secundă, masa rămâne constantă în limita unei milionimi din valoarea ei. Într-o astfel de formă aproximativă, aceasta e o lege corectă. Ne-am putea gândi că în practică noua lege nu aduce vreo diferenţă semnificativă. Da şi nu. Pentru viteze obișnuite o putem desigur uita şi folosi legea simplă a masei constante, cu o bună aproximaţie. Dar la viteze mari greşim, şi greşim cu atât mai mult cu cât viteza e mai mare.

În sfârşit, şi deosebit de interesant, *din punct de vedere filozofic greşim complet* cu legea aproximativă, întreaga imagine pe care o avem asupra lumii trebuie modificată chiar dacă masa se modifică numai cu foarte puţin. Acesta e un lucru caracteristic pentru filozofia, sau ideile, din spatele legilor. Chiar un efect foarte mic reclamă uneori schimbări profunde în ideile noastre.

Atunci, ce să studiem mai întâi? Să studiem legea *corectă* dar nefamiliară, cu conceptele sale stranii şi dificile, de

exemplu teoria relativităţii, spaţiu-timpul cvadridimensional şi așa mai departe? Sau să studiem mai întâi legea simplă a „masei constante” care e doar aproximativă, dar nu implică idei atât de dificile? Prima este mai interesantă şi mai atrăgătoare, dar a doua e mai ușor de sesizat la început şi reprezintă un prim pas în înţelegerea celei de-a doua. Această problemă apare iarăşi şi iarăşi în tot studiul fizicii. La momente diferite va trebui s-o rezolvăm în moduri diferite, dar în fiecare etapă merită să învăţăm ce este cunoscut în prezent, cât de precis e, cum se potriveşte cu toate celelalte fapte şi cum s-ar putea schimba când vom afla mai mult.

Să trecem acum la schiţa sau planul general al înţelegerii noastre actuale a ştiinţei (în particular a fizicii, dar de asemenea şi a altor ştiinţe de la periferia ei). Astfel, când ne vom concentra mai târziu asupra unei anumite probleme, vom avea o idee despre întreg şi vom şti de ce problema în cauză e interesantă şi cum se încadrează ea în ansamblul structurii. Aşadar, care este imaginea noastră generală despre lume?

MATERIA E ALCĂTUITĂ DIN ATOMI

Dacă, într-un cataclism, întreaga cunoaştere ştiinţifică ar fi distrusă şi ar fi transmisă generaţiilor următoare numai o frază, ce enunţ ar conţine cea mai multă informaţie în cât mai puţine cuvinte? Cred că aceasta este ipoteza *atomistă* (sau *faptul* atomic, ori cum vreţi să-i spuneţi) conform căreia *toate lucrurile sunt alcătuite din atomi — mici particule care se mişcă continuu, atrăgându-se una pe alta când sunt la mică distanţă, respingându-se când sunt înghesuie una într-alta*. Veţi vedea că în această unică frază există o cantitate *enormă* de informaţie despre lume, dacă folosim doar puţină imaginaţie şi gândire.

Pentru a ilustra puterea ideii atomiste, să presupunem că privim o picătură de apă cu diametrul de o jumătate de

centimetru. Dacă privim foarte de aproape nu vedem decât apă — apă omogenă şi continuă. Să o mărim cu cel mai bun microscop optic disponibil, aproximativ de două mii de ori: atunci picătura de apă va avea diametrul de circa doisprezece metri, cam cât o cameră mai spaţioasă. Dacă am privi de aproape, am vedea *încă* apă relativ uniformă — dar ici şi colo ar apărea mici obiecte de forma unor mingi de rugby înotând înainte şi înapoi. Foarte interesant. Aceştia sunt paramecii. Ne-am putea opri la acest nivel, devenind atât de curioşi în privinţa parameciilor, cu ciliile fremătând şi corpurile lor care se răsucesc, încât să nu mergem mai departe decât poate pentru a mări paramecii încă şi mai mult ca să vedem înăuntrul lor. Acesta este desigur un subiect pentru biologie; dar trecem mai departe şi privim şi mai de aproape substanţa însăşi a apei, mărint-o iarăşi de două mii de ori. Acum picătura de apă are circa 24 de kilometri diametru, iar dacă o privim foarte de aproape vedem un fel de forfotă, care nu mai are un aspect uniform — arată cam ca o mulţime de oameni la un joc de fotbal, văzuţi de la distanţă foarte mare. Pentru a vedea ce este cu această forfotă, o vom mări de alte două sute cincizeci de ori şi vom vedea ceva asemănător cu ceea ce e arătat în figura 1.1. Aceasta e o imagine a apei mărită de un miliard de ori, dar idealizată în mai multe feluri, în primul rând, particulele sunt desenate simplificat, cu margini nete, ceea ce e inexact, în al doilea rând,

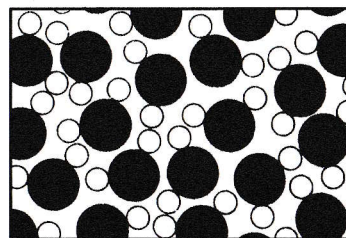


Fig. 1.1. Apă mărită de un miliard de ori

pentru simplitate ele sunt reprezentate schematic într-o aranjare bidimensională, dar, evident, mișcarea lor are loc în trei dimensiuni. Observați că există două feluri de cercuri — unele negre pentru a reprezenta atomii de oxigen, iar altele albe pentru atomii de hidrogen; fiecare oxigen are doi hidrogeni legați de el. (Fiecare grup de câte un oxigen cu cei doi hidrogeni ai săi se numește moleculă.) Imaginea este idealizată apoi și prin faptul că particulele reale din natură se agită continuu, sar, se rotesc și se învârt una în jurul celeilalte. Va trebui să vă reprezentați o imagine dinamică, nu una statică. Alt lucru care nu poate fi ilustrat într-un desen este faptul că particulele „sunt legate laolaltă” — că se atrag una pe alta: aceasta de aici e atrasă de cealaltă etc. Întregul sistem de particule este „legat laolaltă”, așa-zicând. Pe de altă parte, particulele nu pătrund una prin alta. Dacă încercăm să înghesim două din ele prea aproape, ele se resping.

Atomii au raze de $1-2 \times 10^{-8}$ cm. Lungimea de 10^{-8} cm se numește *angström* (un nume ca oricare altul), așa că spunem că ei au raze de $1-2$ angströmi (Å). Alt mod de a ține minte mărimea lor e următorul: dacă un măr este mărit până la dimensiunea Pământului, atunci atomii din măr devin aproximativ de mărimea mărului inițial.

Acum imaginați-vă această mare picătură de apă cu toate particulele ei în agitație legate laolaltă și urmărindu-se una pe alta. Apa își păstrează volumul; ea nu se desface în părți, din cauza atracției dintre molecule. Dacă o picătură se află pe o pantă, unde se poate mișca dintr-un loc într-altul, ea va curge, fără să dispară pur și simplu — lucrurile nu se desfac în bucăți, datorită atracției moleculare. Mișcarea de agitație este ceea ce noi ne reprezentăm drept *căldură*: când crește temperatura, sporește agitația. Dacă încălzim apa, agitația crește, spațiul dintre atomi se mărește, iar dacă încălzirea continuă vine momentul când atracția dintre molecule

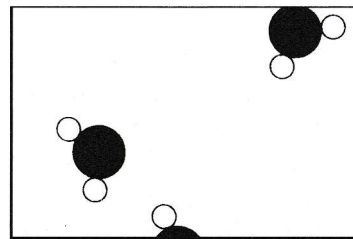


Fig. 1.2. Abur

nu mai este suficientă pentru a le ține laolaltă — ele se *împrăstie* și se separă una de alta. În acest fel producem abur din apă — crescând temperatura; particulele se îndepărtează din cauza agitației sporite.

În figura 1.2 avem o imagine a aburului. Această imagine e greșită într-o privință: la presiunea atmosferică obișnuită într-o cameră întreagă ar putea exista doar câteva molecule și, desigur, ar fi mai puțin de trei în această figură. Cele mai multe dreptunghiuri de această mărime nu ar conține nici o moleculă, dar în desen avem întâmplător două și jumătate sau trei (astfel încât ea să nu fie complet albă). Acum, în cazul aburului, vedem moleculele caracteristice mai clar decât în cazul apei. Pentru simplitate, moleculele sunt desenate astfel încât între liniile care unesc centrele atomilor există un unghi de 120° . De fapt unghiul este de $105-3'$, iar distanța dintre centrul unui atom de hidrogen și centrul unui atom de oxigen e de $0,957$ Å, astfel încât cunoaștem această moleculă foarte bine.

Să vedem câteva din proprietățile aburului sau ale oricărui alt gaz. Moleculele, fiind separate una de alta, se vor izbi de pereți. Imaginați-vă o cameră cu un număr de mingi de tenis (o sută, de exemplu) sărind prin ea în toate direcțiile în neconținută mișcare. Când ele ciocnesc peretele, acesta este împins. (Desigur că trebuie să reușim să ținem peretele pe loc.) Aceasta înseamnă că gazul exercită o forță

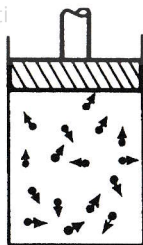


Fig. 1.3. Cilindru cu piston conținând un gaz

intermitentă asupra oricărei suprafețe, forță pe care simțurile noastre o resimt doar ca o *împingere medie* (noi înșine nefiind măriți de un miliard de ori). Pentru a limita un gaz trebuie să aplicăm o presiune. Figura 1.3 arată recipientul standard pentru păstrat gazele (folosit în toate manualele) — un cilindru cu piston. Nu contează ce formă au moleculele de apă, așa că, pentru simplitate, le vom desena ca pe niște mingi de tenis sau mici cerculețe. Aceste obiecte sunt în neconținută mișcare în toate direcțiile. Pistonul este lovit de atât de multe dintre ele, tot timpul, încât pentru a-l împiedica să fie încet-încet scos afară din recipient de această lovire continuă, va trebui să-l apăsăm în jos cu o anumită forță, pe care o numim *presiune* (în realitate, forța este presiunea înmulțită cu aria). Evident, forța e proporțională cu aria, căci dacă mărim aria dar menținem același număr de molecule pe centimetru cub, numărul de ciocniri cu pistonul crește în aceeași proporție în care a crescut aria.

Să punem acum de două ori mai multe molecule în acest recipient, dublând astfel densitatea, iar moleculele să aibă în medie aceeași viteză, adică temperatură. Atunci, cu o bună aproximație, numărul de ciocniri se va dubla și întrucât fiecare dintre ele va fi la fel de „energică” ca și înainte, presiunea este proporțională cu densitatea. Dacă luăm în considerare adevărata natură a forțelor dintre atomi, ar trebui ca presiunea să descrească puțin datorită atracției dintre atomi și

să crească puțin din cauza volumului finit pe care-l ocupă aceștia. Totuși, într-o aproximație satisfăcătoare, dacă densitatea e suficient de joasă, astfel încât să nu existe prea mulți atomi, presiunea e proporțională cu densitatea.

Să observăm încă ceva: dacă mărim temperatura fără a modifica densitatea gazului, adică mărim viteza atomilor, ce se va întâmpla cu presiunea? Ei bine, atomii lovesc mai tare deoarece se mișcă mai repede și, totodată, lovesc mai des, așa că presiunea crește. Vedeți cât de simple sunt ideile teoriei atomice.

Să considerăm altă situație. Închipuiți-vă că pistonul se mișcă spre interior, astfel încât atomii sunt comprimați încet într-un spațiu mai mic. Ce se va întâmpla când un atom lovește pistonul în mișcare? Evident, el câștigă viteză din ciocnire. O puteți constata de exemplu făcând să ricoșeze o minge de ping-pong pe o paletă care se mișcă înainte și veți constata că mingea este întoarsă cu o viteză mai mare decât cea cu care s-a îndreptat spre paletă. (Exemplu particular: dacă un atom se întâmpla să stea pe loc, iar pistonul îl lovește, el se va pune cu siguranță în mișcare.) Așa că atomii sunt „mai fierbinți” când se îndepărtează de piston decât erau înainte de a-l lovi. Deci toți atomii care sunt în vas vor fi câștigat viteză. Aceasta înseamnă că *atunci când comprimăm încet un gaz, temperatura gazului crește*. Astfel, la *compresie* lentă temperatura unui gaz va crește, iar la *destindere* lentă temperatura va descrește.

Să revenim acum la picătura noastră de apă și privim în altă direcție. Închipuiți-vă că agitația moleculelor din apă descrește continuu. Știm că există forțe de atracție între molecule, așa că de la un moment dat moleculele nu vor mai fi în stare să se agite atât de liber. Ce se va petrece la temperaturi foarte joase este indicat în figura 1.4: moleculele se imobilizează într-o nouă structură, care e *gheața*. Această diagramă schematică a gheții e greșită, pentru că e în două