

TRAIAN ANGHIEL



Din ce este
CONSTRUITĂ
LUMEA

Fizica pe care nu o înveți la școală

CORINT
EDUCAȚIONAL



CUPRINS

| | | | |
|---|----|---|----|
| Introducere | 6 | Relativitatea simultaneității | 72 |
| 1 Ce este lumina: undă sau corpuscul? | | Dilatarea duratei | 73 |
| 1.1. Teorii despre natura luminii | 13 | Contractia lungimii | 74 |
| Teoria corpusculară | 13 | Viteza luminii este viteza maximă în natură | 75 |
| Teoria ondulatorie | 14 | 2.4. Cinematică și dinamică relativistă | 75 |
| Natura duală a luminii | 16 | Compunerea vitezelor | 75 |
| 1.2. Lumina: undă electromagnetică | 17 | Variația masei cu viteza | 76 |
| Interferența luminii | 18 | Relația masă-energie | 77 |
| Difracția luminii | 23 | 2.5. Spațiul Minkowski | 78 |
| Polarizarea luminii | 31 | Cvadrintervalul relativist | 78 |
| Holografia | 37 | Hiperconul luminos | 79 |
| 1.3. Lumina: ansamblu de corpusculi | 39 | Linia de univers | 80 |
| Efectul fotoelectric extern | 39 | 2.6. Paradoxul gemenilor | 81 |
| Max Planck și cuanta de energie | 42 | Prezentarea paradoxului | 81 |
| <i>Termografie și termoviziune</i> | 44 | Rezolvarea paradoxului | 82 |
| <i>Sisteme de încălzire cu infraroșu</i> | 44 | <i>Cel mai scump portret al unui om de știință</i> | 85 |
| <i>Apllicații ale legii de deplasare a lui Wien</i> | 46 | | |
| Albert Einstein și cuantele de lumină | 49 | 3 Particulele sunt unde? | |
| Efectul Compton | 51 | 3.1. Particulele se comportă ca unde | 86 |
| | | Louis de Broglie: un istoric în devenire ajuns fizician | 86 |
| 2 Poate fi depășită viteza luminii? | | Ipoteza lui de Broglie | 87 |
| 2.1. Bazele Teoriei Relativității Restrânse | 53 | 3.2. Confirmarea experimentală | 88 |
| Principiul relativității în mecanica clasică | 54 | Evenimente pregătitoare | 89 |
| <i>Principiile mecanicii newtoniene</i> | 54 | Experiența lui Davisson și Germer | 89 |
| <i>Formulări echivalente ale principiului relativității</i> | 57 | Experiența lui G. P. Thomson | 90 |
| <i>Spațiul absolut și timpul absolut în viziunea lui Newton</i> | 57 | 3.3. Microscopul electronic | 91 |
| Teoria eterului antrenat | 59 | Microscopul optic | 91 |
| Teoria eterului imobil | 61 | Scurt istoric | 94 |
| Experiența lui Michelson | 62 | Tipuri de microscopie electronice | 94 |
| 2.2. Teoria Relativității Restrânse | 64 | Deosebiri între microscopul optic și cel electronic | 96 |
| Postulatele TRR | 65 | | |
| <i>Albert Einstein – scurtă biografie</i> | 66 | 4 Cât de complex este atomul? | |
| <i>A 5-a conferință Solvay – participanți</i> | 68 | 4.1. Structura discretă a substanței: scurt istoric | 97 |
| Sincronizarea ceasurilor | 69 | Atomismul în antichitate | 97 |
| Transformările Lorentz | 71 | Atomismul și teoria cinetică a gazelor | 98 |
| 2.3. Consecințele transformărilor Lorentz | 72 | | |

| | |
|---|-----|
| Atomismul și electricitatea | 104 |
| <i>Pila voltaică</i> | 105 |
| <i>Experimentul lui Millikan</i> | 108 |
| 4.2. Thomson: cozonacul cu stafide | 110 |
| Atomii trebuie să aibă o structură: ipoteza lui Prout | 110 |
| <i>Influența asupra lui Rutherford</i> | 110 |
| Radiațiile X | 111 |
| Spectre atomice | 113 |
| Modelul atomic al lui Thomson | 114 |
| 4.3. Rutherford: modelul planetar al atomului | 115 |
| Rutherford și experiențele sale de împrăștiere a particulelor alfa | 116 |
| Rutherford taie nodul gordian | 117 |
| Deficiențe ale modelului planetar | 118 |
| 4.4. Bohr: primul model cuantic al atomului | 119 |
| Postulatele lui Bohr | 119 |
| Utilizarea modelului Bohr pentru atomul de hidrogen | 120 |
| Serii spectrale ale atomului de hidrogen | 121 |
| Alte confirmări experimentale | 123 |
| <i>Deficiențe ale modelului atomic Bohr</i> | 123 |
| Modelul Sommerfeld | 123 |
| <i>Deficiențe ale modelului Sommerfeld</i> | 125 |
| 4.5. Modelul cuantic actual al atomului | 125 |
| Principiul lui Pauli | 125 |
| Spinul electronului | 126 |
| Numere cuantice | 127 |
| <i>Efectul Zeeman</i> | 128 |
| Atomul cu mai mulți electroni | 131 |
| 4.6. O nouă teorie fizică: mecanica cuantică | 133 |
| Louis de Broglie și misterioasele sale unde pilot | 134 |
| Mecanica ondulatorie | 135 |
| <i>Ecuția lui Schrödinger</i> | 135 |
| Mecanica matricială | 137 |
| Relațiile de incertitudine ale lui Heisenberg | 138 |
| Interpretarea statistică a funcției de undă | 140 |
| <i>Nimeni nu înțelege mecanica cuantică</i> | 141 |

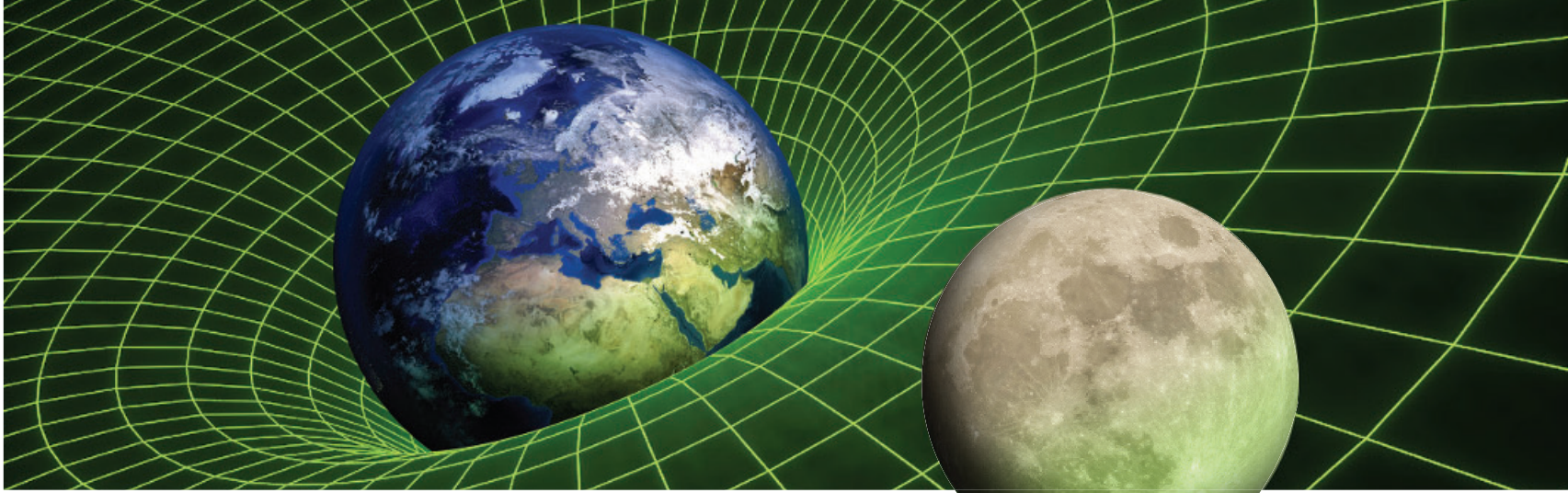
5 Cum funcționează laserul?

| | |
|---|-----|
| 5.1. Emisia spontană și emisia stimulată | 142 |
| Emisia spontană | 142 |
| Emisia stimulată | 143 |
| 5.2. De la echilibrul termodinamic la inversiunea de populație | 144 |
| Populația nivelurilor la echilibru termodinamic | 144 |
| Inversiunea de populație | 144 |
| Scurt istoric al dezvoltării laserilor | 145 |
| Clasificarea laserilor | 146 |
| 5.3. Părțile componente ale unui laser | 146 |
| Mediul activ | 146 |
| Sistemul de excitație | 148 |
| Rezonatorul optic | 149 |
| 5.4. Proprietăți și aplicații | 149 |
| Proprietățile radiației laser | 150 |
| Aplicațiile radiației laser | 150 |
| Laserul de la Măgurele | 153 |
| Laserul cu electroni liberi | 153 |
| Lasere cu semiconductori. Dioda laser | 154 |
| <i>Semiconductori</i> | 154 |

6 Pisica lui Schrödinger este vie sau moartă?

| | |
|--|-----|
| 6.1. Principiile mecanicii cuantice | 159 |
| Starea cuantică | 160 |
| Observabilele în mecanica cuantică | 161 |
| Măsurarea în mecanica cuantică | 162 |
| Valori posibile și probabilități | 162 |
| Reducerea pachetului de unde prin măsurare | 163 |
| Evoluția funcției de undă | 164 |
| <i>Postulatul colapsului și postulatul realismului</i> | 165 |
| 6.2. Probabilitate și incertitudine | 165 |
| Valoarea medie a unei observabile | 166 |
| Principiul de incertitudine al lui Heisenberg | 166 |
| Operatorii asociați observabilelor poziție și impuls | 166 |
| Densitatea de probabilitate | 167 |





| | | | |
|--|-----|--|-----|
| Experimentul cu două fante | 167 | Electrodinamica cuantică | 205 |
| 6.3. Interpretări ale mecanicii cuantice | 168 | Cromodinamica cuantică | 207 |
| Interpretarea Copenhaga | 169 | <i>Unde sau particule? Sau poate câmpuri?</i> | 207 |
| <i>Colapsul funcției de undă și gravitația</i> | 170 | <i>Particula Odderon</i> | 208 |
| <i>Paradoxul EPR. Parametri ascunși.</i> | 170 | Unificarea forțelor fundamentale | 209 |
| <i>Inseparabilitatea cuantică.</i> | | 7.3. Gravitonul și undele gravitaționale | 209 |
| <i>Teorema lui Bell</i> | 171 | Teoria supercorzilor. Gravitonul | 209 |
| Hugh Everett și lumile multiple | 173 | <i>Scara Plank</i> | 209 |
| 6.4. Pisica lui Schrödinger | 175 | <i>Teoria Kaluza-Klein și universul cu cinci</i> | |
| Prezentarea experimentului | 175 | <i>dimensiuni</i> | 211 |
| Soluții posibile | 176 | <i>Universul cu cinci dimensiuni și o nouă</i> | |
| 6.5. Cazuri particulare | 178 | <i>particulă de câmp</i> | 212 |
| Interpretarea grafică a principiului de | | Unde gravitaționale | 213 |
| incertitudine | 178 | | |
| Confinarea particulelor | 179 | 8 Este posibilă teleportarea? | |
| Particula într-o cutie unidimensională | 180 | 8.1. Unități de informație: bit și qubit | 216 |
| Efectul tunel | 180 | Unitatea clasică de informație: bitul | 217 |
| 7 Din ce este construită lumea? | | Unitatea cuantică de informație: qubitul | 217 |
| 7.1. Modelul Standard al particulelor | | Entanglement | 220 |
| elementare | 184 | 8.2. Teleportarea cuantică | 222 |
| Fermioni și bosoni fundamentali | 185 | Transferul stării cuantice | 222 |
| <i>Primele trei minute</i> | 187 | Caracteristici ale teleportării cuantice | 226 |
| <i>Suprafluiditate și superconductivitate</i> | 188 | 8.3. Calculul cuantic | 226 |
| Particule de materie | 189 | Porți logice clasice | 227 |
| <i>Neutrini</i> | 192 | Necesitatea dezvoltării calculatoarelor | |
| Particule purtătoare de forță | 194 | cuantice | 230 |
| <i>Gluonul</i> | 196 | Porți logice cuantice | 231 |
| <i>O nouă forță fundamentală?</i> | 197 | Paralelismul cuantic | 238 |
| Antiparticule | 198 | Algoritmul Deutsch-Jozsa | 239 |
| <i>Pozitronul</i> | 198 | Decoerența sistemelor de calcul | 241 |
| Bosonul Higgs | 199 | Realizări în domeniul calculatoarelor | |
| <i>Particule cu masă și particule fără masă.</i> | | cuantice | 242 |
| <i>Mecanismul Higgs</i> | 201 | <i>Calculatorul cuantic personal</i> | 243 |
| Numere cuantice | 203 | Supremația cuantică | 245 |
| <i>Vidul cuantic și spuma cuantică</i> | 204 | Un uriaș pas înainte pentru cercetare | 245 |
| 7.2. Teoria cuantică a câmpului | 205 | La final: de ce există ceva mai degrabă decât | |
| | | nimic? | 247 |

Introducere

„Știința oferă cea mai îndrăzneță metafizică a epocii. Este o construcție complet umană, condusă de credința că, dacă visăm, muncim să descoperim, să explicăm și să visăm din nou, plonjând astfel în mod repetat într-un teren nou, lumea va deveni cumva mai clară și vom înțelege adevărata ciudățenie a universului. Și ciudățenia se va dovedi a fi conectată și va avea sens.”

Edward O. Wilson

„Cel mai de neînțeles lucru referitor la Univers este faptul că Universul poate fi înțeles.”

Albert Einstein



Omul poate înțelege Universul

*

Interacțiunea lui *Homo sapiens*¹ cu lumea înconjurătoare a devenit din ce în ce mai eficientă odată cu trecerea timpului. Astfel, omul rațional – în calitate sa de *Homo faber*² – a făurit unelte din ce în ce mai sofisticate, cu care a vânat, a lucrat pământul pentru a obține recolte care să-l hrănească atunci când nu putea vâna și care să-i asigure condițiile pentru a se organiza în comunități mari (orașe și state: imperii, regate, republici), unelte cu care a construit case, palate, lăcașe de cult și zgârie-nori, precum și alte unelte (printre care se află motoare, roboți, rachete, sateliți și stația spațială internațională). Din păcate, oamenii au construit și unelte de distrugere – arme, cu care să poarte războaie în care au pierit mulți dintre locuitorii planetei noastre.

Așadar, marile realizări ale omului au putut fi înfăptuite datorită uneltelor pe care le-a creat de-a lungul timpului. Pe de altă parte, uneltele au putut fi proiectate și construite de către om deoarece acesta a încercat să se raporteze la natură în mod rațional, la început timid, dar din ce în ce mai hotărât odată cu trecerea timpului, eliminând pe rând din această relație elementele fantastice, supranaturale și iraționale. Astfel, a reușit să obțină mai întâi unelte simple (e.g., toporul de mână din silex), apoi luneta, telescopul, motorul termic, becul electric și microscopul, pentru ca mai târziu, în timpurile recente, să dezvolte calculatorul (mai întâi pe cel clasic și apoi – în vremea noastră – pe cel cuantic).

Raportarea rațională la natură a fost însoțită de apariția și dezvoltarea științelor naturii care, la rândul lor, au încurajat acest tip de raportare. Fizica este una dintre cele mai vechi științe fundamentale, al cărei obiect general de studiu este natura și care și-a formulat ca scop principal descoperirea legilor

acesteia și ca scop secundar – atins prin intermediul științelor ingineresti derivate din ea – crearea de instrumente, aparate și dispozitive utilizate atât pentru îmbogățirea cunoașterii, cât și pentru îmbunătățirea vieții omului. Putem spune că această disciplină este una dintre cele mai importante științe ale naturii deoarece explică nu numai fenomenele fizice, ci și altele, întâlnite în chimie și biologie.

**

În antichitate, în cadrul civilizațiilor sumeriană, egipteană, greacă și indiană s-a dezvoltat astronomia, care, ulterior, a devenit o parte importantă a fizicii. În cadrul ei, oamenii au încercat să-și explice mișcările corpurilor cerești și să facă predicții referitoare la evenimentele astronomice (e.g., eclipse). Desigur, la început explicațiile au fost însoțite de elemente specifice vremurilor respective, crezându-se – de exemplu – că stelele și planetele erau zei. În cadrul filosofiei naturale, curent filosofic considerat precursorul științelor moderne, s-a dezvoltat studiul naturii și universului fizic, filosofii presocratici greci refuzând explicațiile non-naturaliste și afirmând că toate fenomenele observate, inclusiv cele cerești, au cauze naturale în care zeii nu sunt implicați în vreun fel.

În secolul V î.H., filosoful grec Leucip a fondat teoria atomistă, dezvoltată ulterior de către discipolul său Democrit și popularizată de Epicur (discipol al unui discipol al filosoful grec) și de adeptul său Lucrețiu³. Leucip afirma că mișcarea atomilor are loc conform legilor mecanicii, fără implicarea unor forțe supranaturale⁴. Leucip a fost maestrul, dar Democrit a fost marele discipol, cel care a edificat marea catedrală a atomismului antic, ridicând un colț al vălului bine așezat până atunci pe ordinea ascunsă a lumii; a scris un număr mare de texte în majoritatea

¹ *Homo sapiens* (i.e., *Omul înțelept sau Omul rațional*) este un termen inventat de medicul și botanistul suedez Carl Linnaeus (1707-1778) pentru a desemna omul modern (apărut în urmă cu circa 300.000 de ani).

² *Homo faber* (i.e., *Omul creator*) este un concept filosofic utilizat de filosofii Hannah Arendt (1906-1975) și Max Scheler (1874-1928) pentru a desemna capacitatea omului de a controla mediul înconjurător prin intermediul uneltelor pe care le fabrică.

³ Poetul și filosoful latin Lucrețiu, pe numele lui Titus Lucretius Carus (94-55 î.H.), a scris *De Rerum Natura* (*Despre natura lucrurilor*) în care prezintă în versuri atomismul grecesc. Uitat vreme de mai mult de un mileniu, textul acestuia a fost descoperit în 1417 în biblioteca unei mănăstiri din Germania de către umanistul Poggio Bracciolini și redat Europei (eveniment care va avea un impact uriaș asupra Renașterii, deși Biserica Catolică a încercat să oprească răspândirea textului printr-o serie de interdicții).

⁴ Aceste afirmații au fost făcute de către filosofii greci fără ca ele să fie verificate în practică (știința se va naște mult mai târziu). Ele sunt subsumate unei atitudini de contemplare (*theoréin*), considerată superioară celei de a face (*práttēin*) deoarece – așa cum spune Hannah Arendt (1906-1975), teoretician politic și filosof, una dintre figurile marcante ale gândirii socio-politice contemporane – vechii greci și-au trăit în permanentă condiția de muritori în concurență cu zeii, tânjind după nemurire (*athanatizein*), asigurată, în cazul oamenilor, de gândire. Grecii considerau că numai gândirea, fie sub formă de *lógos* (rațiune), fie de *nóesis* (intelect), are acces la adevăr sau la adevărata Ființă.

domeniilor cunoașterii¹, fiind tratat cu foarte mare respect în Antichitate, inclusiv de către mari personalități cum au fost Seneca și Cicero. Conform lui Democrit, Universul este alcătuit dintr-un număr nelimitat de atomi mișcându-se într-un nesfârșit spațiu vid. În afară de formă, atomii nu au nicio calitate, neavând culoare, gust, miros etc: caldul, recele, culoarea, gustul sunt pur subiective, formându-se – după expresia lui Democrit – prin opinie; în realitate există numai atomii și vidul, fiecare particică de materie fiind alcătuită dintr-un număr finit de atomi, particule indivizibile, dar cu dimensiune finită².

Descoperirea rolului important al matematicii în cunoaștere este realizată de filosoful și matematicianul grec Pitagora (580-495 î.H.), căruia îi sunt atribuite cuvintele: „Numărul cuprinde izvorul și rădăcina veșnicei curgătoare naturi.” Tot un filosof grec, anume Platon (427-347 î.H.), afirmă și mai clar că limbajul cel mai adecvat pentru descrierea naturii este matematica. Se spune că la poarta de intrare în Academie, școala de filosofie fondată și condusă de Platon într-o grădină din apropierea Atenei³, scria: „Să nu intre aici cine nu știe geometrie.”

În vestul Europei, după căderea Imperiului Roman de Apus (secolul V d.H.), observarea directă a naturii a avut o lungă perioadă de stagnare și chiar de regres. Opera lui Aristotel (filosof păgân, dar care credea în nemurirea sufletului, deci acceptabil pentru noua religie, singura permisă după edictele împăratului Teodosie din anii 380-395 d.H. care au declarat creștinismul religie unică și obligatorie), inclusiv lucrarea sa *Fizica* (importantă deoarece este prima Fizică formulată de om, rudimentară, dar totuși coerentă și rațională, în schimb plină de afirmații neverificate și incorecte despre natură) a fost acceptată oficial de Biserica Catholică. Secolele care au urmat, în care gândirea a fost dominată de monoteismul creștin nu au permis supraviețuirea naturalismului raționalist și materialist al marelui Democrit.

În secolele XV-XVII, în Europa Occidentală s-a desfășurat Revoluția Științifică, care a prilejuit producerea unei serii de transformări profunde, în cadrul cărora au fost eliminate multe concepții incorecte (aparținând inclusiv și în mare măsură lui Aristotel) și înlocuite cu altele, rezultate din observarea directă a naturii, proces care a dus la întemeierea științei moderne. Unii dintre cei mai importanți exponenți ai revoluției științifice au fost Nicolaus Copernic, Giordano Bruno, Galileo Galilei, Isaac Newton și René Descartes. În această perioadă, matematica cunoaște o dezvoltare remarcabilă; putem evidenția apariția calculului diferențial și integral (inventate practic în același timp de fizicianul englez Isaac Newton și matematicianul și filosoful german Gottfried Wilhelm Leibniz) și punerea la punct a calculului cu logaritmi zecimali și naturali de către scoțianul John Napier. Prin John Dalton pătrunde în chimie concepția atomistă și se formulează o serie de legi de către Dalton însuși și, printre alții, de Avogadro, Lavoisier, Charles și Gay-Lussac; de asemenea, sunt sintetizate o serie de acizi anorganici și substanțe organice. Galilei îndreaptă către cer o lunetă primitivă din Olanda (și descoperă fazele Lunii, sateliții lui Jupiter și inelele lui Saturn), Johannes Kepler formulează legile mișcării planetelor (1609-1619), iar Newton enunță legea atracției universale (1687); sunt studiate de către Christiaan Huygens fenomenele de interferență și difracție, au loc descoperiri importante în electricitate și magnetism.

În epoca de aur islamică (sec. VII-XVI d.H.) arta și știința au cunoscut o dezvoltare fără precedent. În domeniul științei, putem remarca inovațiile în domeniul opticii, inclusiv lucrarea (în șapte volume) *Cartea opticii*, scrisă de Ibn al-Haytham, care a pătruns în Occident și a avut o influență majoră asupra multor savanți europeni.

Fizica clasică s-a dezvoltat în timpul Revoluției Științifice și ulterior. Dintre realizările remarcabile ale perioadei amintim elaborarea modelului

¹ Din păcate, opera sa a fost în întregime pierdută, acesta fiind unul dintre tragicele evenimente petrecute ca urmare a prăbușirii civilizației antice.

² Democrit nu a fost capabil să calculeze dimensiunea atomilor, fapt complet explicabil ținând cont de nivelul de dezvoltare a matematicii acelor vremuri. Pe de altă parte, pare aproape complet inexplicabil de ce – peste mai mult de două mii de ani – un mare fizician și filosof cum a fost Ernst Mach declara public că nu crede în existența atomilor. Problema determinării prin calcul a dimensiunii atomilor a fost rezolvată în 1905 de către tânărul pe atunci Albert Einstein, într-un articol în care explica mișcarea browniană (unul dintre cele trei publicate în acel *annus mirabilis*, i.e., *an minunat*).

³ Academia a fost fondată de Platon în anul 387 î.H. În 129 î.H. s-a transformat într-o școală de filosofie eclectică, funcționând astfel până la închiderea sa în 529 d.H., eveniment care marchează formal sfârșitul filosofiei antice. Platon l-a avut ca profesor pe Socrate, iar ca student pe Aristotel.

heliocentric de către Copernic, însoțit de formularea legilor mișcării planetelor (Kepler), dezvoltarea astronomiei observaționale de către Galileo Galilei, formularea legii gravitației de către Isaac Newton, dezvoltarea mecanicii raționale (d'Alembert, Euler, Laplace), descoperirea principiilor și legilor termodinamicii (Carnot, Clausius, Helmholtz, Gibbs, Kelvin, Nernst), opticii (Snellius, Newton, Bartholin, Huygens, Young, Fresnel, Fraunhofer) și electromagnetismului (Coulomb, Ampère, Ohm, Kirchhoff, Faraday, Ørsted, Maxwell, Hertz).

Fizica clasică își are fundamentul filosofic în curentele raționaliste și empiriste care s-au impus pe scena filosofică europeană în secolele XVII-XVIII, până la marea sinteză criticistă a lui Kant. Primul savant care a utilizat intensiv matematica în demersul de descifrare a legilor naturii a fost Galilei. Descartes, prin dualismul ontologic, face o diferențiere netă între eul cunoscător (*res cogitans*) și obiectul cunoașterii (*res extensa*). Empiriștii vor susține ideea că nu sunt posibile noi achiziții în planul cunoașterii care să ocolească experiența. De asemenea, evenimentele și procesele se desfășoară în spațiul și timpul absolute ale lui Newton. Odată cu descoperirile aduse de știința secolului al XIX-lea, s-a formulat ideea că singurele interacțiuni elementare – considerate universale – erau cea gravitațională (descrisă de legea atracției universale) și cea electromagnetică (formalizată prin ecuațiile lui Maxwell). Întreaga știință clasică se baza pe următoarele presupuneri: substanța are o structură corpusculară (fiind alcătuită din atomi și molecule), mărimile fizice variază în mod continuu și lumina este o undă electromagnetică.

În perioada clasică, științele naturii în general și fizica în particular și-au articulat evoluția pe o serie de premise ontologice în care se regăsesc concepte ca realitate, cauzalitate, determinism și separabilitate. Acestea postulează existența unei realități fizice independente de observator, părțile sale fiind conectate spațial și temporal prin relații de cauzalitate și având o evoluție predictibilă.

Fizica modernă începe chiar în zorii secolului al XX-lea, în anul 1900, odată cu formularea de către Max Planck a ipotezei conform căreia absorbția și

emisia radiației electromagnetice de către oscilatorii microscopici au loc discontinuu, în porții de energie numite cuante. Ipoteza a fost formulată pentru a determina prin calcul distribuția energiei în spectrul radiației termice, deoarece termodinamica și teoria clasică a electromagnetismului eșuaseră fără drept de apel în tentativa de a oferi o soluție care să conducă la rezultate aflate în concordanță cu datele experimentale. Odată cu ipoteza lui Planck ia naștere teoria/fizica cuantică. De asemenea, teoria relativității a lui Einstein, formulată în două părți, în anii 1905 (relativitatea specială) și 1916 (relativitatea generală) este parte integrantă a fizicii moderne. Teoria cuantică și cea a relativității au apărut ca urmare a imposibilității fizicii clasice de a explica o serie de fenomene și rezultate experimentale.

În timp ce, în mare parte, teoria relativității este opera unui singur om (acesta fiind Albert Einstein), teoria cuantică a fost dezvoltată de un număr mare de contributory (dintre care putem aminti pe Niels Bohr, Arnold Sommerfeld, Werner Heisenberg, Pascual Jordan, Erwin Schrödinger, P.M.A. Dirac, Louis de Broglie, Max Born, Wolfgang Pauli, Enrico Fermi și Richard Feynman). Cea mai remarcabilă implicație a relativității generale a fost prezicerea găurilor negre. În legătură cu ele, conform lui Freeman Dyson, Einstein nu numai că a fost sceptic, dar era în mod activ împotriva ideii că acestea ar putea exista. Valoarea diferită de zero a constantei cosmologice¹, Λ , pe care Einstein a introdus-o în relativitatea generală pentru a menține un Univers static, este în concordanță cu observațiile actuale care indică o expansiune accelerată a Universului, fenomen care constituie un argument pentru existența energiei întunecate. De asemenea, Einstein a prevăzut existența undelor gravitaționale, puse în evidență în ultimii ani. Fizica cuantică a cunoscut și ea o dezvoltare spectaculoasă, concretizată în numeroase rezultate aplicabile (e.g., microscopul electronic, dioda tunel), cât și în diverse teorii (e.g., electrodinamica cuantică, cromodinamica cuantică, Modelul Standard al particulelor elementare).

Formalismul matematic al mecanicii cuantice, teoria măsurării dezvoltată în special de Heisenberg, precum și interpretarea probabilistă a funcției

¹ Einstein, făcând referire la constanta cosmologică pe care a introdus-o în ecuația relativității generale cu scopul de a menține un Univers static (în vremea în care marele savant a formulat această teorie, majoritatea savanților erau de părere că Universul are această caracteristică), spunea că a fost „cea mai mare gafă” pe care a făcut-o vreodată deoarece, în absența ei, ecuația sa ar fi prezis că acesta se dilată (sau se contractă). Astfel, Einstein ar fi putut să prezică expansiunea Universului înainte ca Edwin Hubble să o descopere.

de undă propusă de Max Born au dus la punerea la îndoială a unora dintre conceptele fundamentale care au stat la baza dezvoltării fizicii clasice, determinându-i pe unii dintre fizicieni să se întrebe dacă teoria cuantică descrie realitatea așa cum este ea, adică dacă este o teorie completă. Refuzând interpretarea probabilistă și încercând să înțeleagă în termenii fizicii clasice noua teorie, Albert Einstein a dezvoltat un punct de vedere cunoscut sub numele de realism ontologic, susținând că mecanica cuantică oferă numai o descriere incompletă a realității, care va putea fi completată ulterior prin intermediul utilizării unor variabile ascunse. Interpretarea lui Einstein – aflată în opoziție cu interpretarea standard a mecanicii cuantice, susținută în cadrul Școlii de la Copenhaga (reprezentată în principal de Niels Bohr, Werner Heisenberg și Wolfgang Pauli) – s-a dovedit ulterior a nu avea succes, în special după formularea inegalităților lui Bell și descoperirea corelării nonlocale și a inseparabilității particulelor (i.e., a proprietății cunoscute sub numele de *entanglement*).

Fizica clasică a evoluat atât de mult, încât spre sfârșitul secolului al XIX-lea oamenii de știință erau convinși că practic totul fusese descoperit, ceea ce însemna că viitorul nu putea aduce teorii fizice revoluționare. În schimb, tehnologia putea fi perfecționată din ce în ce mai mult, aducând schimbări remarcabile în economie și societate. Cu alte cuvinte, în fizică totul fusese descoperit, în schimb în tehnologie posibilitățile erau nelimitate.

Distrugerea acestei imagini aproape idilice asupra științei și tehnologiei avea să fie realizată sistematic prin intermediul unei serii de ipoteze și teorii, cele mai importante fiind ipoteza cuantelor a lui Planck și relativitatea specială a lui Einstein. Ipoteza lui Planck deschide drumul către întemeierea mecanicii cuantice, în care relațiile de nedeterminare ale lui Heisenberg au un rol central. Ele ne spun că la nivel microscopic nu este posibilă măsurarea simultană, cu o eroare oricât de mică, a două mărimi fizice conjugate, cum sunt poziția și impulsul (produsul erorilor de măsură va fi întotdeauna cel puțin egal

cu constanta lui Planck redusă, împărțită la doi). Cu alte cuvinte, microuniversul nu este accesibil măsurătorilor „perfecte” (care s-ar fi putut realiza odată cu dezvoltarea instrumentelor de măsură), această limitare principială fiind evidențiată în cadrul mecanicii cuantice.

În relativitatea specială a lui Einstein se demonstrează că vitezele egale cu (sau mai mari decât) viteza luminii nu pot fi atinse de niciun obiect (cu masă nenulă), deci nici de cele construite de om. Altfel spus, macrocosmosul nu ne este accesibil complet; putem spune adio călătoriilor la distanțe foarte mari efectuate pe durata vieții unui om (deși sunt teorii care afirmă că se pot efectua călătorii la distanțe foarte mari, pe durate scurte, prin așa-numitele „găuri de vierme”, dar acestea trebuie probate).

Astfel, mecanica cuantică și teoria relativității au reușit să distrugă imaginea de care aminteam mai devreme¹, întorcând-o, de fapt, pe dos: începând cu 1900, omul a aflat că în fizică încă pot avea loc revoluții (reprezentate de cele două teorii amintite, dar și de altele care vor fi elaborate ulterior), dar și că posibilitățile sale (manifestate prin intermediul tehnologiilor pe care le dezvoltă și bazate pe noile teorii) nu sunt nelimitate, nici în domeniul microcosmosului, nici în cel al macrocosmosului. Avansul cunoașterii ne arată limitele și, probabil, vulnerabilitățile noastre.

Aventura omului în lume poate avea ca elemente de reper uneltele prin intermediul cărora el a interacționat durabil cu natura. Această modalitate de interacțiune (i.e., mediată de unelte) a avut un dublu rol: în primul rând a eliminat prin „distanțare” față de obiectul de studiu subiectivismul inerent unui contact direct, nemijlocit între om și natură (permițând astfel descoperirea regularităților existente în interiorul acesteia și, ulterior, a legilor sale) și, în al doilea rând, a permis lărgirea în ambele sensuri a scalei la care ea se produce, atât în „jos” (în domeniul microcosmosului), cât și în „sus” (în domeniul macrocosmosului). Făurirea uneltelor s-a bazat în proporții destul de apropiate atât pe imaginație, cât și pe știință. Când spunem știință, ne referim în mare

¹ Același lucru îl putem afirma și despre matematică. În 1931, tânărul (pe atunci) matematician, logician și filosof Kurt Gödel (1906-1978), în lucrarea sa „Despre propozițiile indecidabile din *Principia Mathematica* și ale sistemelor înrudite între ele”, a dat peste cap lumea matematicii arătând limitările consistenței interne a metodei axiomatice, consacrată încă din vremea lui Euclid. Concret (în două teoreme de incompletitudine), Gödel a demonstrat că, dacă un sistem axiomatic este suficient de complex, atunci niciodată acesta nu va fi demonstrat ca fiind consistent și că va fi mereu incomplet.

măsură la fizică, dar nu excludem alte discipline (e.g., matematica¹). Lista uneltelor este lungă, dar ea începe fără îndoială – așa cum spuneam în prima parte a acestui text – cu toporul din silex și ajunge în zilele noastre la calculatorul cuantic și la roverul *Perseverance*, un adevărat laborator de astrobiologie robotică, trimis recent² de NASA pe planeta Marte cu misiunea de a căuta posibili microbi și de a colecta mostre de sol.

Cartea de față povestește (din punctul de vedere al fizicianului) o parte din aventura omului, desfășurată între anii 1900 și zilele noastre. Este perioada în care a luat naștere și s-a dezvoltat fizica modernă. În această lucrare este spusă povestea fizicii moderne. O poveste uimitoare, fără îndoială.

În carte sunt prezentate și analizate evenimentele, fenomenele și experimentele care au dus la formularea teoriei relativității și a teoriei cuantice, precum și unele părți ale acestor teorii. Parcurgând cartea îl vom vedea cu ochii minții pe Planck explicând (la ședința de Crăciun a Societății Germane de fizică din decembrie 1900) distribuția energiei în spectrul radiației termice emise de corpul negru pe baza propriei ipoteze a cuantelor, pe care atunci o considera ca fiind un artificiu matematic la care se va putea renunța mai târziu, părând astfel că încă nu înțelege prea bine că ideea lui constituie începutul unei noi ere în fizică și știință (era cuantică); vom încerca să înțelegem resorturile care au stat la baza hotărârii ilustrului fizician Hendrik Lorentz de a nu renunța la ipoteza eterului chiar și atunci când toate rezultatele experimentale îi arătau clar că ar trebui să o facă; îl vom admira pe Einstein care a înțeles la momentul potrivit (1905) că fizica nu va mai fi aceeași ca până atunci și că această știință urma să o ia pe un nou drum la începutul secolului al XX-lea în ceea ce privește înțelegerea noțiunilor de spațiu și timp, drum pe care chiar el îl va inaugura; vom privi cu simpatie încercarea marelui J.J. Thomson (fizicianul care a descoperit electronul în 1897) de a elabora primul model al atomului (este vorba de modelul pe care unii dintre contemporanii lui l-au numit – nu fără o anumită duioasă ironie – „cozonacul cu stafide”); vom contempla reușita lui Ernest Rutherford care, trăgând în atomi – ca un veritabil explorator al teritoriilor științei necălcate până atunci de om – cu „gloanțe” foarte rapide (este vorba, desigur, de particule alfa, adică de nucleu

de heliu) și analizând rezultatele experimentale, a înțeles că aceștia au o structură similară cu cea a sistemului planetar, introducând pentru prima oară în fizică noțiunea de nucleu atomic; vom construi împreună cu Niels Bohr primul model cuantic al atomului de hidrogen pe baza postulatelor pe care acesta le-a formulat și ne vom bucura că rezultatele experimentale l-au confirmat în întregime; vom încerca să înțelegem factorii care l-au determinat pe Louis de Broglie să renunțe la studiile de istorie pentru a deveni fizician și îl vom admira pentru dorința sa de a reda realității – prin ipoteza referitoare la natura ondulatorie a microparticulelor aflate în mișcare – o simetrie aparent pierdută odată cu descoperirea caracterului dual al radiației electromagnetice; îi vom aprecia pe Schrödinger și pe Heisenberg pentru elaborarea celor două forme ale mecanicii cuantice, ondulatorie și, respectiv, matricială, care – după cum a demonstrat primul dintre ei – sunt echivalente; vom privi cu admirație încercarea reușită a lui Max Born de a găsi o interpretare pentru funcția de undă care descrie evoluția sistemelor cuantice (este vorba de interpretarea probabilistă) și vom regreta zbaterea în van a lui Louis de Broglie de a teoretiza fantomatica undă-pilot în a cărei existență a crezut până la sfârșitul vieții; vom încerca să înțelegem poziția lui Einstein referitoare la mecanica cuantică, regretând că susținerea fără rezerve a idealului determinist care l-a călăuzit întreaga viață l-a împiedicat să o accepte; vom rămâne muți de uimire în fața frumuseții intrinseci a Modelului Standard al particulelor elementare (mulțumindu-i pentru acest dar lui Steven Weinberg) și îl vom admira pe Peter Higgs pentru puterea imensă de previziune (savantul a teoretizat existența bosonului scalar care îi poartă numele – bosonul conferă masă celorlalte particule, motiv pentru care a fost supra-denumit particula Dumnezeu – cu circa o jumătate de secol înainte ca acesta să fie descoperit la CERN, în 2012-2013); vom afla că fizicienii au pus în evidență în 2015-2016 undele gravitaționale, a căror existență a prevăzut-o însuși Einstein; vom înțelege că teleportarea nu a rămas un fenomen întâlnit numai în literatura și filmele SF, fiind realizată în practică de către fizicieni din mai multe țări; în sfârșit, ne vom bucura de progresele remarcabile înregistrate în domeniul calculatoarelor cuantice.

¹ Dacă – așa cum se afirmă – matematica este regina științelor, atunci fizica este poezia acestora.

² Racheta care a transportat roverul a plecat de pe Pământ în 30 iulie 2020; aceasta a amartizat pe 18 februarie 2021.

Am încercat să limităm utilizarea aparatului matematic la minimum necesar. Totuși, pentru prezentarea și analiza unor subiecte (e.g., principiile mecanicii cuantice, teleportarea cuantică, calculul cuantic) a fost necesar să facem apel la elemente de matematică superioară; precizăm că aceasta a fost utilizată numai atunci când nu s-a găsit o soluție alternativă.

Cartea este adresată atât persoanelor adulte, cât și adolescenților și tinerilor, inclusiv elevilor (14+) și studenților, care doresc să înțeleagă legile care guvernează natura, lumea înconjurătoare și universul în care trăim.

În lucrare s-au folosit abrevierile *e.g.* (în latină, *exempli gratia*) pentru *de exemplu* și *i.e.* (în latină, *id*

est) pentru *adică*, *altfel spus*, *cu alte cuvinte*, ambele utilizate ca atare în limba engleză și în limba română.

Subiectele prezentate sunt dezvoltate în câteva capitole sub forma unor răspunsuri oferite la întrebări formulate în titlurile acestora. Cartea include următoarele opt capitole: *Ce este lumina: undă sau corpuscul?*, *Poate fi depășită viteza luminii?*, *Particulele sunt unde?*, *Cât de complex este atomul?*, *Cum funcționează laserul?*, *Pisica lui Schrödinger este vie sau moartă?*, *Din ce este construită lumea?*, *Este posibilă teleportarea?*.

Așadar, să începem! A fost odată ca niciodată, că de n-ar fi nu s-ar povesti.

Traian Anghel

Pentru Elena, Cazimir, Erol, Radu și David

Albert Einstein – scurtă biografie



Albert Einstein

S-a născut la 14 martie 1889 în orașul Ulm (Baden-Württemberg, Germania), într-o familie de evrei nepracticanți, cu o stare materială bună. Tatăl său, Hermann Einstein, era comerciant, iar mama sa, Pauline (născută Koch), cânta la pian. Talentul și dragostea ei pentru muzică au fost moștenite de fiul ei, care va cânta la vioară.

Tânărul Albert a absolvit studiile medii la liceul Luitpold din München, oraș în care familia acestuia se mutase încă din 1880 și în care tatăl și bunicul său au deschis o mică fabrică de produse electrotehnice. Deși avea note foarte bune la matematică și la fizică, este respins la examenul de admitere la Universitatea Politehnică Elvețiană (ETH) din Zürich și din acest motiv se înscrie la ultima clasă a unui liceu elvețian la Aarau, care îi dă dreptul să intre fără examen la aceeași Politehnică din Zürich, la facultatea de Pedagogie, care pregătea cadre didactice în specialitatea fizică și matematică, pe care a absolvit-o în 1900. Cu toate că nu a frecventat cu asiduitate cursurile facultății (considera că profesorii nu erau la curent cu noile descoperiri din știință), în acei ani a citit

lucrări scrise de marii savanți ai epocii (Helmholtz, Maxwell, Mach etc).

În 1901 primește cetățenia elvețiană. Negăsind un post în învățământ, se angajează ca referent la Biroul federal de brevete din Berna. În anii în care a lucrat aici a găsit timpul necesar pentru a citi reviste științifice și a medita la problemele curente ale fizicii. În anul 1905 devine PhD (doctor în filozofie), după susținerea tezei de doctorat cu subiectul „O nouă determinare a dimensiunilor moleculelor”, lucrare care i-a fost publicată în același an în revista germană *Annalen der Physik*.

Tot în 1905 va publica în aceeași revistă științifică trei articole care vor stârni interesul oamenilor de știință ai epocii (printre care se aflau Plank, Lorentz și fostul său profesor de matematică, H. Minkowski): unul în care explică mișcarea browniană, altul în care explică efectul fotoelectric și legile acestuia pe baza teoriei cuantelor a lui Planck și al treilea (care îl va face faimos) în care formulează Teoria Relativității Restrânse. Devenit repede cunoscut, este invitat să țină prelegeri la universități din întreaga lume și să participe la congrese în care se dezbăteau două teme revoluționare, de larg interes în acele vremuri: teoria cuantelor și teoria relativității (a se vedea figura 2.9, caseta *Conferința Solvay* și subsecțiunea *A 5-a Conferință Solvay – participanți*).



Figura 2.9 Fotografie de grup – a 5-a Conferință Solvay (1927) (probabil cea mai inteligentă fotografie făcută vreodată)

CONFERINȚA SOLVAY

Una dintre întrunirile periodice la care Einstein și-a expus punctele de vedere în legătură cu noile teorii din fizică a fost Conferința Solvay. Aceasta a fost fondată în 1912 de industriașul belgian Ernest Solvay, ca un for dedicat dezbaterii problemelor deschise, fundamentale, ale epocii, din fizică și din chimie. Fondarea seriei de conferințe Solvay a fost considerat un punct de cotitură în lumea fizicii. Cea mai faimoasă conferință a fost cea de-a cincea, desfășurată în octombrie 1927, în care s-au dezbătut probleme referitoare la electroni, fotoni și noua teorie cuantică. Deși la conferință au luat parte cele mai proeminente personalități din fizică (dintre cei 29 de participanți, 17 erau deja sau urmau să fie laureați ai Premiului Nobel, printre care și Marie Curie, care a obținut Premiul Nobel atât pentru Chimie, cât și pentru Fizică), figurile principale ale conferinței au fost Niels Bohr și Albert Einstein. Dezamăgit de acceptarea largă de către comunitatea științifică a principiului de incertitudine al lui Heisenberg, Einstein a rostit cunoscuta aserțiune „Dumnezeu nu joacă zaruri”, la care Bohr i-a răspuns „Einstein, nu-i mai spune lui Dumnezeu ce să facă”.

În 1908, Einstein devine privat-docent la Universitatea din Berna, apoi profesor extraordinar la Zürich, profesor de fizică teoretică la Universitatea din Praga (1911-1912), iar în 1914 acceptă funcția de director al Institutului de fizică „Kaiser Wilhelm” din Berlin (înființat în 1911 și desființat în 1946 din ordinul guvernării americane în Germania de Vest, după încheierea celui de-al doilea război mondial; funcțiile sale au fost reluate în 1948 de Societatea Max Planck). Totodată, Einstein este profesor la Universitatea din Berlin¹. Devine cetățean german în același an și rămâne la Berlin până în 1933, când părăsește

Germania din cauza politicii antisemite promovate de Hitler, ajungând în SUA, unde obține cetățenia în 1940. În 1921 devine membru străin al Royal Society.

S-a căsătorit în 1903 cu Mileva Marić, o colegă sârboaică de la ETH (singura femeie din Politehnică, studentă la matematică), cu care a avut doi fii și o fiică. A divorțat în 1919 și s-a recăsătorit în același an cu verișoara lui, Else Einstein, decedată în 1936. A murit la 18 aprilie 1955 la Princeton, New Jersey, SUA, la vârsta de 76 de ani.

În 1939 a adresat o scrisoare președintelui american Roosevelt, în care i-a cerut să sprijine programul

DURATA PROIECTELOR

Durata proiectelor științifice poate fi mai mare sau mai mică, în funcție de diverși factori, inclusiv de importanța lor și de finanțarea obținută. Atunci când importanța este națională sau mondială, guvernele și companiile alocă sume uriașe, iar proiectele sunt duse la bun sfârșit pe durate rezonabile. Cele mai bune exemple în acest sens sunt proiectele Manhattan (6 ani), Apollo (10 ani) și cel în care a fost dezvoltat vaccinul împotriva virusului SARS-CoV-2 de către companiile Pfizer și BioNTech (circa 10 luni, în cursul anului 2020; trebuie precizat totuși că acest vaccin, precum și cele dezvoltate de Moderna și CureVac, se bazează pe tehnologia ARN mesager dezvoltată în ultimii 15 ani).

PROIECTUL MANHATTAN

Denumit Proiectul Manhattan, sprijinit de Statele Unite, Marea Britanie și Canada și desfășurat în instalații și laboratoare din deșertul american Los Alamos, programul prin care s-a urmărit crearea bombei atomice a fost unul dintre cele mai vaste și ambițioase proiecte științifice din istorie, la care au participat numeroși fizicieni cunoscuți ai vremii, mulți dintre ei fiind de origine europeană. Cercetarea științifică a fost condusă de fizicianul american J. Robert Oppenheimer. Programul a fost încununat de succes, rezultând trei bombe atomice, detonate în 1945 (una de test, într-un poligon din statul american New Mexico și două deasupra Japoniei, una pe 6 august 1945 deasupra orașului Hiroshima, alta pe 9 august deasupra orașului Nagasaki).

¹ Ambele funcții, de director al Institutului „Kaiser Wilhelm” și de profesor la Universitatea din Berlin au fost obținute la recomandarea lui Max Planck.

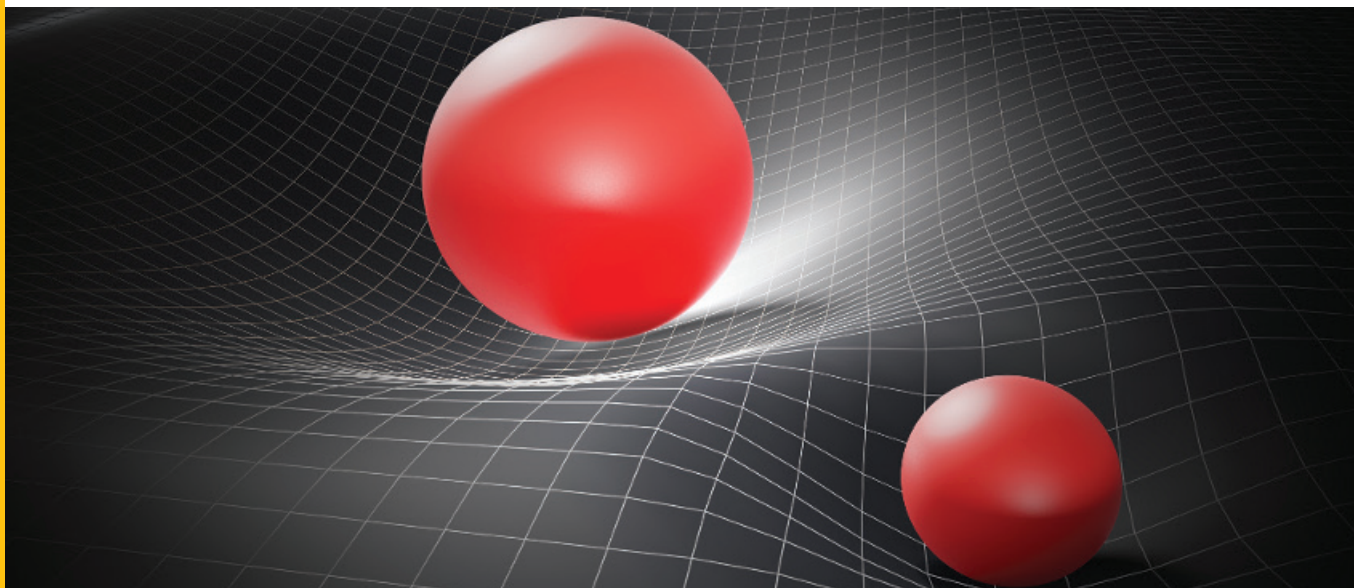


Figura 2.10 Ilustrarea conceptuală a relativității generale

de cercetări nucleare pentru obținerea reacției în lanț, care să ducă la crearea primei arme nucleare (cunoscută sub denumirea populară de bomba atomică), drept răspuns la pericolul în creștere reprezentat de Germania nazistă și născut din temerile oamenilor de știință că naziștii își propuseseră încă din anii 30 să creeze bomba atomică (a se vedea casetele *Proiectul Manhattan* și *Durata proiectelor*). Einstein nu a participat în mod activ la crearea armei nucleare. Pe măsura trecerii timpului, savantul a devenit conștient de pericolul uriaș reprezentat pentru omenire de arma nucleară și în 1945 s-a adresat din nou lui Roosevelt, de această dată pentru a-l convinge să renunțe la programul de dezvoltare a acestei arme; însă era prea târziu, răul fusese făcut. În 1946, Einstein a devenit președintele Comitetului de vigilență al savanților atomiști, militând până la moartea sa împotriva proliferării armelor nucleare.

A obținut Premiul Nobel pentru Fizică în 1921, pentru explicarea efectului fotoelectric extern și

a legilor acestuia pe baza teoriei cuantelor a lui Planck, dar nu și pentru elaborarea Teoriei Relativității Restrânse, care – deși l-a făcut celebru – în acea vreme era controversată încă.

În 1916 a elaborat Teoria Relativității Generalizate, în care introduce ideea că spațiul fizic este curb, acestuia aplicându-i-se geometria riemanniană. Prima confirmare experimentală a noii teorii este obținută de A. Eddington, care în 1919, în timpul unei eclipse solare, arată curbarea razelor de lumină în apropierea Soarelui, prevăzută de Einstein.

În anii 1924-1925 a creat, împreună cu fizicianul indian Satyendra Nath Bose (1894-1974), așa numita statistică Bose-Einstein aplicabilă particulelor elementare cu spin întreg (denumite bosoni; e.g., fotonii, mezonii, gravitonii).

În ultima parte a vieții, a lucrat la o teorie unitară a câmpului, care să înglobeze electromagnetismul și gravitația, dar eforturile sale nu au fost încununete de succes.

A 5-a conferință Solvay – participanți

În această subsecțiune sunt enumerați participanții la cea de a 5-a Conferință Solvay (a se vedea și caseta *Conferința Solvay*), în ordinea în care apar în fotografia inclusă în figura 2.9.

În spate (de la stânga): Auguste Piccard, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Édouard Herzen, Théophile de Donder, Erwin Schrödinger, J. E. Verschaffelt, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Ralph Fowler, Léon Brillouin.

În mijloc (de la stânga): Peter Debye, Martin Knudsen, William Lawrence Bragg, Hendrik Anthony Kramers, Paul Dirac, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr.

În față (de la stânga): Irving Langmuir, Max Planck, Marie Curie, Hendrik Lorentz, Albert Einstein, Paul Langevin, Charles-Eugène Guye, C. T. R. Wilson, Owen Richardson.

3.3. Microscopul electronic

Una dintre cele mai importante aplicații în care se utilizează natura ondulatorie a electronilor este microscopul electronic (figura 3.4). Acesta este un dispozitiv similar cu microscopul optic, dar care furnizează imagini mult mărite ale obiectelor examinate. Astfel, în timp ce un microscop optic asigură mărită de până la șase mii de ori, cel electronic furnizează imagini de milioane de ori mai mari decât obiectul.



Figura 3.4 Cercetător care utilizează un microscop electronic

Microscopul optic

Microscopul¹ a fost inventat în jurul anului 1600 și perfecționat ulterior, cu scopul de a oferi posibilitatea obținerii unor imagini mult mărite ale obiectelor examinate. Acesta este un instrument optic format din două sisteme convergente de lentile² (figura 3.5), unul denumit obiectiv (îndreptat către obiectul examinat; a

se vedea caseta *Obiectivul*) și altul ocular (îndreptat către ochiul observatorului; a se vedea caseta *Ocularul*). Obiectivul furnizează o imagine reală și mărită a obiectului examinat, aceasta devenind la rândul ei obiect pentru ocular, care oferă o imagine finală virtuală, mult mărită. Cel mai răspândit microscop optic

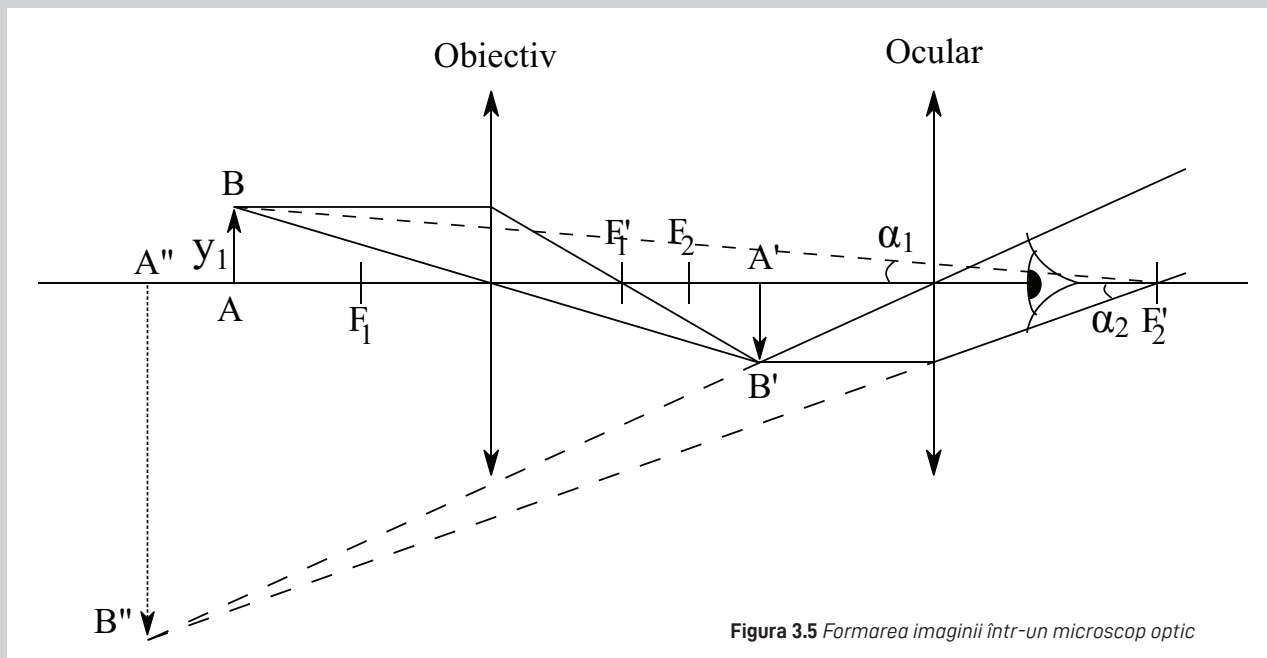


Figura 3.5 Formarea imaginii într-un microscop optic

¹ Cuvântul este format din termenii grecești *mikrós* (mic) și *skopein* (a se uita la). Inventarea numelui acestui dispozitiv este atribuită lui Giovanni Faber (1625), care l-a folosit pentru a denumi microscopul compus prezentat de Galileo Galilei la Accademia del Lincei (1624), pe care acesta din urmă îl botezase *occholino* (i.e., *ochiul mic*).

² Există și un așa-numit *microscop simplu*, alcătuit dintr-o singură lentilă convergentă (sau un singur set/sistem de lentile convergente), care furnizează o imagine virtuală, mărită, a obiectului. Microscopul analizat în lucrare este cel compus din două lentile/seturi de lentile, denumite obiectiv și ocular.

OBIECTIVUL

Este un sistem optic convergent, format în general din mai multe lentile. Este plasat în apropierea obiectului examinat, la o distanță puțin mai mare decât distanța sa focală. În mod obișnuit, microscopul este prevăzut cu mai multe obiective prinse într-o montură care se poate roti. Oferă mărituri de până la 100.

OCULARUL

Este un sistem optic convergent care se comportă ca o lupă, având rolul de a furniza o imagine virtuală mult mărită a imaginii intermediare dată de obiectiv. Oferă mărituri de până la 20 x. Unele microscopul sunt prevăzute cu mai multe oculare care se pot schimba. Microscopul moderne au două oculare pentru a permite observarea binoculară.

este cel cu lumină artificială, în care obiectul examinat este puternic iluminat.

Există numeroase tipuri de microscopul optice. Iată câteva dintre acestea (nu vom intra în detalii): microscopul cu lumină polarizată, microscopul cu contrast de fază, microscopul de contrast prin interferență, microscopul confocal cu laser.

Una dintre cele mai importante caracteristici ale unui microscop este *rezoluția* sau *puterea separatoare*, care ilustrează capacitatea lui de a pune în evidență detalii fine ale obiectului examinat. Această caracteristică se măsoară prin intermediul distanței minime dintre două puncte care, privite prin microscop, apar încă distincte; în mod obișnuit se exprimă în micrometri: $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$. Se stabilește că această distanță are expresia următoare:

$$\varepsilon = \frac{1,22\lambda}{2n \sin u}$$

unde λ este lungimea de undă a radiației folosite, n este indicele de refracție al mediului străbătut de radiație între obiectul examinat și obiectivul microscopului, iar u este unghiul dintre axa optică și razele cele mai îndepărtate de axă care pătrund în obiectiv (numit *unghi de apertură*). Pentru ca ε să fie cât mai mică, trebuie micșorată lungimea de undă sau mărite n și u . Pentru a crește indicele de refracție se utilizează observarea prin imersie, care constă în așezarea între

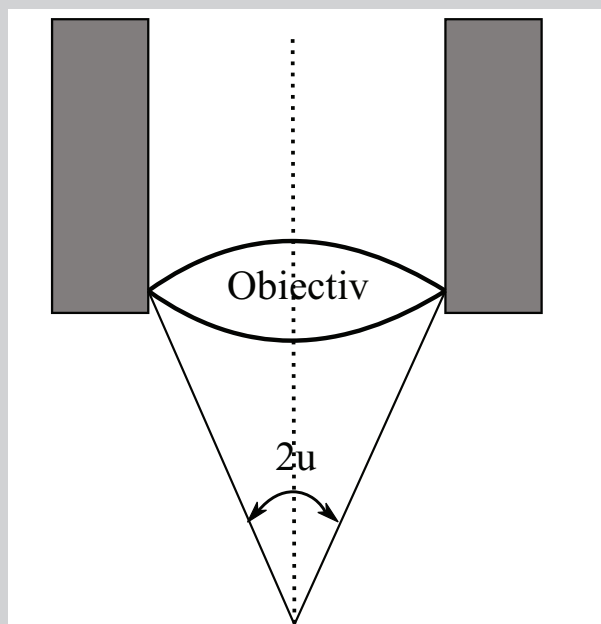


Figura 3.6 Unghi de apertură

obiect și obiectiv a unei picături de lichid (de obicei ulei de cedru, cu $n = 1,515$). Evident, este util să se folosească obiective cu deschidere mare, astfel încât $\sin u$ să fie mare (totuși, aceste obiective pun probleme de construcție din cauza aberațiilor de sfericitate pronunțate); cele mai mari unghiuri de apertură realizate sunt de circa 60° (figura 3.6). O altă mărime utilizată pentru caracterizarea microscopului este *puterea de mărire*, care exprimă raportul dintre dimensiunea imaginii și cea a obiectului examinat; se exprimă sub forma unui număr întreg urmat de caracterul \times ; e.g. $400 \times$ (i.e., mărire de 400 de ori).

Microscopul cu performanțe scăzute pot mări de circa 3-400 de ori; ele reușesc să pună în evidență bacteriile (rezolvând distanțe până la $1 \mu\text{m}$, adică a milioana parte dintr-un metru), iar cele cu performanțe ridicate, de circa 2000 de ori (a se vedea și caseta *Iluminare*).

ILUMINARE

Pentru a fi observat, obiectul examinat (numit și *eșantion* sau *specimen*) trebuie iluminat. Acest lucru se poate realiza în mai multe moduri. Astfel, dacă obiectul este transparent, el va fi iluminat de dedesubt. În schimb, dacă este solid trebuie iluminat din lateral. De asemenea, lumina polarizată este utilizată pentru a determina orientarea cristalelor metalice.



Figura 3.7 Microscop cu cameră folosit în stomatologie

O altă mărime prin intermediul căreia se caracterizează microscopul este *puterea optică*, aceasta determinându-se cu ajutorul relației următoare:

$$P = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{y_1} \cong \frac{e}{f_{ob} f_{oc}}$$

în care α_2 este unghiul sub care se vede imaginea prin microscop, y_1 este dimensiunea obiectului, f_{ob} și f_{oc} sunt distanțele focale ale obiectivului și, respectiv, ocularului, iar e este intervalul optic (distanța dintre focarul imagine al obiectivului și focarul obiect al ocularului, F'_1 și F_2 în figura 3.5). Încă o mărime folosită pentru caracterizarea microscopului este *grosimentul*, determinat prin relația:

$$G = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1} = P \cdot \delta,$$

în care δ este distanța minimă de vedere clară (care – pentru un ochi normal – este de 25 cm) și α_1 este unghiul sub care se vede obiectul cu ochiul liber.

Imaginile de interes ridicat pot fi fotografiate printr-un microscop, tehnică denumită *fotomicrografie*.

În secolele XIX-XX această tehnică utiliza filmul fotografic, dar în secolul al XXI-lea se folosește pe scară largă imagistica digitală (în figura 3.7 este prezentat un microscop binocular cu cameră digitală încorporată, folosit în stomatologie, în chirurgia cavității bucale). Unele microscopice digitale nu mai folosesc oculare, oferind imagini direct pe ecranul calculatorului. În felul acesta sunt reduse costurile, microscopul digital optic devenind un bun accesibil multor categorii de persoane interesate de studiul microcosmosului apropiat.

Dacă în formula distanței minime se pun valorile extreme $\nu = 60^\circ$, $\lambda = 400 \text{ nm}$ și $n = 1,515$, se obține pentru distanța minimă dintre două puncte care mai pot fi văzute distinct valoarea cea mai mică, egală cu $0,20 \mu\text{m}$ (în acest caz, mărirea este de circa 2000 de ori). Dacă se utilizează lumină ultravioletă și se înregistrează imaginea pe placă fotografică¹, se pot distinge cu microscopul optic detalii de $0,15 \mu\text{m}$ (cu mărire de circa 6000 de ori).

¹ Dacă se utilizează radiații ultraviolete, sunt necesare lentile realizate din cuarț sau fluorină, materiale transparente la radiații din acest domeniu. Astfel, s-au construit microscopice în ultraviolet care utilizează radiații cu lungimea de undă de 200 nm (i.e., 2000 de ångstromi). Realizarea componentelor optice care să permită trecerea unor radiații cu lungimi de undă și mai mici (i.e., X și gamma) a întâmpinat dificultăți majore, acesta fiind motivul care nu a permis construirea unor microscopice de acest tip.

Scurt istoric



Ernst Ruska

domeniul lungimilor de undă mici.

O idee revoluționară s-a născut în mintea inginerilor după ce în 1926 Busch¹ a demonstrat teoretic și experimental că un fascicul de electroni poate fi focalizat în câmpuri electrice și magnetice convenabile. Bazându-se și pe ipoteza referitoare la natura ondulatorie a microparticulelor a lui Louis de Broglie, confirmată experimental în 1927 de americanii Davisson și Germer și britanicul G. P. Thomson, oamenii de știință germani Ernst Ruska² și Max Knoll³ au construit încă din 1931 primul microscop electronic. Acesta asigură măririi de până la 400 de ori, dar nu era potrivit pentru utilizarea în practică. Tot în 1931, Reinhold Rüdtenberg (1883-1961), directorul de cercetări al companiei Siemens, a patentat microscopul electronic (a se vedea caseta *Lentile speciale*). Totuși, aceste microscopice erau net inferioare

După cum am văzut, micșorarea lungimii de undă a radiațiilor utilizate oferă posibilitatea obținerii unor rezoluții cât mai bune. Totuși, soluția nu poate fi pusă în practică deoarece nu pot fi realizate materiale din care să se obțină componentele optice (lentilele obiectiv și ocular) transparente în do-

celor optice în ceea ce privește puterea separatoare. În 1936, Driest și Müller au îmbunătățit soluția lui Ruska, inventând un microscop electronic cu performanțe similare cu ale celor mai bune microscopice optice.

În 1937, Manfred von Ardenne (1907-1997) a inventat microscopul cu scanare, cu putere de rezoluție ridicată.

În 1938, la Universitatea din Toronto, Eli Franklin Burton și trei studenți ai săi au dezvoltat primul microscop cu utilizare practică. În 1939, Siemens a început dezvoltarea comercială a unui microscop cu transmisie, la care au lucrat, începând cu anul 1937, Ernst Ruska și Bodo von Borries, finanțați de companie.

Ulterior, în mai multe țări au fost dezvoltate microscopice electronice cu performanțe din ce în ce mai bune. Instrumentele moderne se bazează pe prototipul lui Ruska, asigurând măririi de până la cincizeci de milioane de ori a obiectelor examinate.

LENTILE SPECIALE

Pentru devierea fascicului de electroni într-un microscop electronic sunt utilizate câmpuri electrice și magnetice, acestea având rolul de lentile electrostatice și lentile magnetice.

Tipuri de microscopice electronice

Puterea de creație și inovare a omului s-a manifestat și în domeniul microscopiei electronice, de-a lungul timpului fiind construite câteva tipuri de microscopice optice, enumerate și analizate pe scurt în continuare.

► Microscop electronic cu transmisie

Microscopul electronic cu transmisie⁴ (MET) constituie versiunea originală a microscopului electronic, dezvoltată începând cu prototipul lui Ernst Ruska. Folosește un fascicul de electroni emis de un

¹ Hans Walter Hugo Busch (1884-1973) a fost un fizician german, pionier al opticii electronice. A pus bazele teoretice ale microscopului electronic.

² Ernst August Friedrich Ruska (1906-1988) a fost un fizician și inginer german. A primit Premiul Nobel pentru Fizică în 1986 pentru lucrările sale fundamentale în optica electronică și pentru construirea primului microscop electronic. Alături de el au mai fost premiați fizicianul german Gerd Binnig și fizicianul elvețian Heinrich Rohrer, pentru proiectarea microscopului electronic cu scalare și tunelare.

³ Max Knoll (1897-1969) a fost un inginer electrician german și liderul grupului de cercetare de la Institutul pentru Tensiuni Înalte din cadrul Universității Tehnice din Berlin care a dezvoltat microscopul electronic, avându-l în echipă și pe Ernst Ruska.

⁴ Transmission electron microscope (TEM), în limba engleză.

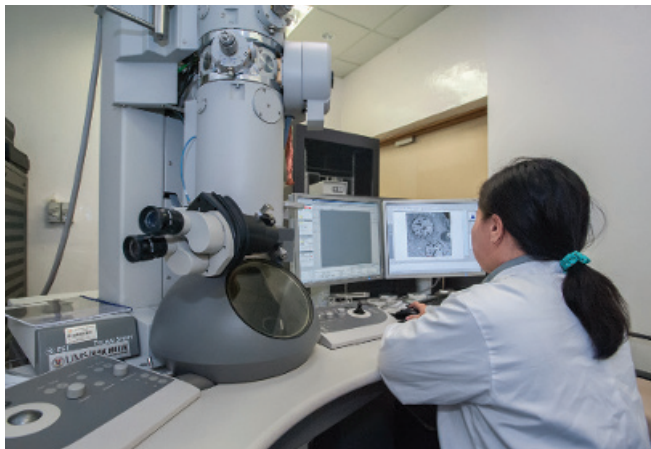


Figura 3.8 Microscop electronic cu transmisie

catod de tungsten (denumit și wolfram), focalizat de lentilele electromagnetice.

Fasciculul de electroni străbate obiectul observat (care este parțial transparent), și transportă informație despre structura internă a acestuia (imaginea), ajungând apoi la sistemul de formare a imaginii (lentilele electromagnetice). Imaginea mărită astfel obținută este înregistrată folosind o placă fotografică, un ecran fluorescent sau un detector de lumină, e.g., un senzor CCD¹. În ultimul caz, imaginea poate fi afișată în timp real pe un monitor sau transmisă unui sistem de calcul (figura 3.8). Acest tip de microscop are ca problemă principală aberația de sfericitate, care a putut fi depășită în bună măsură cu sisteme de corecție, ducând la creșterea puterii de rezoluție.

Detaliind, în principiu un astfel de microscop are trei părți principale:

1. un tun electronic, care produce un fascicul de electroni și un condensator care focalizează fasciculul asupra specimenului examinat;

2. un sistem de producere a imaginii, format din lentilă obiectiv, treapta mobilă a probei și lentilele intermediară și proiector, care focalizează electronii care trec prin specimen pentru a forma o imagine reală, foarte mărită;

3. sistemul de înregistrare a imaginii, care convertește imaginea electronică într-o formă accesibilă ochiului uman. Acest sistem constă, în mod obișnuit, dintr-un ecran fluorescent, pentru vizualizarea imaginii, și o cameră digitală, pentru înregistrarea acesteia.

¹ Un senzor CCD (Charge-Coupled Device) este un circuit integrat care conține o serie de condensatori cuplați. Este una dintre cele mai bune tehnologii utilizate în imagistica digitală. Pixelii sunt reprezentați de condensatori de tip MOS (metal-oxid-semiconductor).

² Scanning electron microscope (SEM), în limba engleză.

Alături de cele trei componente principale este utilizat un sistem pentru asigurarea vidului, format din pompe, manometre și supape.

Folosind un microscop MET, au putut fi puși în evidență atomii de carbon în cristalul de diamant, situați la distanța de 89 pm (0,89 ångstromi) unul de altul, precum și atomii de siliciu (distanța cu 78 pm sau 0,78 ångstromi), acesta asigurând o mărire de 50 de milioane de ori. Deoarece poate pune în evidență structura atomică a corpurilor, microscopul electronic cu transmisie este utilizat pentru cercetare și dezvoltare în domeniul nanotehnologiei.

În figura 3.9 este prezentată o micrografie obținută cu un microscop electronic cu transmisie, în care poate fi vizualizată suprafața diamantului. Se observă că este rezolvată distanța de 0,1 nm (i.e., 100 pm).

► Microscop electronic cu scanare

Spre deosebire de MET, în microscopul electronic cu scanare² (MES) imaginile sunt produse prin detecția electronilor secundari emiși de pe suprafața specimenului examinat ca urmare a excitării acestuia de către fluxul principal de electroni. Acesta din urmă este utilizat ca o sondă electronică pentru scanarea periodică a suprafeței specimenului. Sursa de electroni și lentilele electromagnetice sunt similare cu cele folosite de MET.

Rezoluția acestui tip de microscop electronic este cu un ordin de mărime mai bună decât cea a MET. În plus, ținând cont de natura proceselor implicate în funcționare (de suprafață și nu transmisie), MES are o adâncime de penetrare mare și poate

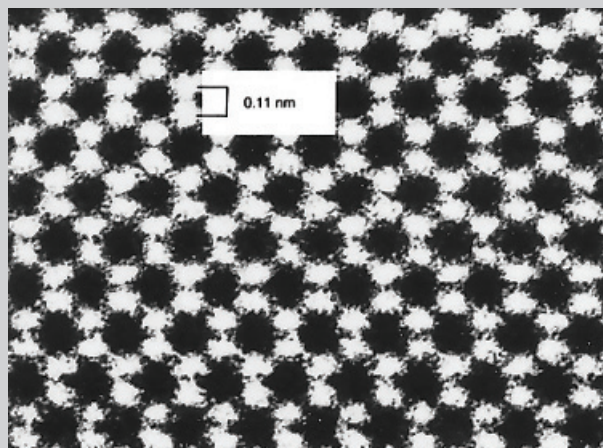


Figura 3.9 Micrografie MET; credit Britannica.com



Figura 3.10 Micrografie MES; credit Britannica.com

furniza imagini tridimensionale ale specimenului examinat. În figura 3.10 este prezentată o micrografie

Deosebiri între microscopul optic și cel electronic

La prima vedere, microscopul optic și cel electronic sunt foarte asemănătoare, singura deosebire dintre ele fiind că primul folosește un fascicul de lumină, iar cel de-al doilea un fascicul de electroni. În realitate, cele două tipuri de microscop sunt destul de diferite. În secțiunea de față vom analiza trei caracteristici care le deosebesc.

Spre deosebire de microscopul optic (aflat de obicei în aer), este necesar ca în microscopul electronic fasciculul de electroni să se propage în vid (în caz contrar, electronii ar interacționa cu moleculele de aer și nu s-ar mai deplasa pe traiectoria stabilită de proiectanți). Din acest motiv, aerul din coloana microscopului este evacuat prin utilizarea unui sistem de pompe, iar speciemenele examinate sunt introduse în vid.

obținută cu un microscop electronic cu scanare în care pot fi vizualizate ouăle fluturelui de varză european (*Pieris rapae*).

► Microscop electronic cu scanare și transmisie

Microscopul electronic cu scanare și transmisie¹ (MEST) îmbină caracteristicile celor două tipuri de microscop prezentate succint anterior. Ca rezultat, se pot pune în practică o gamă largă de tehnici de analiză imposibil de obținut cu microscopul MET și MES luate separat.

De asemenea, au fost construite microscopul protonic și ionic (acestea utilizează fascicule de protoni și, respectiv, de ioni), care permit obținerea unor mărimi de 10-15 ori mai bune decât cea oferită de microscopul electronic. Folosindu-le, s-au obținut fotografii clare ale atomilor situați în rețeaua cristalină.

În microscopul optic distanța dintre obiectiv și ocular este fixă, modificându-se numai distanța dintre obiectiv și speciemenul examinat. În schimb, microscopul electronic are lentile cu focalizare variabilă, distanțele dintre speciemen și obiectiv, precum și dintre ocular și obiectiv, rămânând fixe.

Microscopul optic este operat astfel încât imaginea pe care o furnizează să fie virtuală (acest tip de imagine este reprezentat formal cu ajutorul unei linii întrerupte, după cum se vede în figura 3.5 – imaginea A''B''), în timp ce microscopul electronic furnizează invariabil o imagine reală a obiectului examinat (deoarece numai acest tip de imagine poate fi „prinsă” pe un suport – ecran fluorescent sau placă fotografică – sau prin intermediul unui sistem de imagistică digitală, cum se procedează în laboratoarele moderne).

¹ Scanning transmission electron microscope (STEM), în limba engleză.

Proprietățile radiației laser

Radiația laser are patru proprietăți foarte importante, prin care se distinge de radiația electromagnetică emisă în alte moduri. Acestea sunt: direcționalitate, monocromaticitate, coerență și intensitate foarte mare.

Direcționalitatea fasciculului laser are drept cauză acțiunea rezonatorului. Pentru a înțelege despre ce este vorba, să ne referim la cazul particular al rezonatorului alcătuit din două oglinzi paralele, una total și alta parțial reflectătoare. Fasciculul laser care părăsește dispozitivul va fi orientat perpendicular pe cele două oglinzi, de-a lungul axei acestuia. Fotonii emiși pe alte direcții vor fi reflectați la unghiuri diverse și vor părăsi laserul, nefiind incluși în fasciculul principal. Un alt mod de a spune că radiația laser are drept caracteristică direcționalitatea constă în utilizarea termenului de *radiație colimată*, care înseamnă că fasciculul de lumină este foarte subțire și paralel. Această caracteristică a fasciculului laser îl face foarte periculos, dar și extrem de util. Un fascicul laser nu trebuie privit niciodată direct, deoarece se poate concentra pe un punct al retinei, producându-i leziuni practic instantaneu. Pe de altă parte, gradul înalt de colimare al fasciculului laser îl face util în aplicațiile medicale și industriale.

Radiația laser este *practic* monocromatică, deoarece toți fotonii care o alcătuiesc sunt emiși în urma dezexcitării aceluiasi nivel metastabil pe nivelul fundamental, având astfel o singură frecvență (sau lungime de undă). Lumina laser este practic cea mai pură lumină disponibilă pentru om. Totuși, trebuie să precizăm că lumina emisă de un laser nu este *exact* monocromatică, deoarece linia spectrală

din care provine are o lățime finită, care chiar dacă s-ar datora numai efectului Doppler cauzat de mișcarea atomilor sau moleculele din care provine ar fi diferită de zero. În plus, deoarece lungimea de undă a luminii este extrem de mică în comparație cu dimensiunile cavităților rezonante utilizate (e.g., distanța dintre cele două oglinzi ale unui rezonator Fabry-Pérot), în lățimea de bandă a radiației laser sunt incluse mai multe moduri de oscilație ale cavității (chiar dacă lățimea este mică).

Coerența este una dintre caracteristicile unice ale luminii provenite din sursele laser. Radiația emisă prin efect laser este în fază cu cea care provoacă emisia sa, acesta fiind motivul pentru care radiația laser este coerentă. Proprietatea este descrisă în termeni de coerență spațială și coerență temporală, ambele fiind importante în aplicațiile radiației laser (e.g., producerea hologramelor). Lumina emisă de sursele obișnuite nu este coerentă, deoarece provine de la atomi independenți, care se dezexcită aleator. Desigur, există un anumit grad de coerență în unele surse spectrale monocromatice, dar aceasta nu se apropie de cea a unui laser.

Deoarece un număr mare de sisteme cuantice (atomi sau molecule) se dezexcită într-un timp foarte scurt (egal cu timpul mediu de viață al stării excitate metastabile) și suprafața pe care fasciculul laser este distribuit este foarte mică, intensitatea acestuia va fi foarte mare¹ (mult mai mare decât intensitatea unui fascicul luminos produs de o sursă convențională). Această caracteristică face ca fasciculul laser să fie utilizat în medicină ca bisturiu și în industrie ca instrument de tăiere rapid, puternic și controlabil prin computer.

Aplicațiile radiației laser

Laserul este utilizat într-un număr foarte mare de domenii, facilitând o serie de operațiuni care, în absența acestuia, s-ar fi desfășurat extrem de greu sau chiar ar fi fost imposibil de efectuat.

În medicină, laserul este folosit de cele mai multe ori ca bisturiu optic. Raza laser, introdusă

prin pupilă, este utilizată pentru „sudarea” retinei desprinse de globul ocular sau pentru corectarea defectelor de vedere (în acest ultim caz, metoda folosită poartă numele de *sculptarea corneei*; tipul de laser utilizat depinde de natura defectului și de grosimea corneei; figura 5.11).

¹ Laserul ELI-NP (Extreme Light Infrastructure – Nuclear Physics) de la Măgurele (România) furnizează o intensitate de 10^{24} W/cm².



Figura 5.11 Laserul este utilizat pentru corectarea efectelor de vedere

De asemenea, folosind drept bisturiu raza laser, se pot efectua o serie de intervenții chirurgicale, acestea fiind mai puțin traumatizante pentru țesutul viu, asigurând astfel o recuperare rapidă. Laserul este utilizat și în intervențiile stomatologice, într-o multitudine de scopuri: obturații dentare, reconturarea gingiei, albire dentară, regenerarea nervilor, îndepărtarea tumorilor benigne, tratamentul aftelor bucale etc.

Laserul este folosit în ingineria genetică (pentru tăierea și combinarea fragmentelor de gene, molecule etc), precum și în domeniul nanotehnologiei¹.

Utilizarea laserilor a produs o adevărată revoluție în domeniul telecomunicațiilor și al stocării informației. Deoarece lungimea de undă a luminii laser este de zeci de mii de ori mai scurtă decât a undelor radio, este posibil ca, folosind ca undă purtătoare radiația laser, să se transmită cantități foarte mari de informații. În acest scop, se utilizează ca mediu de transmisie fibrele optice (prin reflexii totale succesive pe

peretele fibrei, lumina poate fi transmisă, fără pierderi, la distanțe foarte mari; figura 5.12). Fasciculul laser este utilizat pentru imprimarea și redarea informației audio și video pe/de pe suporturi cunoscute sub

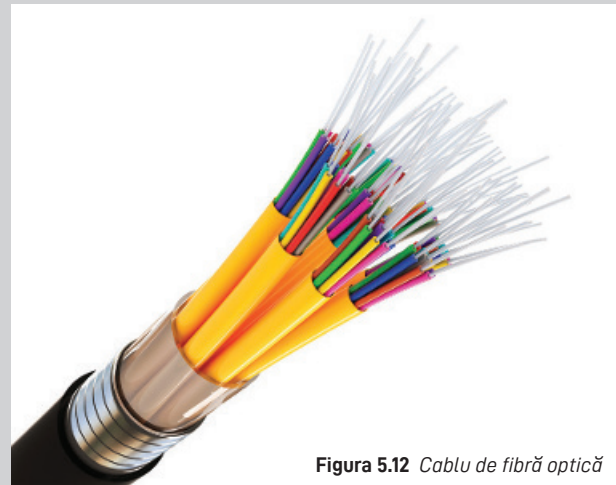


Figura 5.12 Cablu de fibră optică

¹ Termen colectiv care desemnează tehnologiile care operează la scară nanometrică (un nanometru este egal cu a miliardă parte dintr-un metru, adică 10^{-9} m).

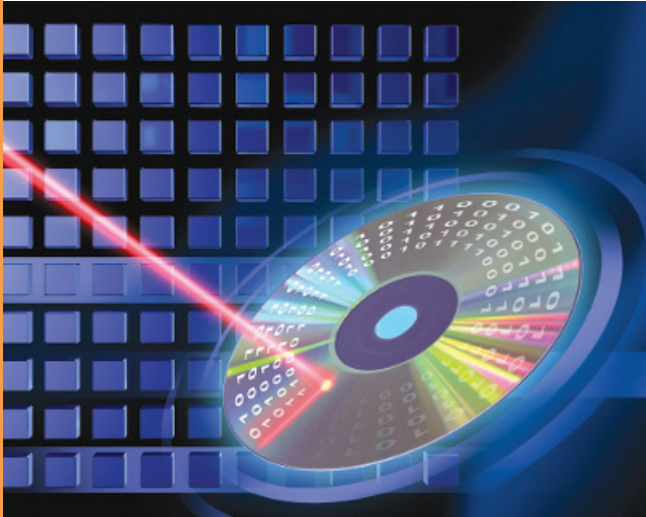


Figura 5.13 Scrierea unui DVD folosind un fascicul laser

numele de CD (Compact Disc) și DVD (Digital Video Disc; figura 5.13).

Laserii de mare putere sunt utilizați în diverse sectoare industriale pentru tăierea, sudarea sau lipirea pieselor sau bucăților realizate din diverse materiale. Sudarea este posibilă datorită temperaturilor foarte mari generate prin utilizarea laserului.

Deoarece fasciculul laser este foarte bine colimat, poate fi utilizat în industrie pentru realizarea microcircuitelor. Laserul în impulsuri este folosit în geodezie pentru măsurarea distanțelor.

De asemenea, laserii sunt utilizați pentru obținerea și redarea hologramelor. Pentru obținerea unei holograme, se utilizează un fascicul laser divizat în două fascicule, unul fiind reflectat de obiectul a cărui hologramă se dorește a fi construită, iar celălalt (fasciculul de referință) fiind trimis direct către filmul de înregistrare. Prin interferența dintre fasciculul împrăștiat de obiect și fasciculul de referință se obține o figură de interferență (cu linii/franje de interferență microscopice luminoase și întunecoase) înregistrată pe film, rezultatul fiind o hologramă. Pentru redarea imaginii, se iluminează filmul dezvoltat cu un fascicul laser având aceleași caracteristici (e.g., lungimea de undă) ca fasciculul cu care a fost înregistrată holograma.

Laserii sunt utilizați și în cercetarea științifică. În secțiunea următoare este prezentat un laser construit în România, care se dorește a se afla în avangarda cercetării științifice mondiale.



Figura 5.14 Tăierea unui metal cu un fascicul laser



Figura 5.15 Clădirea în care se află laserul de la Măgurele



Figura 5.16 Coperta revistei Photonics Spectra (mai 2020)

Laserul de la Măgurele

Proiectul ELI-NP (*Extreme Light Infrastructure – Nuclear Physics*), cunoscut sub numele de „laserul de la Măgurele”, a fost implementat la Institutul Național de Fizică și Inginerie Nucleară „Horia Hulubei” (IFIN-HB) ca parte a unei structuri paneuropene de cercetare, incluzând România, Cehia și Ungaria. Investiția a fost cofinanțată de Fondul European de Dezvoltare Regională, Programul Operațional de Competitivitate, în proiect fiind implicate 40 de instituții academice și de cercetare din 13 state membre ale Uniunii Europene. În cadrul proiectului a fost construit un sistem laser de mare putere (High-Power Laser System: HPLS). Laserul, cel mai puternic dispozitiv de acest fel din lume, este format din două fascicule, având fiecare o putere de 10 PW¹, alte două cu puterea de 1 PW fiecare și încă două de câte 100 TW (figura 5.15). Fiecare fascicul furnizează impulsuri laser cu durata de douăzeci de femtosecunde². Construcția laserului multiplu

Laserul cu electroni liberi

Laserii prezentați succint până în acest punct funcționează cu electroni legați, în sensul că electronii implicați în tranzițiile atomice și moleculare nu părăsesc aceste sisteme cuantice, ci ocupă alte stări în interiorul lor.

a fost rodul colaborării dintre ELI-NP și compania franceză Thales.

Profesorul Gérard Mourou³, câștigător al Premiului Nobel pentru Fizică în 2018 și inițiator al proiectului ELI-NP, spunea: „A fost o provocare uriașă pentru Thales și România – la fel ca o aterizare lunară, unde eșecul nu este o opțiune... Felicitări și mulțumesc pentru că acum comunitatea științifică va putea folosi acest instrument cu adevărat remarcabil!”.

Conform unor cercetători de la IFIN-HB, apariția laserului construit în cadrul proiectului ELI-NP pe coperta revistei Photonics Spectra din luna mai 2020, dedicat aniversării a 60 de ani de la invenția laserului, demonstrează succesul acestui proiect (figura 5.16).

Laserul de la Măgurele va veni direct în sprijinul unor cercetări în domeniul fizicii fundamentale, al fizicii nucleare și astrofizicii, al științei materialelor, al managementului materialelor nucleare și al științelor vieții.

În schimb, dispozitivele FEL (*Free-Electron Laser*) utilizează fascicule relativiste de electroni liberi, care se propagă în vid. Un astfel de laser nu folosește emisia stimulată a sistemelor cuantice cu electroni legați (atomi și molecule), ci a celor cu

¹ Un petawatt (PW) înseamnă 10^{15} watt, adică un milion (10^6) de miliarde (10^9) de watt. Un terawatt este egal cu 10^{12} W.

² O femtosecundă (fs) este egală cu 10^{-15} s, adică o milionime de miliardime de secundă.

³ Gérard Albert Mourou (n. 1944) este un cercetător francez, fizician și profesor universitar, pionier în domeniul electrotehnicii și laserilor, câștigător al Premiului Nobel pentru Fizică în 2018, alături de Donna Strickland (Canada) și Arthur Ashkin (SUA) „pentru invenții revoluționare în domeniul fizicii laserilor”. În 2019 a fost ales membru de onoare al Academiei Române.

electroni relativişti. Un laser cu electroni liberi emite pulsuri extrem de puternice și scurte de radiație sincrotronă¹. Radiația sincrotronă este emisă în timp ce electronii trec printr-un dispozitiv magnetic denumit wiggler². Radiația este amplificată pe măsură ce ea interacționează din nou cu electronii, astfel încât aceștia încep să emită coerent, realizând o creștere exponențială a intensității radiației globale (a se vedea caseta *Scurt istoric*).

Laserul cu electroni liberi este un dispozitiv înalt reglabil, utilizat pentru a genera radiații coerente cu lungimea de undă variind de la 10^{-5} cm la 1 cm. Pentru anumite lungimi de undă din gama precizată, puterea emisă este foarte mare; în special în domeniul undelor milimetrice, FEL depășește mulți alți laseri în ceea ce privește puterea emisă. Frecvența radiațiilor emise de un FEL poate fi reglată continuu,

Lasere cu semiconductori. Dioda laser

Laserele cu semiconductori se regăsesc astăzi într-un număr mare de dispozitive opto-electronice tot mai complexe.

Semiconductori

Semiconductorii reprezintă o categorie de materiale intermediară între conductori și izolatori, din punct de vedere al proprietății de conducție a sarcinii electrice. Conductibilitatea materialelor semiconductoare – siliciul (Si) și germaniul (Ge) fiind reprezentative pentru această categorie – se poate mări foarte mult prin adăugarea altor elemente, denumite impurități (e.g. arsen, bor, indiu, aluminiu, stibiu), în cantități foarte mici, procedeu cunoscut sub numele de *dopare*. Semiconductorii fără impurități se numesc *intrinseci*, iar cei cu impurități se numesc *extrinseci*. Semiconductorii extrinseci pot fi de tip *n* (cu impurități donoare) și de tip *p* (cu impurități acceptoare).

SCURT ISTORIC

Primul laser cu electroni liberi a fost dezvoltat în 1971 de profesorul de fizică John Madey (1943-2016) de la Universitatea Stanford, pe baza tehnologiei dezvoltate anterior de unii dintre colegii săi, printre care se afla și Hans Motz (1909-1987).

completând astfel domenii de frecvență care nu sunt accesibile altor surse coerente.

Dintre aplicațiile laserilor cu electroni liberi menționăm separarea izotopilor, încălzirea plasmei pentru fuziunea nucleară, construirea radarului de înaltă rezoluție și accelerarea particulelor în acceleratoare.

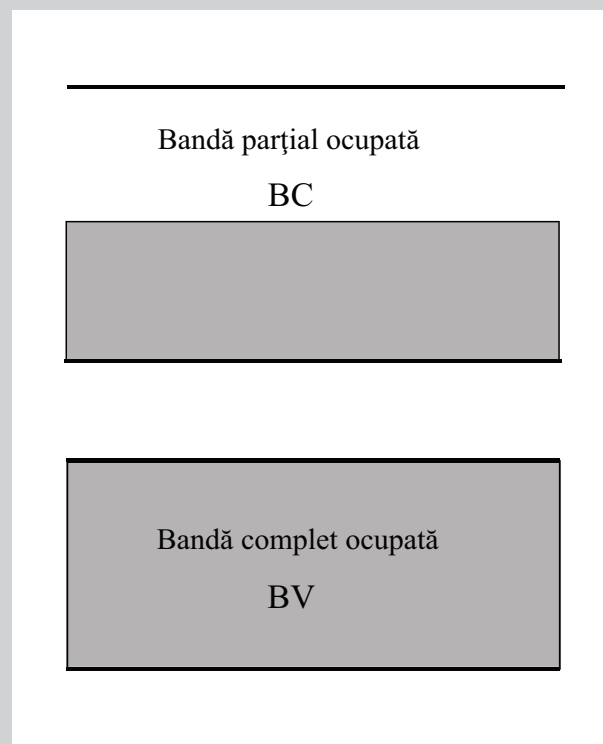


Figura 5.17 Benzi energetice în metale

¹ Radiația sincrotronă sau radiația de sincrotron este emisă de electroni la mișcarea acestora în câmp magnetic pe orbite circulare.

² Un wiggler este o structură periodică de magneți permanenți sau supraconductori. Poate fi utilizat ca parte componentă a unui sincrotron sau a unui laser cu electroni liberi. Primul wiggler a fost construit în 1952 la Universitatea Stanford de Hans Motz și colegii săi, pe baza lucrărilor teoretice ale lui Vitaly Ginsburg (1947) și Julius Schwinger (1949).

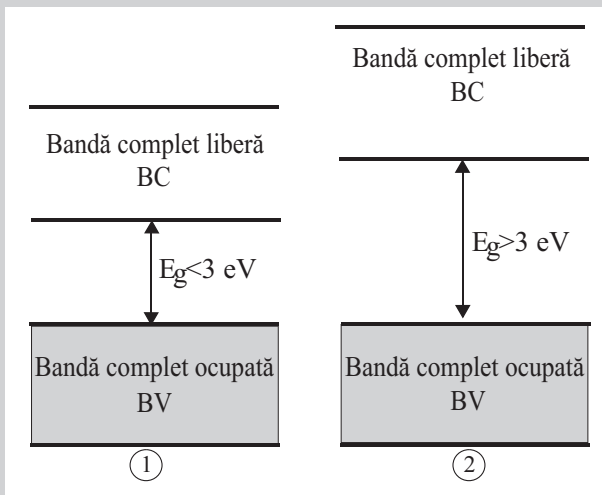


Figura 5.18 Benzi energetice pentru semiconductori și izolatori

Într-un semiconductor, indiferent dacă este intrinsec sau extrinsec, se pot deplasa – participând astfel la conducția electrică – două tipuri de purtători de sarcină electrică: electroni și goluri. În teoria zonală (de benzi) a solidelor cristaline¹, într-un semiconductor electronii se deplasează la nivelul benzii de conducție, iar golurile la nivelul benzii de valență. Trebuie reținut că golul are o realitate fizică numai într-un solid cristalin, reflectând un anumit mod de comportare a electronilor de valență. În acest sens trebuie înțeleasă și denumirea de cvasiparticulă atribuită golului.

În teoria benzilor de energie există o tratare unitară a tuturor materialelor solide (metale, izolatori și semiconductori), clasificarea acestora făcându-se în funcție de gradul de ocupare cu electroni a benzii de conducție (BC) sau de lărgimea E_g a benzii interzise² (BI), situate între banda de conducție și banda de valență (BV), astfel:

► metalele au BC parțial ocupată cu electroni (figura 5.17). Prin aplicarea unui câmp electric slab, se furnizează suficientă energie electronilor pentru a-i deplasa în interiorul BC;

► semiconductorii au la temperatura de 0 K (zero Kelvin) BV complet ocupată cu electroni, iar BC este complet goală și separată de BV prin BI cu lărgimea $E_g < 3$ eV (figura 5.18,1);

► izolatorii (sau dielectricii) au la temperatura de 0 K BV complet ocupată cu electroni, iar BC este complet goală și separată de BV prin BI cu lărgimea $E_g > 3$ eV (figura 5.18,2).

În cazul semiconducturilor, banda interzisă are o lărgime (e.g. 0,72 eV pentru Ge și 1,1 eV pentru Si) comparabilă cu energia pe care o poate câștiga un electron sub acțiunea unui câmp electric, prin iluminare sau prin încălzire. Acesta este motivul pentru care, la temperatura camerei, datorită mișcării termice, există în semiconductori electroni liberi la nivelul BC, care pot participa la conducția electrică³. De asemenea, odată cu creșterea temperaturii, numărul electronilor liberi crește în semiconductori⁴, spre deosebire de metale, în care rămâne constant. În cazul izolatorilor, energia de activare este atât de mare încât prin încălzire practic nu apar purtători de sarcină liberi.

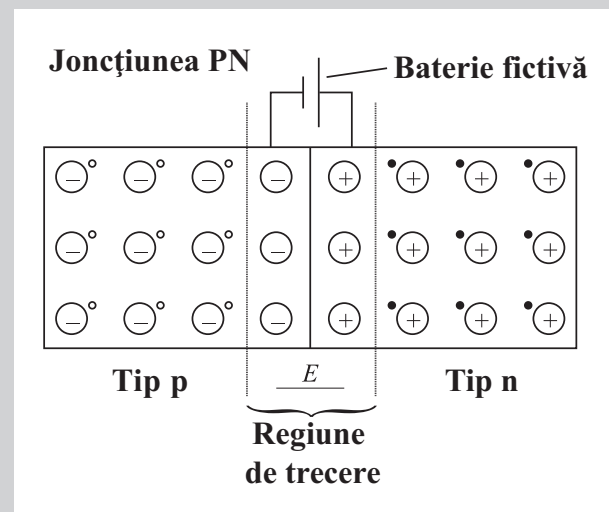


Figura 5.19 Joncțiunea pn

¹ Solidele cristaline se caracterizează printr-o aranjare spațială ordonată a atomilor, ionilor sau moleculelor componente. Solidele caracterizate printr-o aranjare neregulată a particulelor componente se numesc *corpuri amorfe* (e.g. sticla, smoala).

² Lărgimea benzii interzise, numită și *energie de activare*, este egală cu energia necesară unui electron aflat în banda de valență pentru a deveni liber. Mărimea acesteia arată cât de puternic sunt legați acești electroni de atomii cărora le aparțin.

³ Energia medie de agitație termică se calculează cu formula kT , unde k este constanta lui Boltzmann, iar T este temperatura absolută. La 300 K (adică 27° C, temperatura camerei), energia respectivă este de aproximativ 0,025 eV. Deoarece aceasta este numai o valoare medie, unii electroni pot avea energie termică mai mare, comparabilă cu lărgimea benzii interzise, astfel încât pot „sări” din banda de valență (BV) în banda de conducție (BC).

⁴ La siliciu pur, concentrația electronilor liberi crește de la 10^{17} m^{-3} (la temperatura camerei) până la 10^{24} m^{-3} la 700° C.

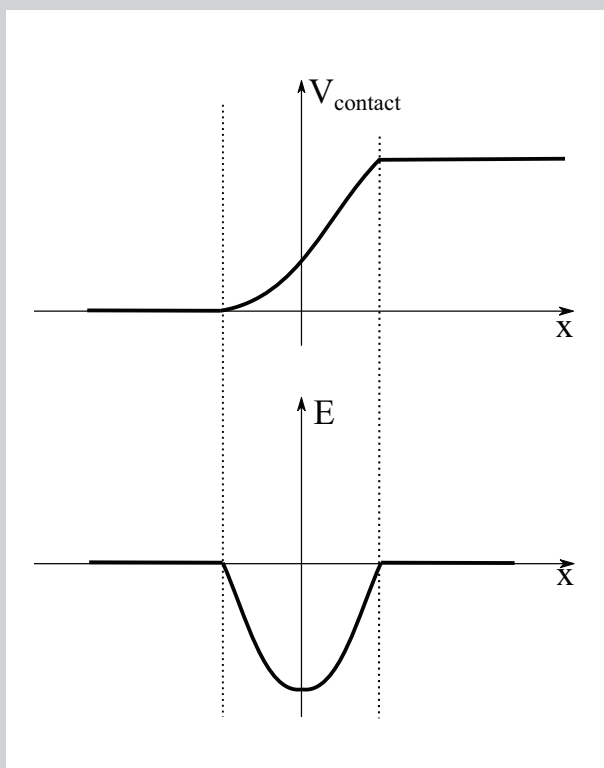


Figura 5.20 Distribuția potențialului și a intensității

Prin punerea în contact a doi semiconductori, unul de tip p și altul de tip n , se obține o *joncțiune semiconductoare* (numită și joncțiune $p-n$). Datorită diferenței de concentrație a purtătorilor de sarcină majoritari de același fel din cele două zone, golurile din regiunea p vor difuza în regiunea n și electronii din regiunea n vor difuza în regiunea p . În urma difuziei, va apărea o sarcină spațială negativă în regiunea inițial de tip p și o sarcină spațială pozitivă în regiunea inițial de tip n (figura 5.19). Rezultă că, în vecinătatea joncțiunii, va apărea o zonă sărăcită de purtători majoritari, numită *regiune de trecere*. Separarea de sarcină prezentă în această zonă va genera un câmp electric intern, a cărui intensitate se mărește pe măsură ce sarcina difuzată crește și care se opune procesului de difuzie. La un moment dat, când sarcina difuzată nu mai crește, se atinge echilibrul. Acesta se manifestă prin existența unei bariere de potențial care se opune difuziei purtătorilor majoritari prin joncțiune. În figura 5.20 sunt reprezentate distribuția potențialului și a câmpului electric de-a lungul structurii semiconductoare.

O astfel de structură, căreia i se adaugă două terminale metalice (catod și anod), poartă denumirea de *diodă semiconductoare* și are simbolul inclus în figura 5.21. Având două terminale, este un

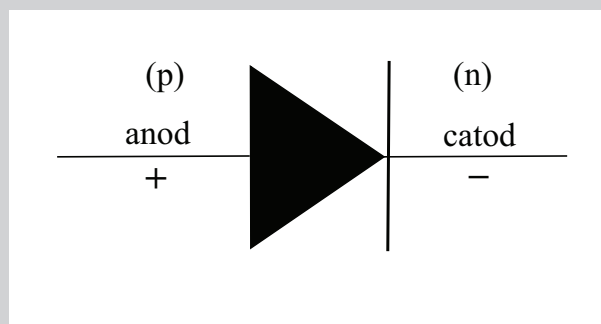


Figura 5.21 Simbolul diodei semiconductoare

dipol. Anodul este conectat la zona n , iar catodul la zona p .

Conectată la o sursă de tensiune, dioda va avea un comportament diferit în ceea ce privește conducția electrică, în funcție de modul de polarizare (i.e., de conectare a bornelor plus și minus ale sursei la cele două terminale metalice ale diodei). Astfel, dacă dioda este *polarizată direct* (plusul sursei la anod și minusul la catod), câmpul electric suplimentar aplicat în zona joncțiunii va avea sens opus celui intern. Atunci când câmpul total își va schimba sensul (va fi opus celui intern, iar bariera de potențial va dispărea), purtătorii majoritari din cele două zone vor traversa joncțiunea, dioda fiind străbătută de un curent electric numit curent direct. Tensiunea directă la care dioda începe să conducă poartă numele de *tensiune de deschidere*, fiind de circa 0,3 V pentru diodele din germaniu și de 0,6 V pentru cele din siliciu. După intrarea diodei în zona de conducție, tensiunea pe ea crește foarte puțin (circa 0,1-0,15 V).

Dacă dioda este *polarizată invers* (plusul sursei la catod și minusul la anod), câmpul electric suplimentar aplicat în zona joncțiunii va avea același sens cu

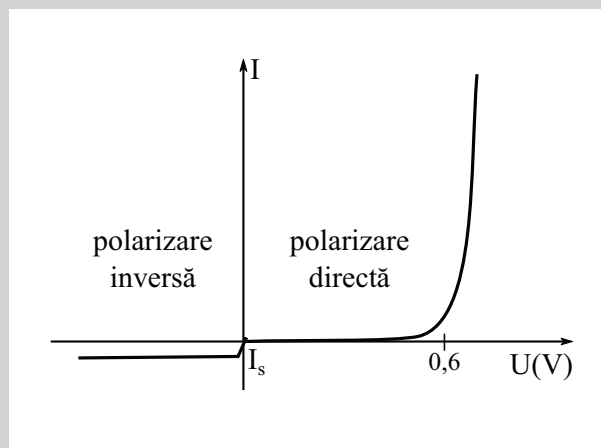


Figura 5.22 Caracteristica volt-amperică a diodei semiconductoare

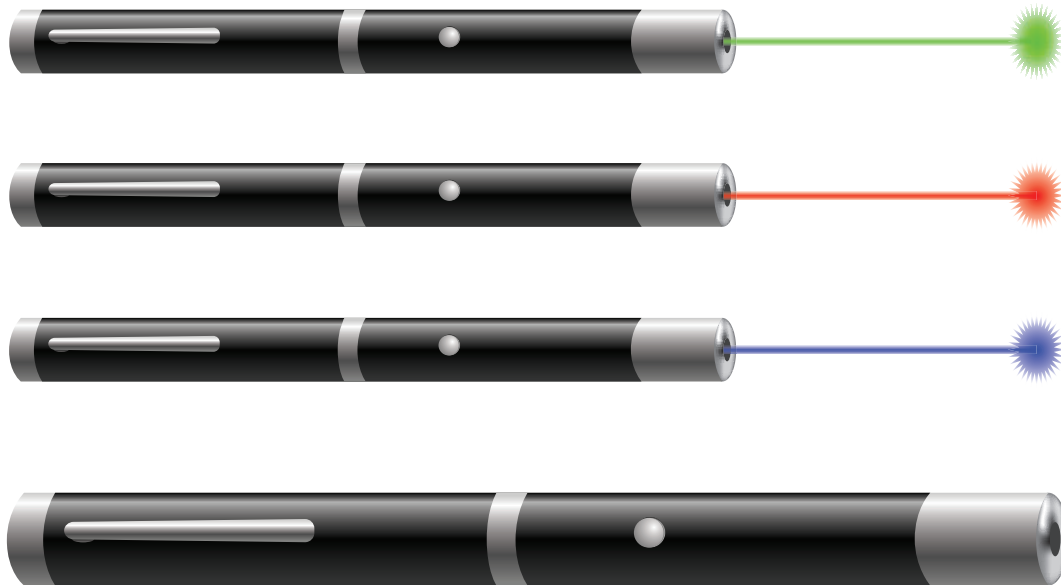


Figura 5.23 Indicatori laser având diverse culori

câmpul intern., opunându-se amândouă trecerii purtătorilor majoritari prin joncțiune. În acest regim de funcționare, dioda este practic blocată. Totuși, există un curent invers foarte mic (numit *curent invers de saturație*, acesta are o intensitate de ordinul zecilor de μA , fiind practic neglijabil), datorat purtătorilor minoritari (golurile din zona n și electronii din zona p), care traversează joncțiunea. Reprezentarea grafică a intensității curentului prin diodă în funcție de tensiunea aplicată poartă numele de *caracteristica volt-amperică* (figura 5.22).

Efectul laser este produs de tranzițiile electronice între banda de conducție și banda de valență în joncțiunea $p-n$ a unei diode semiconductoare polarizate direct. Utilizând limbajul specific semiconductoarelor, putem spune că, la recombinarea unui electron cu un gol, este emis un foton de radiație. Peste o *valoare de prag* a curentului direct, radiația electromagnetică generată în joncțiune devine suficient de intensă, astfel încât emisia stimulată să o depășească pe cea spontană.

Radiația produsă prin recombinarea electronilor și golurilor în regimul de polarizare directă poate fi amplificată folosind un rezonator optic. În cazul cel mai simplu, acesta poate fi însuși cristalul semiconductor, tăiat în mod corespunzător (astfel încât să aibă două fețe plane și paralele, șlefuite, perpendiculare pe fasciculul laser emis în zona joncțiunii).

Lungimea de undă a radiației emise depinde de lărgimea benzii interzise a materialului semiconductor utilizat. Folosind diverse materiale semiconductoare se poate acoperi un domeniu spectral foarte larg ($370 \div 5000 \text{ nm}$).

Laserii cu semiconductori pot opera atât în regim continuu (în acest caz, puterea de emisie este cuprinsă între câțiva microwatt, până la câteva zeci de watt), cât și în regim pulsatoriu (cu puteri de câteva zeci de watt).

Dispozitivul obținut prin utilizarea efectului laser produs într-o joncțiune $p-n$ se numește *diodă laser*. În figura 5.23 sunt prezentate câteva indicatoare având diverse culori, realizate pe baza acestui dispozitiv.

La final: de ce există ceva mai degrabă decât nimic?

La finalul acestei cărți putem spune că suntem mai bine pregătiți să răspundem la o întrebare complexă, care le include pe cele la care am încercat să oferim răspunsuri în lucrare: *Din ce este alcătuită lumea în care trăim?* În cadrul Modelului Standard se afirmă că la baza construcției universului material se află un set de 61 de particule elementare, care include atât fermionii de structură și bosonii vectoriali de interacțiune, cât și bosonul scalar Higgs (care conferă masă primelor două categorii). Dar această întrebare aduce cu sine altă întrebare: *Care este structura materiei la dimensiuni și durate mai mici decât scara*

Planck? Teoria supercorzilor poate oferi un răspuns, deocamdată insuficient de satisfăcător.

În cele din urmă este inevitabil să ne întrebăm: *De ce natura a creat ființe vii și, mai ales, una atât de evoluată – omul – încât să-și poată pune întrebări referitoare la natură, dar și la ea însăși?* Suntem parte a naturii. Are cumva aceasta o finalitate, proiectul său ultim fiind omul, ființă a cărei minte rațională este capabilă de cunoaștere? Altfel spus, suntem „instrumente” raționale cu care natura se autocunoaște? Principiul antropoc¹ afirmă că Universul are proprietățile pe care le are și pe care omul le poate



¹ Principiul a fost formulat în 1961 de astronomul Robert Dicke (1916-1997), care s-a bazat pe lucrările fizicianului P. M. A. Dirac. Numele său (*principiul antropoc*) a fost utilizat ca atare, pentru prima oară, de către fizicianul Brandon Carter (n. 1942) la un simpozion care a avut loc la Cracovia în 1973.

observa, deoarece, dacă ar fi avut alte proprietăți, omul nu ar fi existat. Altfel spus, legile naturii și o serie de constante fizice universale (e.g., constanta lui Planck, viteza luminii, constanta structurii fine) sunt compatibile cu condițiile care permit apariția vieții mai degrabă decât cu altele, în vârful ierarhiei lumii vii aflându-se omul, ființa care și-a făcut din cunoașterea Universului în care trăiește unul dintre scopurile vieții. Așa cum remarcă R. Dicke și B. Carter, epoca noastră coincide cu timpul de viață al așa-numitelor stele din secvența principală, cum este Soarele. În orice altă epocă, nu ar exista inteligența necesară pentru a măsura principalele constante fizice. După R. Penrose (1996), această coincidență trebuia să existe tocmai pentru ca viața inteligentă să fie aici pe durata particulară în care are loc această coincidență.

Fizicienii J. D. Barow și F. J. Tipler au enunțat principiul antropoc cosmic, ca o generalizare a principiului antropoc: „Prelucrarea inteligentă a informației trebuia să apară în evoluția Universului și, odată ce a apărut, nu va muri niciodată”. Conform celor doi, „deși principiul antropoc este o declarație pur fizică, valabilitatea acestui principiu este o precondiție fizică pentru ca valorile morale să apară și să continue să existe în Univers: nu pot exista valori morale de orice tip într-o cosmologie fără viață.”¹ Alți fizicieni interpretează acordul constantelor fizice universale ca pe o dovadă a unui Creator, care a făcut Universul cu intenția precisă de a produce omul (sau – eliminând intenția antropocentrică – cel puțin pentru a permite apariția unei diversități complexe).

Dacă nu acceptăm ideea valorii constantelor fizice universale ajustate de către o entitate binevoitoare pentru a permite apariția omului cunoscător, ne putem gândi la alta: aceea că Big Bang-ul s-ar putea să nu fi fost singurul eveniment de acest fel, ceea ce înseamnă că există mai multe Universuri izolate (în principiu un număr infinit), fiecare având propria sa evoluție, guvernate de legi fizice diferite

și caracterizate de propriul set de constante fizice. Astfel, Universul nostru este un „atom” care face parte dintr-un multicosmos (sau multivers) infinit, existența acelor valori ale constantelor fizice care au permis apariția vieții și a omului fiind cu totul rodul întâmplării (ele alcătuiesc un anumit set dintr-o mulțime infinită de seturi). De aceea, la fel de legitim, ne putem întreba: *Apariția omului în Univers (i.e., în Universul nostru) este numai un miracol, adică un joc al hazardului?* Iată două citate care exprimă poate cel mai bine răspunsul la această ultimă întrebare.

„Un miracol prețios pe care jocul infinit de combinații l-a deblocat pentru noi, permițându-ne să existăm. S-ar putea să zâmbim acum. Ne putem întoarce la scufundarea serenă în timp – în timpul nostru finit –, la savurarea intensității clare a fiecărui moment trecător și prețuit al scurtului cerc al existenței noastre.”

Carlo Rovelli

„Nu știu cum mă văd alții, dar pentru mine am fost ca un băiat care se joacă pe țărmul mării și găsește o pietricică mai fină sau o scoică mai deosebită decât celelalte, în timp ce întregul ocean al adevărului se întindea înaintea mea.”

Isaac Newton

Închizând cartea de față, după ce, parcurgând-o, am trecut în revistă știința elaborată în ultimul secol pe baza contribuțiilor inestimabile ale unui număr mare de fizicieni, adevărați eroi moderni ai cunoașterii, știind că orice răspuns naște o nouă întrebare (având – după citirea acestei cărți – o anumită experiență în câmpul vast al cunoașterii, nu ne amăgim că ar fi altfel) și gândindu-ne că – după cum spunea C. Noica² – „orice închidere este o deschidere”, este legitim ca, deschizând imaginar o altă carte (încă nescrisă), să ne întrebăm (așa cum a făcut odată Leibnitz) încă în primul capitol al acesteia: *De ce există ceva mai degrabă decât nimic?*³

¹ John D. Barow & Frank J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford Univ. Press, 1986.

² Constantin Noica (1909-1987) a fost un filosof, eseist și publicist român. O parte din viață (între anii 1949 și 1964) și-a petrecut-o în închisorile comuniste (1958-1964) sau având domiciliu forțat (1949-1958). Dintre numeroasele cărți pe care acesta le-a scris amintim *Creație și frumos în rostirea românească* (1973), *Devenirea întru ființă* (1981) și *Scrisori despre logica lui Hermes* (1986).

³ Misterul existenței lumii este considerat cel mai sublim și fascinant, e întrebarea cea mai profundă și mai vastă din câte putem pune. Filosoful Arthur Shopenhauer spunea – destul de dur – că aceia pe care nu-i miră șansa existenței lor, șansa existenței lumii, sunt debili mintali. Ludwig Wittgestein, poate cel mai mare filosof al secolului al XX-lea, era pur și simplu stupefiat de simpla existență a lumii („Nu faptul că există lucruri în lume este misterios, ci faptul că există lumea.”, *Tractatus logico-Philosophicus*). John A. Wheeler, unul dintre marii fizicieni ai secolului al XX-lea (mentorul lui Richard Feynman și savantul care a inventat termenul de *gaură neagră*), a spus: „Vreau să știu de unde e cuanta, de unde e Universul, de unde e existența.”