

TRAIAN ANGHEL



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>Aplicații 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 undele	86
2 Poate fi depășită viteza luminii?		Louis de Broglie: un istoric în devenire ajuns fizician	86
2.1. Bazele Teoriei Relativității Restrânse	53	Ipoteza lui de Broglie	87
Principiul relativității în mecanica clasică	54	3.2. Confirmarea experimentală	88
<i>Principiile mecanicii newtoniene</i>	54	Evenimente pregătitoare	89
<i>Formulări echivalente ale principiului relativității</i>	57	Experiența lui Davisson și Germer	89
<i>Spațiul absolut și timpul absolut în viziunea lui Newton</i>	57	Experiența lui G. P. Thomson	90
Teoria eterului antrenat	59	3.3. Microscopul electronic	91
Teoria eterului imobil	61	Microscopul optic	91
Experiența lui Michelson	62	Scurt istoric	94
2.2. Teoria Relativității Restrânse	64	Tipuri de microscopie electronice	94
Postulatele TRR	65	Deosebiri între microscopul optic și cel electronic	96
<i>Albert Einstein – scurtă biografie</i>	66		
<i>A 5-a conferință Solvay – participanți</i>	68	4 Cât de complex este atomul?	
Sincronizarea ceasurilor	69	4.1. Structura discretă a substanței: scurt istoric	97
Transformările Lorentz	71	Atomismul în antichitate	97
2.3. Consecințele transformărilor Lorentz	72	Atomismul și teoria cinetică a gazelor	98

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

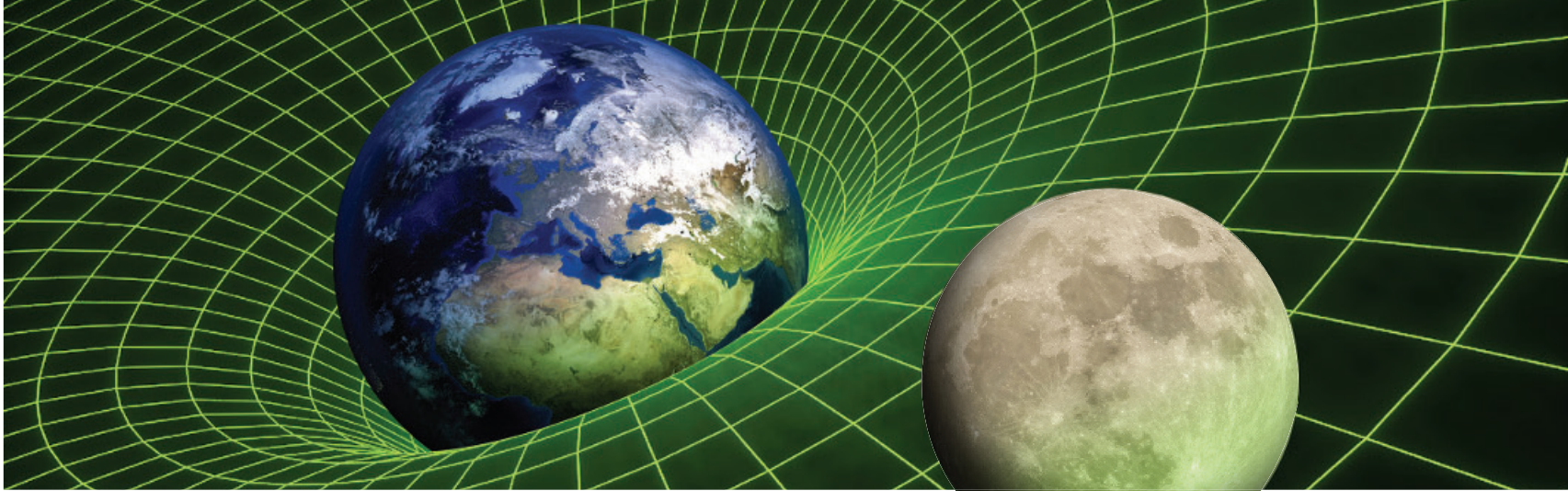
5 Cum funcționează laserul?

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 excitare	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 unde 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
		Unitatea cuantică de informație: qubitul	217
7 Din ce este construită lumea?		Entanglement	220
7.1. Modelul Standard al particulelor		8.2. Teleportarea cuantică	222
elementare	184	Transferul stării cuantice	222
Fermioni și bosoni fundamentali	185	Caracteristici ale teleportării cuantice	226
<i>Primele trei minute</i>	187	8.3. Calculul cuantic	226
<i>Suprafluiditate și superconductivitate</i>	188	Porți logice clasice	227
Particule de materie	189	Necesitatea dezvoltării calculatoarelor	
<i>Neutrini</i>	192	cuantice	230
Particule purtătoare de forță	194	Porți logice cuantice	231
<i>Gluonul</i>	196	Paralelismul cuantic	238
<i>O nouă forță fundamentală?</i>	197	Algoritmul Deutsch-Jozsa	239
Antiparticule	198	Decoerența sistemelor de calcul	241
<i>Pozitronul</i>	198	Realizări în domeniul calculatoarelor	
Bosonul Higgs	199	cuantice	242
<i>Particule cu masă și particule fără masă.</i>		<i>Calculatorul cuantic personal</i>	243
<i>Mecanismul Higgs</i>	201	Supremația cuantică	245
Numere cuantice	203	Un uriaș pas înainte pentru cercetare	245
<i>Vidul cuantic și spuma cuantică</i>	204		
7.2. Teoria cuantică a câmpului	205	La final: de ce există ceva mai degrabă decât	
		nimic?	247

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.

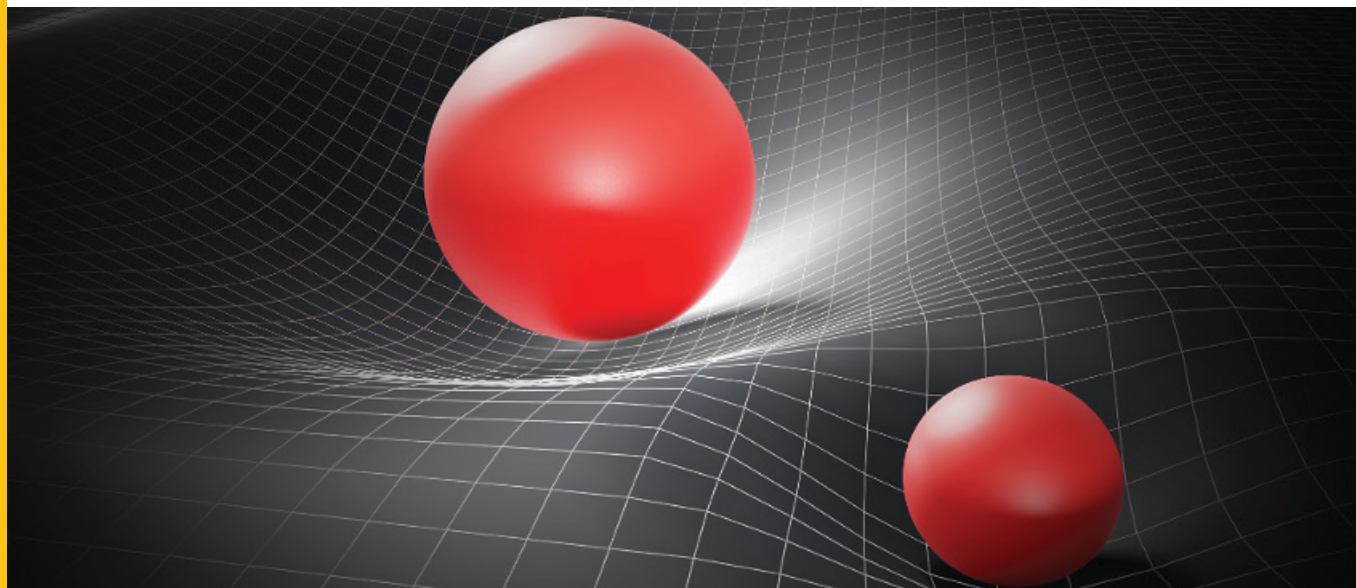


Figura 2.10 Ilustrarea conceptuală a relativității generale

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 naștii 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 încununate 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 măritări 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

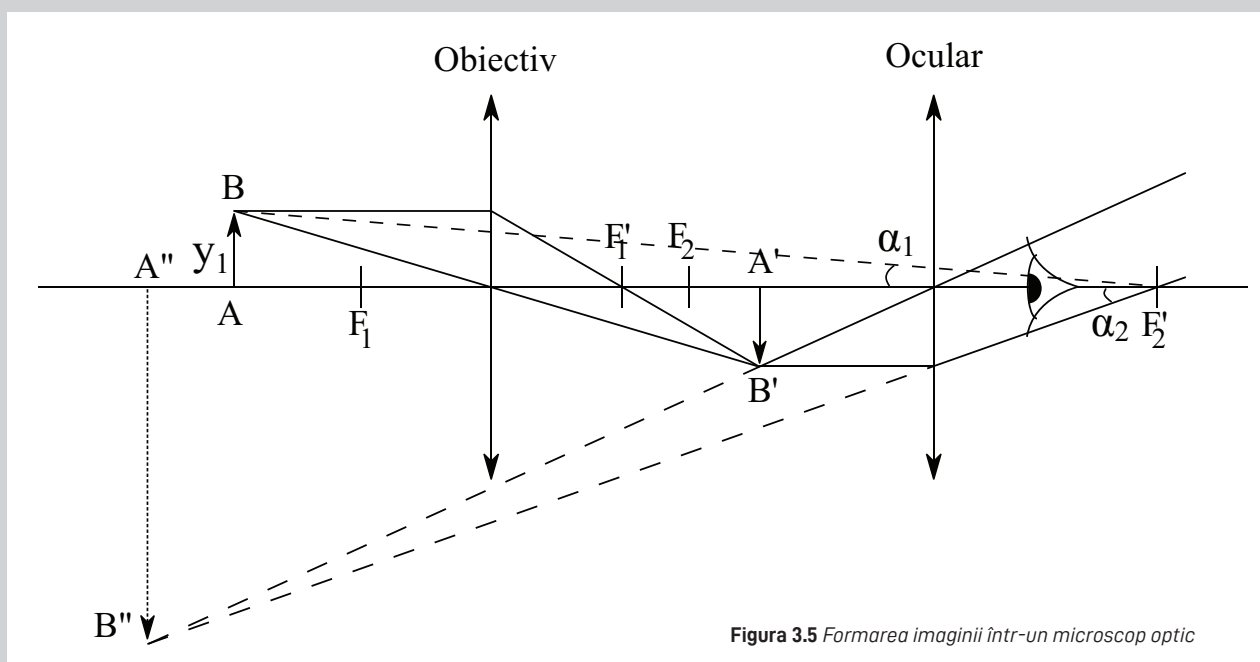


Figura 3.5 Formarea imaginii într-un microscop optic

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 *occhiolino* (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 de separare*, 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

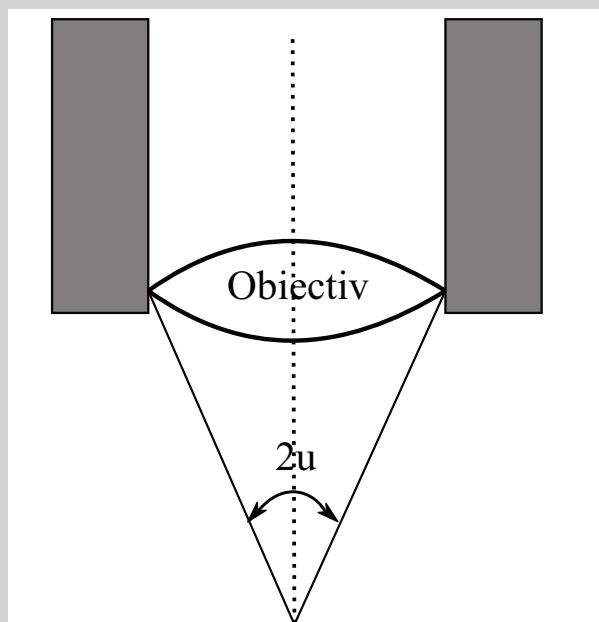


Figura 3.6 Unghi de apertură

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 x: n x; e.g. 400 x (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 microscopie 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 microscopie în ultraviolet care utilizează radiații cu lungimea de undă de 200 nm (i.e., 2000 de ångströmi). 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 microscopie de acest tip.

Scurt istoric



Ernst Ruska

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 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 mărituri de până la 400 de ori, dar nu era potrivit pentru utilizarea în practică. Tot în 1931, Reinhold Rüdenberg (1883-1961), directorul de cercetări al companiei Siemens, a patentat microscopul electronic (a se vedea caseta *Lentile speciale*). Totuși, aceste microscopie erau net inferioare

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 microscopie 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 microscopie electronice cu performanțe din ce în ce mai bune. Instrumentele moderne se bazează pe prototipul lui Ruska, asigurând mărituri de până la cincizeci de milioane de ori a obiectelor examinate.

LENTILE SPECIALE

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

Tipuri de microscopie 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 microscopie 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.

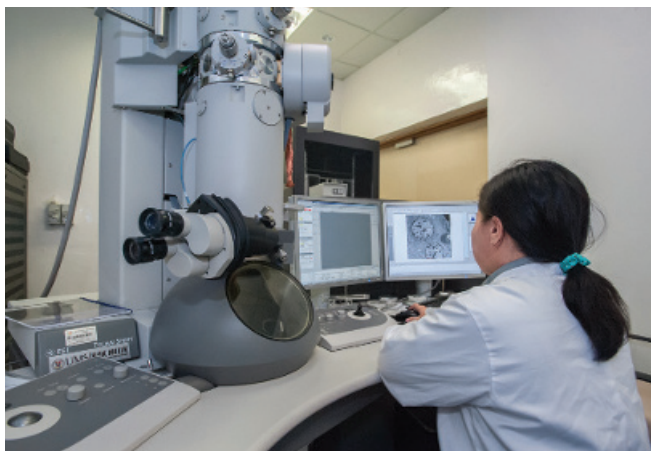


Figura 3.8 Microscop electronic cu transmisie

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 ăngstromi) unul de altul, precum și atomii de siliciu (distanța cu 78 pm sau 0,78 ăngstromi), 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

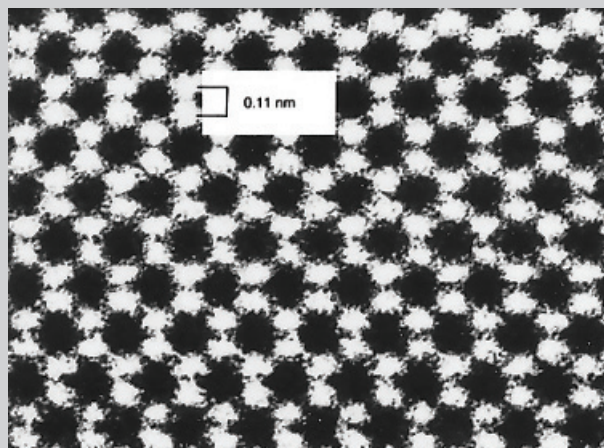


Figura 3.9 Micrografie MET; credit Britannica.com



Figura 3.10 Micrografie MES; credit Britannica.com

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

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 microscopie 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.

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 microscopie 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 speciile examinate sunt introduse în vid.

În microscopul optic distanța dintre obiectiv și ocular este fixă, modificându-se numai distanța dintre obiectiv și specimenul examinat. În schimb, microscopul electronic are lentile cu focalizare variabilă, distanțele dintre specimen 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 coerență. 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 coerență, 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.