

# FIZICA POVESTITĂ

Cristian Presură s-a născut în 1971 la Voineasa și a urmat studiile facultăților de electrotehnică și fizică. A lucrat la Institutul de Fizică Atomică, unde s-a ocupat de instalații electrice și a studiat proprietățile laserilor cu medii active solide.

În 2002 a obținut doctoratul în fizică la Universitatea Groningen, Olanda, unde a caracterizat proprietățile optice ale sistemelor corelate de electroni. Rezultatele sale s-au concretizat în lucrări publicate în reviste de specialitate: *Physical Review B*, *Physical Review Letters* și *Science*.

În prezent este cercetător la compania Philips, Olanda. S-a specializat în domeniul senzorilor medicali. Împreună cu echipa sa, a inventat și introdus pe piață primul ceas capabil să măsoare pulsul sportivilor numai pe baza senzorilor optici. A publicat mai multe zeci de lucrări și brevete de invenție.

Cristian Presură are o activitate intensă de popularizare a științei în limba română, scriind articole pentru ziare și reviste. Este membru al asociației cercetătorilor români Ad Astra și fondator al asociației Știință pentru Toți, prezentă la adresa de internet [stiinta.club](http://stiinta.club).

CRISTIAN PRESURĂ

FIZICA  
POVESTITĂ

Prefață de  
MIRCEA PENȚIA

Redactor: Vlad Zografi  
Coperta: Angela Rotaru  
Imaginea copertei (Roiul Pleiade)  
a fost pusă la dispoziție de Flavius Gligor.

Tipărit la Artprint

© HUMANITAS, 2014, pentru prezenta versiune românească

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României  
Presură, Cristian  
Fizica povestită / Cristian Presură; pref.: Mircea Penția. –  
București: Humanitas, 2014  
ISBN 978-973-50-4665-1  
I. Penția, Mircea (pref.)  
53

EDITURA HUMANITAS  
Piața Presei Libere 1, 013701 București, România  
tel. 021/408 83 50, fax 021/408 83 51  
www.humanitas.ro

Comenzi online: [www.libhumanitas.ro](http://www.libhumanitas.ro)  
Comenzi prin e-mail: [vanzari@libhumanitas.ro](mailto:vanzari@libhumanitas.ro)  
Comenzi telefonice: 0372 743 382, 0723 684 194

## Prefață

La primul contact cu această carte am avut sentimentul că ascult o muzică ce mă încântă ori de câte ori o aud. În interpretarea lui Cristian Presură, această compoziție grandioasă care e Fizica ajunge să sensibilizeze și urechile cel mai puțin educate științific.

Când am făcut primii pași în această lume fascinantă a fizicii, am citit tot felul de articole (cam haotic, e drept), aproape orice îmi cădea în mână. Mai peste tot găseam expresii de genul „după cum bine se știe...” și urma o formulă necunoscută mie. Această exprimare mă șoca de fiecare dată și îmi dădea sentimentul că sunt prea neinstruit în tainele fizicii moderne. Abia mai târziu am înțeles că lucrările științifice sunt un șir întreg de contribuții cu specializări foarte înguste, de abordări și modele care ajung să se impună doar în urma testării lor experimentale. De aceea, multe asemenea modele ajung la lada de gunoi, sunt complet uitate. Doar câteva se impun și devin adevărate teorii ce contribuie la înțelegerea modului în care e alcătuită și funcționează lumea înconjurătoare. Cartea de față conține tocmai aceste cunoștințe bine verificate și acceptate, adevărate „după cum bine se știe”.

Întrebări care au frământat omenirea, cum ar fi: de unde venim și încotro ne îndreptăm sau din ce suntem alcătuiți și după ce legi funcționează lumea înconjurătoare, au fost puse dintotdeauna. Primele noțiuni și concepte științifice au apelat la senzorii umani de lumină, presiune, temperatură etc. Apoi au fost concepute diverse instrumente care au extins domeniile de sondare a lumii fizice, fie că e vorba de lumea universului microscopic sau a celui microscopic. Cunoașterea lumii înconjurătoare a evoluat odată cu evoluția instrumentelor de care aceasta a dispus, ajungând ca astăzi să fie utilizate mari acceleratoare de particule, cum este Large Hadron Collider (LHC) de la CERN, Geneva, cu care se sondează și se testează cele mai îndrăznețe modele de structurare și funcționare ale materiei, cum e modelul standard.

Vechii greci credeau că la baza structurii și funcționării lumii înconjurătoare stau patru elemente constitutive: pământul, apa, aerul și focul. În accepțiunea actuală, aceste elemente constitutive sunt quarcii și leptonii ca elemente de structură, alături de cele patru forțe de interacție dintre ele, mediate prin bosonii de schimb corespunzători, respectiv fotonii pentru interacția electromagnetică, gluonii pentru interacția nucleară tare, bosonii  $W$  și  $Z$  pentru

interacția nucleară slabă și gravitonii pentru interacția gravitațională, iar în cele din urmă bosonii Higgs.

Descrierea unificată a tuturor forțelor de interacție a început cu cea a lui Newton, care a arătat că forța care face ca mărul să cadă din pom este aceeași cu cea care ține planetele pe orbitele proprii în mișcarea lor de revoluție în jurul Soarelui. Apoi Maxwell a arătat că forța electrică și cea magnetică sunt două aspecte ale uneia și aceleiași forțe electromagnetice, care în diverse situații se manifestă fie sub formă electrică, fie sub formă magnetică. Mai târziu, Weinberg, Glashow și Salam au arătat că interacția electromagnetică, la rândul ei, este doar o manifestare particulară a unei interacții mai generale, interacția electroslabă, care include și interacția nucleară slabă. În prezent se fac eforturi deosebite pentru a obține o descriere unificată a tuturor interacțiilor din natură, prin includerea și a interacției nucleare tari (actualul model standard), iar apoi și a celei gravitaționale.

Toate aceste încercări teoretice de unificare se fac în paralel cu testările experimentale din marile laboratoare ale lumii ale diverselor modele existente. Cercetările din aceste laboratoare se desfășoară pe un front foarte larg, de la descoperirea de noi particule elementare, cum ar fi detectarea recentă a bosonului Higgs ca piesa lipsă din modelul standard, și până la studiul materiei și energiei întunecate sau al găurilor negre. Parcurgând cartea lui Cristian Presură veți ajunge să înțelegeți toate aceste noțiuni, cum ar fi modelul standard, unificarea interacțiilor din natură, materia și energia întunecată, găurile negre etc. Fiind scrisă de un fizician pasionat, care a pătruns și înțeles tainele fizicii moderne, scrisă cu rigoarea și competența unui specialist, cartea este un valoros îndrumar atât pentru informarea unui public dornic să cunoască fizica modernă, cât și pentru a călăuzi pașii unui tineret instruit, care posedă cunoștințe generale și de matematică la nivel de liceu, sau chiar a celui care dorește să urmeze o carieră în domeniul științific sau tehnic. De altfel, deducțiile și demonstrațiile din carte (plasate în căsuțe separate), împreună cu anexe, sunt adevărate lecții de fizică utile inclusiv studenților de la facultățile de fizică sau politehnică.

În cuprinsul acestei cărți veți găsi toate abordările actuale ale fizicii moderne, începând cu mecanica newtoniană, aplicată la mișcarea corpurilor cerești, trecând la electromagnetism, folosit ca model pentru toate câmpurile

fizice din natură, și ajungând la teoria relativității. Ca implicații ale teoriei relativității, sunt abordate printre altele expansiunea universului, găurile negre sau materia și energia întunecată.

Trecând la mecanica cuantică, sunt abordate postulatele acestui capitol al fizicii moderne, greu de acceptat chiar și de către mulți fizicieni formați în concepția unei fizici deterministe, și, de asemenea, este relevat caracterul non-local al proceselor cuantice.

Prin unificarea teoriilor clasice de câmp și a mecanicii cuantice s-a elaborat cea mai completă și precisă teorie cuantică de câmp – electrodinamica cuantică. Una dintre consecințele importante ale acestei teorii este legată de interpretarea vidului cuantic nu ca un spațiu cu desăvârșire gol, ci ca unul umplut cu o sumedenie de particule virtuale, datorate fluctuațiilor locale energetice, cu producere și anihilare permanentă de particule. Existența acestora a fost demonstrată experimental, de exemplu prin deplasarea Lamb a nivelelor energetice dintr-un atom.

Trecând în continuare la particulele elementare, cunoștințele actuale arată că elementele de structură ale particulelor elementare sunt la nivelul quarcilor și leptonilor. Interacțiunile lor electromagnetice și slabă sunt descrise prin teoria electrolabă. Interacția tare dintre aceste elemente de structură este descrisă de cromodinamica cuantică, e drept încă nedefinitivă pentru distanțe mari. Aceasta funcționează și descrie deocamdată procesele de interacție tare la distanțe mai mici de  $10^{-16}$  m între quarci.

În final sunt abordate fenomene și teorii aflate în topul lucrărilor teoretice și experimentale actuale. Printre acestea amintim modelul standard, modelul marii unificări,

modele dincolo de modelul standard, cum ar fi teoria supersimetrilor sau teoria corzilor și a supercorzilor.

Majoritatea fizicienilor care se încumetă să scrie o asemenea carte rezistă cu greu tentației de a folosi un limbaj matematic atotcuprinzător, cu numeroase formule, uneori greu de digerat pentru un nespecialist. Un asemenea cititor obișnuit vrea doar să rămână cu iluzia înțelegerii lumii fizice și să „apuce” câțiva termeni mai sofisticati cu care apoi să se arate „bun” cunoscător în ale fizicii la diverse discuții și întâlniri mondene. În acest sens, cartea lui Cristian Presură este cu atât mai valoroasă cu cât se adresează în egală măsură unui cititor nevizat și unuia bun cunoscător al formalismului matematic. Parafrazându-l pe Richard Feynman, pot spune că pentru a studia fizica există două posibilități: fie urmați timp de cinci ani cursurile facultății de fizică, fie citiți această carte.

În cazul cărții de față, Cristian Presură îi împacă atât pe cei mai cărcotași, care nu acceptă nimic fără demonstrație, cât și pe cei care vor doar să afle cum funcționează fizica în cele mai ascunse cotloane ale lumii materiale, care sunt legitățile ce guvernează această lume și care sunt posibilitățile de a folosi aceste legi. Legile fizicii, spre deosebire de cele sociale, nu pot fi supuse la vot, nu pot fi ignorate sau ocolite. Ele sunt plasate deasupra tuturor și guvernează întregul univers. Ele pot fi doar cercetate și eventual descoperite, acesta fiind de altfel și obiectivul principal al cercetării științifice.

Dr. MIRCEA PENȚIA

Institutul Național de Fizică și Inginerie Nucleară,  
București-Măgurele  
cercetător științific asociat CERN, Geneva



# Cuprins

<b>1</b>	<b>Începuturile astronomiei</b>	<b>15</b>
1.	Limbajul naturii și limitele sale . . . . .	15
2.	Forma Pământului . . . . .	17
3.	Dimensiunea Pământului . . . . .	18
4.	Mișcarea Pământului în jurul propriei axe . . . . .	19
5.	Avantajul practic al stelelor fixe . . . . .	20
6.	Dimensiunea Lunii . . . . .	21
7.	Distanța de la Soare la Pământ . . . . .	22
8.	Modelul lui Ptolemeu . . . . .	23
9.	Sistemul lui Copernic . . . . .	24
10.	Orbita eliptică a planetelor . . . . .	25
<b>2</b>	<b>Fundamentele mecanicii clasice</b>	<b>28</b>
11.	Căderea liberă a corpurilor . . . . .	28
12.	Cele trei principii ale mecanicii . . . . .	30
13.	Masa inerțială și masa gravitațională . . . . .	32
14.	Atracția gravitațională . . . . .	33
15.	Periodicitatea mareelor . . . . .	34
16.	Mișcarea eliptică . . . . .	35
17.	Modelarea numerică . . . . .	38
18.	Măsurarea constantei gravitaționale . . . . .	39
19.	Despre energie și limbajul fizicii . . . . .	40
20.	Planete extrasolare . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Electricitatea și magnetismul</b>	<b>46</b>
21.	Electricitatea ca un joc . . . . .	46
22.	Dopul de plută și câmpul electric . . . . .	48
23.	Broasca electrocutată și apariția bateriei . . . . .	50
24.	Polii magnetici care nu pot fi separați . . . . .	51
25.	Generarea câmpului magnetic de către sarcinile electrice . . . . .	52
26.	Acțiunea câmpului magnetic asupra sarcinilor electrice în mișcare . . . . .	53
27.	Millikan și sarcina electronului . . . . .	55
28.	Thomson și raportul dintre sarcina electrică și masa electronului . . . . .	56
29.	Semnificația numărului lui Avogadro . . . . .	58
30.	Electroliza. Masa și dimensiunea unui atom. . . . .	60
31.	Modelul planetar al atomului . . . . .	62
32.	O scurtă enumerare a stărilor materiei . . . . .	65
<b>4</b>	<b>Electromagnetism</b>	<b>67</b>
33.	Câmpuri magnetice variabile în timp . . . . .	67
34.	Câmpuri electrice variabile în timp . . . . .	68



35. Ecuațiile lui Maxwell . . . . .	69
36. Undele electromagnetice . . . . .	71
37. Lumina este o undă electromagnetică . . . . .	73
38. Oscilațiile undelor electromagnetice și difracția luminii . . . . .	75
39. Prima măsurătoare directă a oscilației câmpului electric al luminii . . . . .	79
40. Metamateriale. Lentila perfectă. Invizibilitate. . . . .	80
41. Energia câmpului electromagnetic . . . . .	84
42. Transmisia energiei pentru câmpul electromagnetic . . . . .	85
43. Masa inerțială a câmpului electromagnetic . . . . .	87
44. Presiunea luminii Cum putem cântări lumina. . . . .	90
<b>5 De la electromagnetism către o teorie a relativității</b>	<b>93</b>
45. Echivalența sistemelor de referință inerțiale . . . . .	93
46. Legile electromagnetismului și sistemele inerțiale . . . . .	94
47. Câmpurile electrice și magnetice în sisteme de referință inerțiale diferite . . . . .	96
48. Invarianța vitezei unei raze de lumină . . . . .	98
49. Independența vitezei luminii de viteza sursei care o emite . . . . .	100
50. Experimentul lui Michelson și Morley . . . . .	101
51. Aberația luminii stelare . . . . .	104
52. Dilatarea timpului . . . . .	105
53. Dilatarea timpului în electromagnetism, abordată clasic . . . . .	108
54. Universalitatea dilatării timpului . . . . .	110
55. Contractia Lorentz a lungimilor . . . . .	111
<b>6 Teoria relativității restrânse</b>	<b>113</b>
56. Postulatele lui Einstein . . . . .	113
57. Despre timpul și spațiul absolut . . . . .	114
58. Despre inexistența simultaneității absolute . . . . .	116
59. Paradoxul gemenilor . . . . .	117
60. Metrica spațiului-timp. Intervalul relativist. . . . .	120
61. Formularea lui Minkovski pentru spațiu-timp . . . . .	124
62. Transformările Lorentz și principiul de reciprocitate . . . . .	127
63. Dependența masei inerțiale a unui corp de viteza sa . . . . .	130
64. De ce nici măcar informația nu poate depăși viteza luminii . . . . .	132
65. Echivalența dintre masa inerțială și energie . . . . .	133
<b>7 Teoria relativității generale</b>	<b>137</b>
66. Teoria incompletă a gravitației . . . . .	137
67. Principiul echivalenței și cheia înțelegerii relativității generale . . . . .	138
68. Geometria neeuclidiană exemplificată de suprafața sferei . . . . .	141
69. Harta unei suprafețe curbe și metrica sa . . . . .	143
70. Metrica spațiului-timp curb. Analogia cu o sferă. . . . .	147
71. Mișcarea corpurilor și traiectoria unei raze de lumină . . . . .	153
72. Metrica spațiului-timp și ecuația lui Einstein . . . . .	155
73. Teoria relativității generale, recapitulată în trei legi . . . . .	157
74. Aproximarea ecuației lui Einstein . . . . .	159
75. Metrica Schwarzschild a spațiului-timp din jurul unei stele . . . . .	160
76. Periheliul planetei Mercur . . . . .	167
77. Curbarea unei raze de lumină în câmpul gravitațional . . . . .	170
78. Curbura spațiului în apropierea stelelor masive. Lentile gravitaționale. . . . .	172
79. Efectul Doppler și deplasarea spre roșu a luminii în câmpuri gravitaționale . . . . .	174
80. Dilatarea timpului în câmpuri gravitaționale intense . . . . .	178
<b>8 Implicațiile teoriei relativității în astronomia modernă</b>	<b>181</b>
81. Sistemele de navigație GPS . . . . .	181
82. Detecția indirectă a undelor gravitaționale . . . . .	182
83. Sistemul LIGO de detecție directă a undelor gravitaționale . . . . .	184
84. O călătorie spre găurile negre . . . . .	185
85. Dovezi experimentale ale existenței găurilor negre . . . . .	189
86. Radiația Hawking și „găurile de vierme” . . . . .	192
87. Friedmann și expansiunea prezisă a universului . . . . .	194
88. Hubble și expansiunea măsurată a universului . . . . .	197

89. Radiația cosmică de fond, sau cum s-a întunecat universul . . . . .	200
90. Materia întunecată și rotația rapidă a galaxiilor . . . . .	203
91. Teoria dinamicii newtoniene modificate . . . . .	207
92. Energia întunecată și expansiunea accelerată a universului . . . . .	209
<b>9 Mecanica cuantică . . . . .</b>	<b>212</b>
93. Radiația corpului negru . . . . .	212
94. Oscilatorul cuantic și nivelurile discrete de energie . . . . .	214
95. De ce corpurile încălzite apar roșii și nu albastre . . . . .	215
96. Efectul fotoelectric. Fotonii. . . . .	216
97. Emisia și absorbția luminii. Atomul de hidrogen. . . . .	219
98. Unda pilot a electronului și rezonanța ei în atom . . . . .	221
99. Unda de probabilitate a fotonului . . . . .	224
100. Unda de probabilitate a electronului în experimentele de interferență . . . . .	227
101. Caracteristicile undei de probabilitate a electronului . . . . .	230
102. Ecuația lui Schrödinger pentru evoluția undei de probabilitate . . . . .	232
103. Cuantificarea oscilatorului armonic. Stări staționare. . . . .	234
104. Efectul de tunelare cuantică . . . . .	237
105. Colapsul undei de probabilitate, sau misterul mecanicii cuantice . . . . .	239
106. Superpoziția cuantică, statuia cuantică și pisica lui Schrödinger . . . . .	242
107. Principiul de incertitudine al lui Heisenberg . . . . .	246
108. Spinul electronului . . . . .	249
109. Situația mai multor particule. Bosoni și fermioni . . . . .	254
110. Postulatele mecanicii cuantice . . . . .	257
<b>10 Aspecte moderne ale mecanicii cuantice . . . . .</b>	<b>261</b>
111. Decoerența și colapsul undei de probabilitate . . . . .	261
112. Creierul uman și mecanica cuantică . . . . .	264
113. Ipoteza universurilor multiple . . . . .	268
114. Paradoxul măsurătorii fără interacțiune . . . . .	271
115. Laserul și optica cuantică . . . . .	275
116. Calculatoare cuantice . . . . .	279
117. Teoria Bohm-de Broglie a undei pilot . . . . .	284
118. Caracterul non-local al mecanicii cuantice . . . . .	287
119. Paradoxul Einstein-Podolsky-Rosen și verificarea lui experimentală . . . . .	288
120. Teleportarea cuantică . . . . .	295
121. Criptografia cuantică . . . . .	301
<b>11 Principiul acțiunii minime și teoriile clasice de câmp . . . . .</b>	<b>305</b>
122. Formularea generală a principiului acțiunii minime . . . . .	305
123. Principiul lui Fermat . . . . .	307
124. Mecanica analitică. Lagrangeanul unui sistem mecanic . . . . .	309
125. Ecuațiile Euler-Lagrange pentru un sistem mecanic . . . . .	313
126. Sisteme cuplate în mecanica analitică . . . . .	315
127. Teoriile clasice de câmp și salteaua universului . . . . .	318
128. Potențialele electrodinamice ale câmpului electromagnetic . . . . .	321
<b>12 Teoria cuantică a câmpurilor . . . . .</b>	<b>329</b>
129. Esența mecanicii cuantice . . . . .	329
130. Geneza particulelor în reprezentarea poziției . . . . .	332
131. Reprezentarea impulsului pentru un câmp lipsit de interacțiune . . . . .	339
132. Mișcarea relativistă a electronului . . . . .	342
133. Pozitronul și confirmarea sa experimentală . . . . .	348
134. A doua cuantificare . . . . .	351
135. Interacțiunea dintre particule în reprezentarea poziției . . . . .	354
136. Unificarea câmpului electromagnetic și al undei de probabilitate . . . . .	359
<b>13 Electrodinamica cuantică în interpretarea lui Feynman . . . . .</b>	<b>364</b>
137. Metoda lui Feynman pentru o particulă fără spin . . . . .	364
138. Metoda lui Feynman în teoria cuantică a câmpurilor . . . . .	371
139. De la câmpuri înapoi la particule . . . . .	374
140. Propagarea particulelor . . . . .	377
141. Vertexul interacțiunii dintre electroni și fotoni . . . . .	382

142. Diagramele Feynman și multiplele procese virtuale . . . . .	384
143. Particulele virtuale și „supra cuantică” a universului . . . . .	390
<b>14 Consecințe ale electrodinamicii cuantice</b>	<b>394</b>
144. Antiparticulele și călătoria înapoi în timp . . . . .	394
145. Diagramele Feynman în reprezentarea energie-impuls . . . . .	397
146. Problema infiniților din electrodinamica cuantică . . . . .	402
147. Renormarea electrodinamicii cuantice . . . . .	405
148. Deplasarea Lamb și lungimea de undă Compton . . . . .	410
149. Momentul anomal al electronului . . . . .	413
150. Vidul cuantic și forța Casimir . . . . .	414
151. Efectul Schwinger și energia de zero a vidului . . . . .	418
<b>15 Fizica particulelor elementare</b>	<b>423</b>
152. Detectarea experimentală a noilor particule . . . . .	424
153. Acceleratoarele moderne de particule . . . . .	425
154. Despre particulele virtuale din acceleratoarele de particule . . . . .	427
155. Forța nucleară tare . . . . .	430
156. Familiile de particule: leptoni, barioni și mezoni . . . . .	432
157. Ordonarea mezonilor și barionilor . . . . .	433
158. Quarcii și aromele acestora. . . . .	436
159. Sistematizarea particulelor elementare . . . . .	438
160. Principiul de incertitudine energie-timp și importanța proceselor virtuale . . . . .	439
<b>16 Cromodinamica cuantică</b>	<b>444</b>
161. Transformările de etalonare ale câmpului electromagnetic . . . . .	444
162. Experimentul Aharonov-Bohm și potențialele electrodinamice . . . . .	447
163. Principiul invarianței la transformarea de etalonare locală . . . . .	451
164. Culorile quarcilor . . . . .	456
165. Simetria SU(3) a quarcilor . . . . .	459
166. Gluonii colorați . . . . .	466
167. Forța de culoare . . . . .	469
168. Quarcii liberi și culoarea particulelor compuse . . . . .	471
<b>17 Interacțiunea electrolabă</b>	<b>474</b>
169. Neutrینul, precursorul forței nucleare slabe . . . . .	475
170. Bosonul W, mediatorul interacțiunilor nucleare slabe . . . . .	476
171. Chiralitatea neutrینului și ruperea simetriei de chiralitate . . . . .	478
172. Interacțiunea nucleară slabă și simetria SU(2) × U(1) . . . . .	481
173. Ideea de bază a mecanismului Higgs: asemănarea cu supraconductorii . . . . .	488
174. „Înghițel” universului și ruperea spontană de simetrie . . . . .	492
175. Unificarea electromagnetismului cu teoria interacțiunilor nucleare slabe . . . . .	501
176. Achiziția de masă nenulă a electronului . . . . .	507
177. Quarcii și interacțiunea slabă . . . . .	510
<b>18 Cercetări actuale în fizica particulelor elementare</b>	<b>512</b>
178. Modelul standard al particulelor elementare . . . . .	513
179. O istorie foarte scurtă a universului . . . . .	514
180. Modelul inflaționar al universului . . . . .	520
181. Inflația eternă, unde gravitaționale și universuri multiple . . . . .	525
182. Violarea simetriei dintre materie și antimaterie și a celei de sarcină-paritate . . . . .	530
183. Oscilațiile neutrینilor și masa lor nenulă . . . . .	533
184. Supersimetria particulelor elementare și energia vidului . . . . .	537
185. Marea unificare a forțelor fundamentale și energia Planck . . . . .	540
186. Descoperirea bosonului Higgs la acceleratorul Large Hadron Collider . . . . .	544
187. Găurile negre microscopice, un pericol pentru Pământ? . . . . .	547
188. Ce ne mai așteptăm să găsim la LHC? . . . . .	551
<b>19 Teoria corzilor relativiste</b>	<b>553</b>
189. Introducerea corzii relativiste și un avertisment . . . . .	553
190. Istoria corzilor relativiste . . . . .	554
191. Ce este o coardă relativistă? . . . . .	558
192. Ecuația fundamentală de mișcare a corzii relativiste . . . . .	560

193. Interacțiunea dintre corzi, emisia și absorbția de particule . . . . .	564
194. Mișcarea clasică a corzii relativiste . . . . .	566
195. Cuantificarea vibrației corzii relativiste . . . . .	569
196. Universul corzii bosonice cu 26 de dimensiuni spațio-temporale . . . . .	571
<b>20 Teoria supercorzilor</b>	<b>574</b>
197. Supercoarda și universul cu 10 dimensiuni . . . . .	574
198. Supersimetria și proiecția GSO . . . . .	577
199. Dimensiunile suplimentare ale spațiului în modelul Kaluza-Klein . . . . .	579
200. Dualitatea T, teoria M și supergravitația . . . . .	581
201. Compactarea dimensiunilor spațiale și principiul antropic . . . . .	585
202. Lumea branelor și mărimea dimensiunilor suplimentare . . . . .	589
203. Despre entropie și radiația Hawking a găurilor negre . . . . .	592
<b>21 Fizica, între cotidian și viitor</b>	<b>597</b>
204. Fizica modernă, recunoscută în lumea înconjurătoare . . . . .	597
205. Istoria căderii libere a unui corp . . . . .	599
206. Gravitația cuantică . . . . .	603
207. Impasurile din fizica modernă, indicii pentru viitor . . . . .	608
<b>22 Anexă</b>	<b>615</b>
208. Despre matematicieni și fizicieni, derivate și integrale . . . . .	615
209. Convenții pentru operații matematice . . . . .	617
210. Notății relativiste . . . . .	618
211. Notății pentru mărimile fizice . . . . .	619
212. Scurtă bibliografie . . . . .	621
<b>23 Anexă matematică: Metoda canonică în mecanica cuantică</b>	<b>622</b>
213. Formularea canonică, între magie și exactitate matematică . . . . .	622
214. Legătura cu metoda lui Feynman în cazul discret . . . . .	628
215. Legătura cu metoda lui Feynman în cazul continuu . . . . .	630
216. Oscilatorul bosonic și cel fermionic în metoda canonică . . . . .	633
217. Teoria cuantică a câmpurilor în metoda canonică . . . . .	635
<b>Indice</b>	<b>641</b>



# Începuturile astronomiei

Obiectul fizicii este universul material în care trăim, iar scopul ei este în esență explicitarea comportamentului acestui univers. Pentru aceasta, fizica are nevoie de un limbaj și de o metodă de analiză. În prima secțiune vom discuta puțin forma acestui limbaj (matematica) și limitările sale. În secțiunile ce urmează vom exemplifica metoda de analiză cu ajutorul unor noțiuni de astronomie.

## 1. Limbajul naturii și limitele sale

Einstein spunea odată că lucrul cel mai de neînțeles este că *lumea poate fi înțeleasă*. Ciudat, nu? Ne-am fi așteptat ca lumea să fie o colecție haotică de întâmplări singulare și complet imprevizibile, un univers în care se poate întâmpla orice și oricând. Dar universul își are legile lui, pe care oamenii de știință încearcă să le descopere.

Ploaia, de exemplu, cade mereu de sus în jos și nu ne așteptăm să ne punem umbrela sub picioare atunci când ieșim din casă. Există deci o lege a ploii, care ne spune că picăturile acesteia cad în jos. Fenomenul are loc mereu în același fel, în mod natural. Observația scoate în evidență o *ordine* în univers, ordine relevantă de știință prin experimente repetabile.

Să observăm că ordinea universului o „citim” în limbajul matematicii. Dacă avem două monede de cinci lei, știm că sunt în total zece lei. Dacă trenul pleacă din București la o oră și știm cât de repede merge, putem prezice când ajunge la Râmnicu Vâlcea. Poziția unei stele o măsurăm pe cer și o scriem în caiet cu ajutorul unor numere. Putem prezice unde se va afla steaua peste două ore, dacă luăm în calcul rotația boltei cerești în jurul Pământului, adunând și înmulțind numere.

Matematica stă la baza fizicii și a modului de percepere a universului. Fără să numărăm nu putem aborda problema ordinii universului, iar fără să învățăm să rezolvăm integrale nu vom rezolva ecuațiile fizicii. *Matematica este limbajul naturii*, așa cum s-a afirmat adeseori.

Desigur, se prea poate ca această afirmație să fie falsă și niște extraterestri să găsească un alt limbaj al naturii. La urma urmei misticii au altă părere, spunând că universul

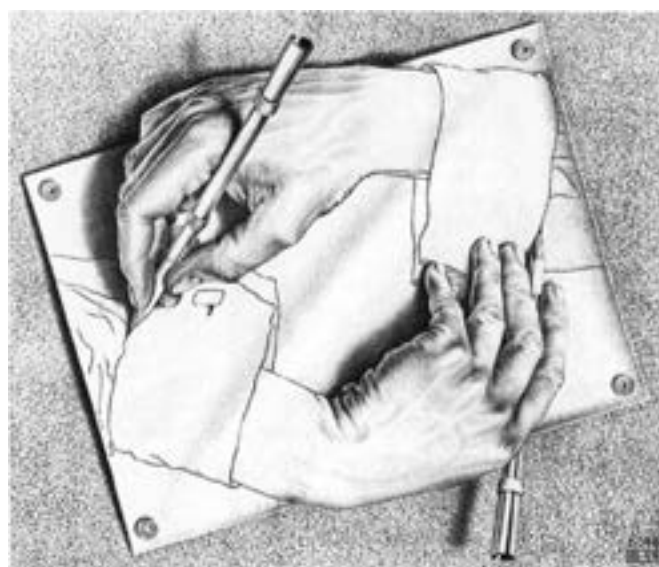


Figura 1.1: *O mână ce o desenează pe cealaltă, într-o cunoscută lucrare a artistului olandez Maurits Escher. Care mână este a Creatorului și care mână aparține creației sale? „Drawing Hands” (c) 2010 The M.C. Escher Company - the Netherlands. Toate drepturile rezervate. Imagine folosită cu permisiunea [www.mcescher.com](http://www.mcescher.com).*

este înțeles prin intuiție, iar poezii spun că universul ne „vorbește” prin frumusețea naturii. În cartea de față noi ne vom limita la limbajul matematicii pentru a descoperi tainele universului material.

Matematicianul Bertrand Russell (1872-1970) a încercat să încapsuleze toată logica matematicii în cartea sa „Principia mathematica”, pentru a demonstra *noncontradicția* și *completitudinea* matematicii, fără să reușească decât parțial. Pentru cei curioși, „Principia mathematica” este o carte atipică. După o scurtă introducere, urmează mii de propoziții logice care se deduc una din alta. Este ca și cum Russell ar încerca să ne convingă că universul are o structură logică, ce se reconstruiește folosind propoziții logice deduse una din alta, cu ajutorul unor reguli definite dinainte.

Foarte încântați, mulți oameni de știință au ridicat matematica în sfera abstractului, undeva dincolo de univers,

necontaminată de timp și spațiu. Cu toate acestea, matematicianul Kurt Gödel (1906-1978) a demonstrat (culmea, matematic!) că și matematica își are limitele ei. În esență, Gödel ne spune că matematica este un doar limbaj, care face parte din această lume și care nu poate descrie complet însăși lumea din care face parte. Cu alte cuvinte, nu ne așteptăm să explicăm întreg universul, odată ce facem parte din el. Nu este nevoie să fim filozofi ca să ne dăm seama că, în acest caz, nu putem explica *totul*.

Matematica este o parte a acestei lumi, la fel cum eu sau dumneavoastră suntem parte a ei. Relația  $1 + 1 = 2$  este valabilă pentru toată lumea. Dacă pun un măr lângă altul, am două, oricine este de acord cu asta, atâta timp cât nu se întâmplă nimic fizic cu merele. Și, fiindcă așa stau lucrurile pentru toți, cădem de acord și construim limbajul matematicii. Cu toate acestea, pentru că matematica este o construcție a lumii (în fond, o jonglerie cu mere), nu ne așteptăm ca ea să descrie întreaga lume din care face parte.

Nu numai obiectele pe care le folosim fac parte din lume, dar chiar și *imaginația noastră este contaminată de lume*, căci ea imită și copiază comportamentul acestei lumi. Poetul german Johann Wolfgang Goethe spunea că noi nu inventăm nimic, ci doar redescoperim. De aceea nu ne așteptăm ca matematica să poată explica *complet* însăși lumea din care face parte și care a creat-o, căci ar naște contradicții prin referințe la ea însăși.

Pentru a arăta de ce autoreferința este importantă, să considerăm enunțul „Propoziția aceasta este falsă” și să observăm că el nu este nici adevărat, nici fals. Dacă enunțul este adevărat, atunci propoziția este falsă, și deci enunțul însuși (la care face referire propoziția) este fals, ajungându-se la o contradicție. Dacă enunțul este fals, atunci propoziția trebuie să fie adevărată, ceea ce implică automat ca și enunțul (la care face referire propoziția) trebuie să fie adevărat. Ajungem iarăși la o contradicție. Vedem astfel că enunțul precedent nu este nici adevărat, nici fals. Observăm însă că acest enunț conține o referință la el însuși.

Într-un mod asemănător, Kurt Gödel a arătat la începutul secolului trecut că matematica conține anumite propoziții despre care nu se poate demonstra nici că sunt adevărate nici că sunt false, și deci este *incompletă*. Metoda lui Gödel este pe cât de interesantă, pe atât de eficientă. Astfel, Gödel urmărește ideile lui Russell, care recunoaște că matematica (și în general orice fel de limbaj) este o colecție de *simboluri*. Gödel însă are ideea genială de a considera că aceste simboluri sunt chiar numere!

Exemplul cel mai simplu este cel al jocului *opera Gusti*, un joc pe care copiii îl joacă pentru a-și transmite mesaje „secrete”. În acest joc, o parte din litere sunt înlocuite cu cifre, prin identificarea „operagusti”=„1234567890”. De exemplu, cuvântul „toiag” se scrie ca „91056”. Desigur, în cazul jocului nu avem cifre suficiente să acoperim toate literele, așa încât vom avea și cuvinte precum „5c123409” sau „c5d”.

În cazul logicii matematice, Gödel a rescris toate propozițiile logice cu numai șapte cifre, prin niște artificii ingenioase, care au minimizat simbolurile folosite. Toate simbolurile de bază din propozițiile logice, de exemplu „sau” și cuvântul „egal”, erau descrise de una dintre cele șapte cifre. În final, fiecare propoziție logică era exprimată

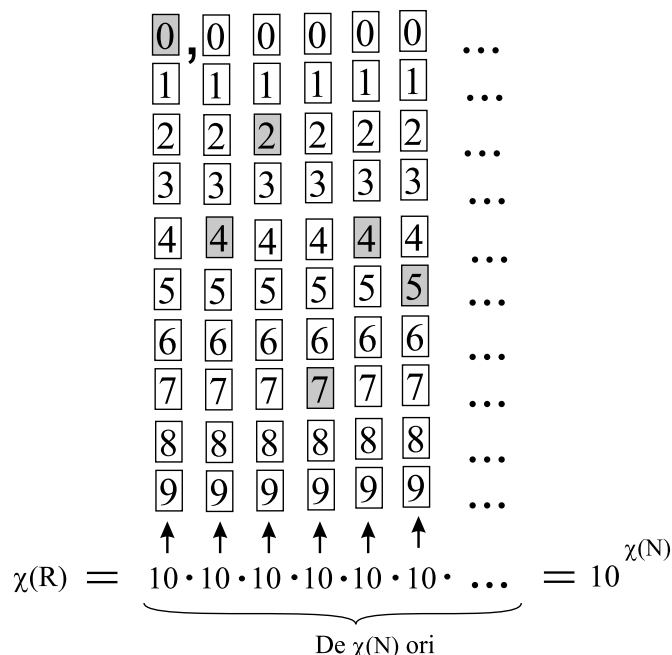


Figura 1.2: Câte numere reale avem? Pentru fiecare cifră a numărului real avem zece alegeri. În figură este exemplificat numărul real  $0,42745\dots$ . Numărul total  $\chi(R)$  de numere reale este un produs al acestor posibilități  $\chi(R) = 10 \cdot 10 \cdot \dots \cdot 10 \cdot \dots$ . Dacă notăm cu  $\chi(N)$  numărul infinit de elemente al mulțimii numerelor naturale, atunci avem  $\chi(R) = 10^{\chi(N)}$ . Interesant este că cele două numere  $\chi(N)$  și  $\chi(R)$  sunt infinități diferite, pentru că nu poate fi găsită o relație bijectivă între mulțimile pe care le reprezintă.

printr-o *succesiune de cifre*, adică un număr. Adevărarea unei propoziții este de asemenea reprezentată de un număr, iar negarea acelei propoziții este un alt număr. Să remarcăm și că o succesiune de propoziții devine o *succesiune de numere*. A demonstra sau a nega o propoziție se reduce la a găsi succesiunea de numere (conform unor reguli bine stabilite) care duce la unul din cele două numere care afirmă propoziția sau o neagă.

În principiu, ne-am aștepta ca orice propoziție care poate fi formulată să fie nu numai falsă sau adevărată, dar și *demonstrabilă*. În limbajul lui Gödel, aceasta înseamnă că pentru orice propoziție logică trebuie să găsim o succesiune de numere care conduce la numărul ce reprezintă afirmația sau negația propoziției. Gödel însă a arătat că există propoziții matematice pentru care nici unul dintre cele două numere (reprezentând afirmația sau negația propoziției) nu poate fi construit ca o succesiune de numere ale propozițiilor intermediare. Cu alte cuvinte, matematica este *incompletă*, existând propoziții despre care nu se poate demonstra nici că sunt false, nici că sunt adevărate.

Demonstrația lui Gödel folosește faptul că *metalimbajul* (adică limbajul logicii) a devenit acum o succesiune de numere, succesiune căreia i se poate și ei atașa un alt număr. Pe de altă parte, acest metalimbaj (limbajul matematicii), scris cu numere, se referă tocmai la numere! Ne aflăm atunci într-o situație contradictorie, când vrem să descriem o lume (lumea numerelor, a matematicii) cu

instrumente aparținând aceleiași lumi (tot numere, simbolurile noastre, dar care descriu de această dată metalimbajul). Propoziția construită de Gödel care nu poate fi demonstrată este de fapt enunțul menționat de noi deja, „Propoziția aceasta este falsă”, scris în metalimbajul numerelor și care se referă tot la numere.

Teorema de incompletitudine a lui Gödel nu a rămas în aria filozofiei. Astfel, matematicienii chiar au găsit o propoziție matematică care nu se poate demonstra nici că e falsă nici că e adevărată. Ea se referă la numărul de elemente pe care le au diferite mulțimi (finite sau infinite), număr ce poartă denumirea de *cardinal* în matematică.

Astfel, paradoxal, numărul infinit de elemente al mulțimii numerelor naturale (cardinalul numerelor naturale) este diferit de numărul infinit al elementelor mulțimii numerelor reale (cardinalul numerelor reale). Ciudat nu? Două numere infinite care sunt *diferite*. Acest lucru este posibil, pentru că nu există o relație bijectivă (unu la unu) între elementele celor două mulțimi (vezi figura 1.2).

Ne putem întreba dacă există mulțimi infinite al căror cardinal să se afle *între* cel al numerelor naturale și cel al numerelor reale (care este evident mai mare). Asemănător teoremei lui Gödel, matematicienii au arătat că nu vom demonstra niciodată răspunsul la această întrebare, pentru că ea nu are o succesiune de propoziții logice care să conducă la afirmarea sau negarea ei!

Este desigur fascinant să știm *cu siguranță* că nu putem demonstra vreodată răspunsul la o întrebare anume. În acest fel testăm în mod direct limitele cunoașterii noastre umane prin intermediul matematicii.

## 2. Forma Pământului

În această secțiune vom exemplifica metoda de lucru din fizică printr-o scurtă introducere în astronomie, pornind de la observații simple, accesibile și nouă, dar care ascund în ele esența lucrurilor.

Pentru grecii antici, răsăritul și apusul zilnic al Soarelui era o enigmă. Unii, de exemplu Xenofan (570-480 î.H.), credeau că Soarele este o colecție de pietre de foc, care se adună în fiecare dimineață ca să formeze Soarele, pentru a se despărți apoi seara. Alții credeau că Soarele este mereu altul în fiecare dimineață. Era greu de spus pe atunci ce este Soarele.

Astăzi, putem aduce următorul argument pentru natura Soarelui. Dacă am măsura mișcarea Soarelui pe cer, am găsi că ea este *uniformă*, cu o viteză de 5 grade pe oră. Aceasta conduce la o rotație de 360 de grade în 24 de ore (adică într-o zi), reprezentând unghiul subîntins de un cerc complet. Pentru noi este atunci ușor să presupunem că Soarele descrie un cerc complet și deci *ocolțește* Pământul (vezi Figura 1.3). Acesta este un exemplu în care am descrie un fenomen fizic (mișcarea Soarelui) printr-un model matematic (mișcarea circulară uniformă), pentru că modelul matematic explică în esență comportamentul observat.

Pentru vechii greci, argumentele de mai sus nu erau așa de clare, însă o parte dintre ei au ajuns la aceeași concluzie,

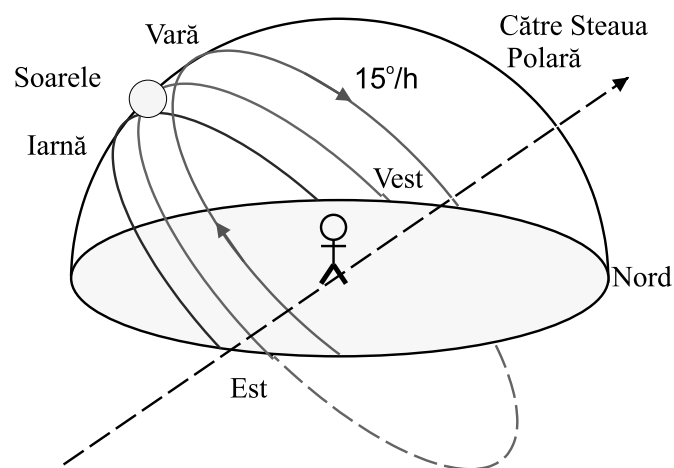


Figura 1.3: Mișcarea zilnică a Soarelui pe cer, în diverse anotimpuri. De observat că Soarele se mișcă aparent pe cer cu o viteză de  $15^\circ$  pe oră, adică exact  $360^\circ$  pe zi, atât cât îi trebuie ca să ocolească Pământul.

cum că Soarele ocolește Pământul. Faptul că Pământul poate fi ocolit a fost acceptat greu, căci el părea uriaș și nimeni nu îi văzuse capătul. Dar dacă poate fi ocolit, înseamnă că are formă. Indienii credeau că Pământul este plat ca o farfurie, purtat pe spate de un elefant. Mulți dintre filozofii greci credeau însă că Pământul este *rotund*, în special deoarece cercul era considerat o formă perfectă. Dintre ei s-au remarcat Pitagora (570 î.H. - 495 î.H.), Eudoxos (408 î.H. - 355 î.H.) și filozoful Aristotel (384 î.H. - 322 î.H.), care au contribuit la formarea acestor idei, adăugând informații despre eclipsele de Lună.

În momentele de eclipsă (care are loc mereu noaptea), Luna dispăre pentru moment de pe cerul nopții într-un con de umbră, iar Soarele nu se vede oricum. Cu toate acestea, putem încerca să aflăm poziția *extrapolată* a Soarelui de cealaltă parte a Pământului, dacă avem un ceas care să

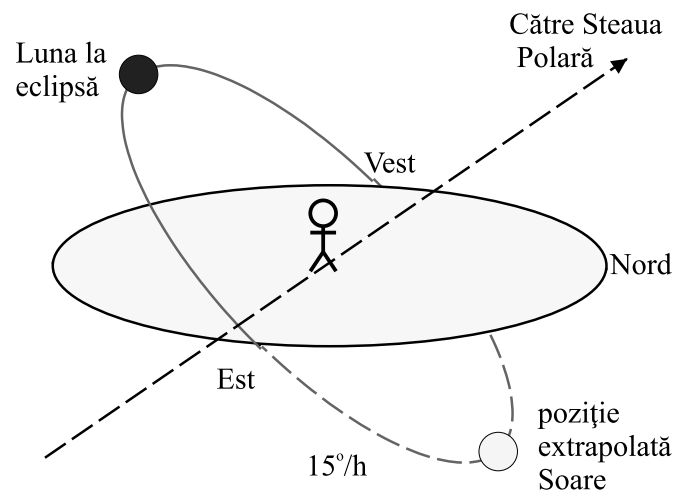


Figura 1.4: Poziția Lunii și a Soarelui în momentul eclipsei de Lună. Poziția Soarelui este obținută prin extrapolare, ținând cont că se mișcă cu o viteză aparentă de  $15^\circ$  pe oră.



indice ora din noapte, căci știm că Soarele se deplasează cu 15 grade pe oră pe un cerc în jurul Pământului. În acest fel vom calcula unde ajunge Soarele la orice oră din noapte, de cealaltă parte a Pământului în raport cu Luna, extrapolând poziția Soarelui pe cer.

Putem prin urmare măsura nu numai poziția Lunii în nopțile cu eclipsă de Lună, dar și poziția *extrapolată* a Soarelui (de cealaltă parte a Pământului) în același moment al nopții. Vom remarca atunci că poziția extrapolată a Soarelui este exact opusă celei a Lunii față de Pământ, deducând de aici că cei trei astri sunt aliniați în spațiu în timpul eclipsei (vezi figura 1.4).

Ajungem la aceeași concluzie ca și aceea susținută de Aristotel, care spunea că, în timpul eclipsei, *umbra* Pământului ajunge precis pe Lună și că ea este cea care ascunde Luna și creează efectul de eclipsă (vezi figura 1.9). Cum această umbră este rotundă, Pământul trebuie să fie rotund la rândul lui, a dedus Aristotel în scrierile sale. O demonstrație strălucită, am zice noi astăzi, căci astfel s-a născut întreaga astronomie. Dacă Pământul poate fi ocolit și e rotund, unde se află el și cât de departe sunt Soarele sau Luna? Dar stelele? Cât de mare este atunci Pământul?

Iată cum, pornind de la o simplă observație și gândind alfel decât majoritatea, câțiva oameni au putut avansa atât de mult în înțelegerea fenomenelor care ne înconjoară. Acum toți gândim ca Aristotel, dar să nu uităm să-i căutăm printre noi pe cei puțini care anticipează gândirea diferită a următoarelor milenii. *Să nu uităm să privim cu alți ochi lumea din jurul nostru.*

### 3. Dimensiunea Pământului

Să ne reamintim că expediția lui Cristofor Columb către Indii a fost finanțată de spanioli, după ce portughezii l-au refuzat. Se crede adeseori greșit că navigatorul Columb a fost refuzat de portughezi pentru că aceștia nu au crezut că Pământul e rotund, și ca atare Columb nu ar fi putut ajunge în Indii ocolindu-l.

De fapt, portughezii erau de acord că Pământul este rotund, la fel ca cei mai mulți învățați ai secolului XV, numai că toți susțineau și că *dimensiunile* Pământului sunt prea mari pentru a fi străbătute de corăbiile modeste ale vremii. „După părerea noastră, Indiile sunt prea departe pentru a le atinge ocolind Pământul”, trebuie să fi spus învățații. „O să mori de sete până acolo, sau de scorbut”, vor fi continuat ei. Columb însă nu a ascultat, pentru că el credea greșit că Pământul este mai mic decât în realitate, că Asia este mai mare și că se poate ajunge la ea de la celălalt capăt, i-a convins pe spanioli și a plecat. Din fericire pentru el, Columb a întâlnit America în calea sa, pentru că altfel ar fi murit sigur până să atingă pământul Indiilor! Ca să vedeți că descoperirile se fac și pornind de la premise false atunci când norocul ne stă în drum, ceea ce se întâmplă însă destul de rar.

De fapt, primul care a măsurat dimensiunile Pământului rotund a fost grecul Eratostene (276 î.H.-194 î.H.), cu mai

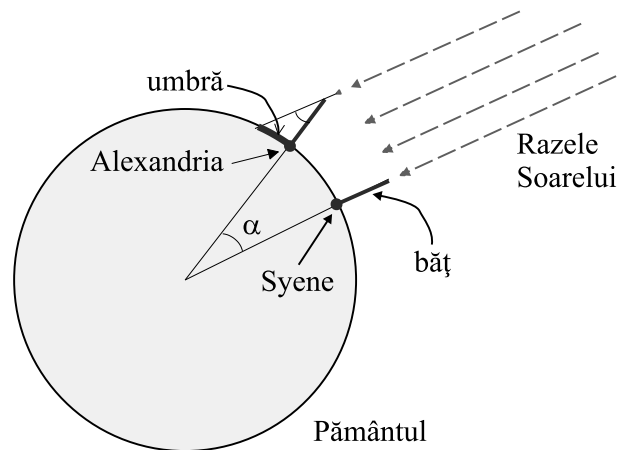


Figura 1.5: Cum a măsurat grecul Eratostene raza Pământului. Știind înălțimea bățului (2 m), umbra lui în Alexandria (25 cm) și distanța dintre Syene și Alexandria (800 de km), puteți estima raza Pământului?

mult de o mie de ani înaintea lui Cristofor Columb (1451-1506). Să vedem cum a măsurat Eratostene dimensiunile Pământului fără a-l înconjura și fără a avea la dispoziție laboratoare de milioane de euro.

Eratostene a observat umbra unui băț în două orașe egiptene, în același moment la amiază. Într-un oraș, denumit Syene, Soarele era drept deasupra capului, iar un băț vertical nu crea nicio umbră, pentru că era îndreptat chiar spre Soare (vezi figura 1.5). La aceeași oră însă, în Alexandria, orașul celebrei biblioteci, Soarele de amiază nu era drept deasupra capului. În consecință, bățul vertical, care avea să zicem o lungime de 2 metri, crea o umbră de aproape 25 de centimetri.

O astfel de situație se explică simplu, dacă vom considera că Pământul este rotund, iar Soarele este foarte departe (să zicem la milioane de kilometri). În acest caz, bățul ar fi *înclinat* diferit față de Soare, în funcție de poziția sa pe suprafața Pământului rotund și va genera umbre de lungimi diferite (vezi figura 1.5). Cunoscând distanța dintre cele două orașe (800 de km) și lungimea umbrei (25 de cm pentru un băț cu lungimea de 2m) Eratostene a estimat, folosindu-se de geometrie, că raza Pământului este de aproximativ 6000 km.

Curios însă, același efect s-ar obține și dacă Pământul ar fi *plat*, iar Soarele ar atârna la o înălțime nu prea mare de Pământ. În acest caz situația este asemănătoare cu cea în care Soarele ar fi precum un bec aflat la o înălțime mai mare decât becurile obișnuite. Și în această situație lungimea umbrei ar fi dependentă de poziția bățului aflat sub bec. Când ne aflăm sub Soarele-bec (situația orașului Syene), el se află drept deasupra capului și corpul nostru nu lasă nicio umbră. Când însă ne mutăm la o oarecare distanță (situația orașului Alexandria), vom avea o umbră care se lungeste pe măsură ce ne depărtăm. Luând în calcul distanța dintre cele două orașe și mărimea umbrei, putem calcula *înălțimea* la care s-ar afla Soarele-bec și am obține de asemenea câteva mii de kilometri. Care din cele două situații este adevărată?

Din păcate, numai aceste măsurători nu pot face diferența dintre cele două situații geometrice (Pământ plat

și Pământ rotund). Eratostene a trăit însă după Aristotel și cunoștea părerea maestrului că Pământul este rotund, așa că el a considerat acest caz, aflând astfel dimensiunea corectă a Pământului.

Două concluzii sunt demne de reținut din această poveste. Prima concluzie spune că este bine să vedem care sunt și părerile înaintașilor noștri, să nu credem că putem afla întreg răspunsul corect numai cu ceea ce cunoaștem noi. A doua concluzie, mai importantă, ne spune că unele experimente sunt „după colț”, adică pot fi făcute repede, odată ce premisele sunt ghicite corect. O umbră de 25 de centimetri este vizibilă pentru oricine, iar experimentul poate fi făcut de către un grup de școlari în excursie de la Baia Mare la București. Oare câte astfel de experimente nu s-ar putea face în fizică, psihologie sau biologie, numai dacă am ghici premisele corecte, numai dacă am ști după care „colț” să ne uităm?

#### 4. Mișcarea Pământului în jurul propriei axe

Am văzut în secțiunile precedente cum Aristotel a dedus în mod corect că Pământul este rotund și cum Eratostene i-a calculat raza. Am folosit însă pe ascuns în determinarea formei Pământului un lucru esențial, și anume că umbra Pământului se poate forma pe Lună, cu alte cuvinte că Luna este un *corp material* și nu doar o imagine proiectată pe cer. Astăzi acest lucru ni se pare normal, însă să nu uităm că, la începuturile astronomiei, vechii greci (cu metoda lor geometrică, la fel ca și babilonienii cu metoda aritmetică) nu aveau prea multe informații despre natura fizică a obiectelor cerești.

Convingerea că Luna, împreună cu celelalte corpuri cerești (Soare, stele, stele căzătoare etc.) sunt corpuri materiale (un fel de bolovani cerești) a câștigat în popularitate odată cu căderea unui mare meteorit lângă Aigos Potamoi, în anul 467 î.H. Evenimentul l-a determinat pe Anaxagoras din Clazomenae (500 î.H.-428 î.H.) să presupună că însuși Soarele este o piatră roșie fierbinte mai mare decât peninsula Peloponez! Astronomia a devenit astfel și astrofizică. De acum încolo ne vom ocupa nu numai cu măsurarea și modelarea mișcării acestor „pietre” prin spațiu, mișcare văzută de pe Pământ, dar și cu aflarea compoziției acestora.

În continuare vom vorbi despre determinarea aproximativă a proprietăților sistemului Pământ-Soare-Lună, folosind alte câteva exemple cheie din istoria astronomiei. Încercăm să-l facem pe cititor să înțeleagă că în multe cazuri măsurătoarea propriu-zisă poate fi efectuată de către cititor însuși, fără metode sofisticate. Ceea ce este cu adevărat revoluționar este *ideea* de a efectua o anumită măsurătoare. Așa cum am menționat deja, ideile noi și măsurătorile cruciale sunt „după colț”, trebuie să știm numai după care colț să ne uităm.

Dacă privim bolta cerească în timpul zilei și în timpul nopții, vom vedea cum obiectele de pe firmament (Soarele, Luna și celelalte stele fixate pe ea ca pe o cortină) se

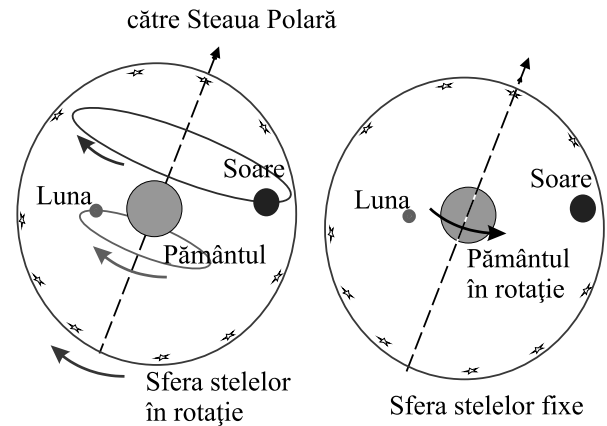


Figura 1.6: Stânga: Pământul este nemișcat, iar Luna, Soarele și sfera stelelor se rotesc în jurul Pământului sincron, cu o perioadă de 24 de ore. Dreapta: Pământul se învârtă în jurul unei axe orientate către Steaua Polară (în sens opus!) la 24 de ore, în timp ce Luna, Soarele și stelele rămân fixe pe parcursul unei zile.

mișcă încontinuu. Pornind de la premisa că Pământul este rotund și fix, vom deduce că această mișcare este de rotație în jurul Pământului. La intervale mai mari de timp (săptămâni sau luni), Soarele își schimbă poziția pe bolta cerească după cum se observă în figura 1.3. De asemenea, și mișcarea Lunii se modifică. Dar în decursul unei singure zile putem presupune cu o rezonabilă aproximație că întreaga boltă cerească se învârtă sincron în jurul Pământului.

Situația este oarecum surprinzătoare. Avem trei tipuri de obiecte celeste (Soarele, Luna și stelele), care se învârt sincron în jurul Pământului. De ce însă s-ar învârti sincron? Și de ce în jurul aceleiași axe, orientată înspre Steaua Polară? De ce aceste *coincidențe*?

Răspunsul pare natural astăzi. Astfel, este mult mai ușor să presupunem că Pământul se rotește zilnic în jurul unei axe sale, și atunci mișcarea zilnică a boltei cerești este doar relativă (vezi Figura 1.6). Pentru vechii greci însă, mobilitatea Pământului era o problemă serioasă de filozofie, așa încât ei n-au acceptat răspunsul așa de ușor.

La urma urmei, să ne imaginăm și noi că Pământul cu o rază de 6000 de km se rotește zilnic (vezi figura 1.7). Atunci, un corp de pe suprafața sa străbate în 24 de ore aproximativ 40 000 km, cam cât este circumferința Pământului. Aceasta înseamnă că viteza la suprafața Pământului este de ordinul a o mie și jumătate de km pe oră. Simțim noi aceste viteze amețitoare? Nu! În plus, dacă lășăm o piatră să cadă de la o înălțime de câțiva metri, ea ar trebui să rămână în urmă, pentru că Pământul se învârtă între timp sub piatră. Lăsată să cadă de la 20 de metri, piatra ar atinge Pământul după aproximativ două secunde. În acest timp suprafața Pământului se deplasează cu aproape un kilometru și deci piatra ar atinge Pământul un kilometru mai departe. Absurd, așa ceva nu se observă!

Remarcați că acest din urmă argument este *fizic* și el se numără printre cele care au ținut Pământul imobil în

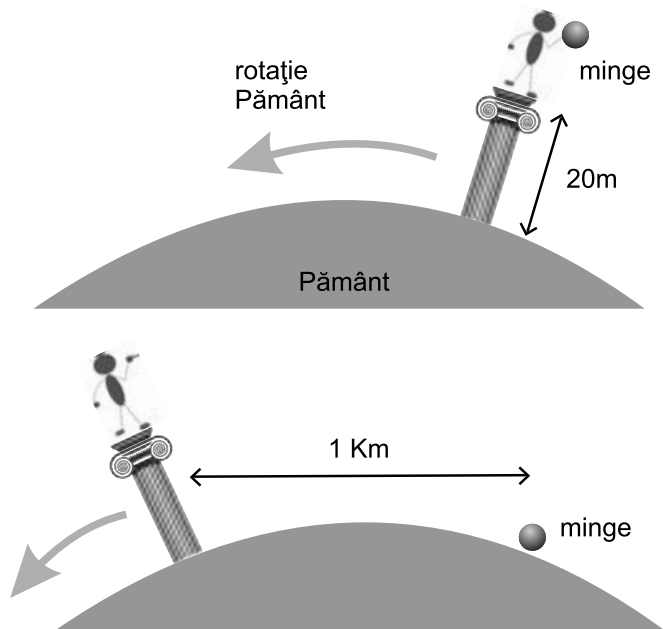


Figura 1.7: Efectul așteptat al rotației Pământului asupra căderii libere. În dreapta sus este prezentată o persoană așezată pe o coloană, și care lasă să cadă liber o minge. Coloana are aproximativ 20 de metri iar timpul de cădere este de aproximativ două secunde. În acest timp de cădere, dacă Pământul s-ar învârti, atunci coloana s-ar deplasa aproximativ un kilometru până ca mingea să atingă Pământul. Evident, un astfel de efect nu este observat, deci s-ar putea deduce că Pământul nu se învârtă în jurul axei sale. Și totuși, astăzi știm că Pământul se învârtă. Unde este greșeala?

modelele astronomilor mai mult de o mie de ani. Cu alte cuvinte, nu a fost vorba de vreo ignoranță religioasă, deoarece chiar și unii oameni de știință argumentau în acest fel că Pământul nu se poate roti. La fel cum, peste ani, alți oameni de știință au argumentat că nici un avion nu se poate ridica de la Pământ pentru că este mai greu decât aerul, sau la începutul erei automobilului, că omul nu va supraviețui unor viteze mai mari decât cele ale căruței.

A trebuit să vină Galileo Galilei (1564-1642) să afirme că totuși Pământul se învârtă în jurul axei sale. Soluția lui spune că piatra, odată lăsată să cadă liber de la câțiva metri înălțime, primește un impuls suplimentar în direcția de rotație a Pământului. Aceasta face ca piatra să pornească având viteză mare într-o mișcare paralelă cu Pământul, perfect *sincron* cu el, în așa fel încât nouă să nu ni se pară că ea rămâne în urmă în timpul căderii.

Impulsul imprimat de Pământ pietrei este folosit în prezent la lansarea rachetelor de pe Pământ, care se face în locuri cât mai aproape de Ecuator (un exemplu este Cape Canaveral, care se află în Florida, în sudul Americii), în așa fel încât viteza imprimată de Pământ să fie cât mai mare. Iar noi, pe suprafața Pământului, ne deplasăm *într-adevăr* cu o mie de kilometri pe oră odată cu rotația Pământului, fără să simțim însă incredibila rapiditate a acestei mișcări.

## 5. Avantajul practic al stelelor fixe

În secțiunea precedentă am construit un prim sistem cosmologic, cel în care Luna, Soarele și stelele sunt fixe în spațiu iar Pământul rotund se învârtă în jurul axei sale cu o perioadă de 24 de ore. După ce contemplăm pentru scurt timp simplitatea acestui sistem, ne vom întreba, ce se întâmplă pe perioade mai mari de timp? Desigur, într-o zi Pământul se învârtă în jurul axei sale, ceea ce face ca Soarele, Luna și bolta de stele să se deplaseze *aparent* pe cer în sens invers, deși ele sunt fixe în spațiu. Dar într-o lună? Dar într-un an? Își schimbă Soarele, Luna și stelele poziția fixă în spațiu (față de Pământul care se învârtă) pe perioade lungi de timp?

Răspunsul trebuie să fie afirmativ deoarece în decursul unui an de zile Soarele își schimbă poziția pe cer. În timpul verii el ajunge deasupra noastră, iar în timpul iernii are în mod constant o poziție mult mai joasă pe bolta cerească. Majoritatea stelelor nu își schimbă însă poziția față de Pământul rotitor pe durata mai multor ani, sau cel puțin nu atât de mult încât s-o putem vedea cu mijloacele noastre simple.

Eliminând câțiva aștri cerești strălucitori (denumiți *planete*, de la cuvântul grecesc pentru „rătăcitor”), restul de mii de stele fixe își păstrează, pe tot parcursul anilor cuprinși în viața unui om, aceeași poziție față de Pământul rotitor, deci par fixe în spațiul aproape infinit. De fapt, de aceea se și numesc *stele fixe*, pentru că ele par bătute în cuie în spațiul îndepărtat. Mișcarea lor aparentă (zilnică) pe bolta cerească se datorează doar rotației Pământului.

Deoarece suntem interesați de mișcările Lunii și Soarelui pe un interval de timp de ordinul anilor sau lunilor, o idee bună ne-ar fi de folos. Ce-ar fi dacă mișcarea Lunii am măsura-o nu raportată la Pământ, pentru că acesta se învârtă în jurul axei sale, ci *raportată direct la poziția stelelor fixe*? Acest lucru este ușor de realizat pentru Lună, căci pe ea o vedem noaptea în marea de stele (vezi figura 1.8). În acest fel nu mai trebuie să măsurăm înclinarea Lunii față de orizont și să corectăm cu mișcarea de rotație a Pământului, ci măsurăm direct poziția Lunii față de stelele de pe bolta cerească.

Uitându-ne la Lună noaptea pe cer, nu avem decât să-i identificăm poziția în raport cu constelațiile în jurul cărora se află și să-i desenăm apoi poziția pe harta cerească. Dacă unim punctele ce reprezintă poziția Lunii, vom avea mișcarea aparentă a Lunii pe cer raportată la stelele fixe. O astfel de manieră de lucru are un avantaj *experimental* major: putem măsura foarte ușor poziția Lunii (sau a planetelor) raportată la stelele fixe și nu trebuie să ne mai pese mult de rotația precisă a Pământului. Aici natura ne-a ajutat, căci harta stelelor fixe rămâne neschimbată pentru ani de zile.

Dacă notăm în fiecare noapte poziția Lunii față de stelele fixe, observăm că ea străbate într-o lună întreaga boltă cerească. Aceasta înseamnă că Luna nu este fixă în spațiu, ci efectuează o mișcare circulară uniformă, pe o sferă cu

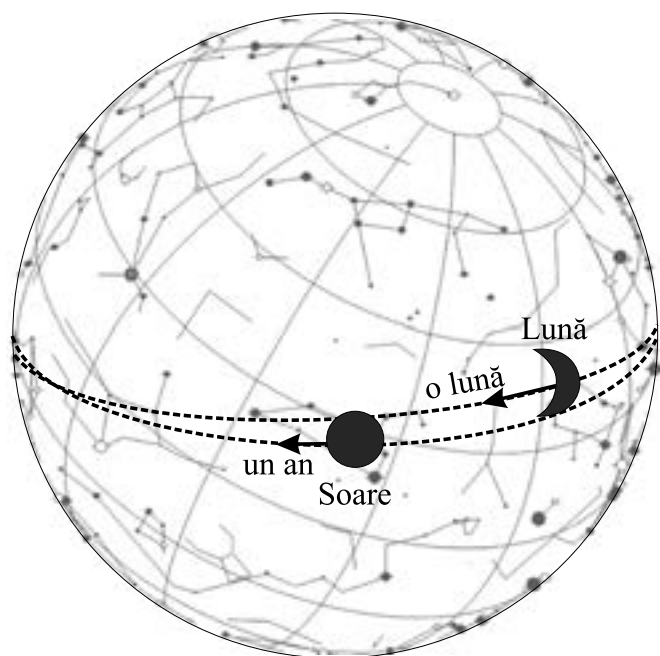


Figura 1.8: *Mișcarea Lunii și Soarelui în marea de stele fixe. O astfel de mișcare poate fi prezentată pe o hartă cerească ce se citește astfel: noi ne aflăm în centrul sferei (unde este virtual Pământul rotitor) și privim în afară spre suprafața sferei (pe care sunt desenate stelele și constelațiile). În timpul zilei, lumina stelelor pe care ar trebui să le vedem este eclipsată de lumina foarte puternică a Soarelui, de aceea doar Soarele este vizibil, nu și stelele.*

centrul aflat pe Pământ, cu o perioadă de o lună (vezi figura 1.8). Cum mărimea *aparentă* a Lunii pe cer nu se schimbă, nu rămâne decât să tragem concluzia că Luna se învâрте în jurul Pământului pe un cerc, la distanță *constantă* față de Pământ, cu o perioadă a mișcării egală cu o lună.

Aceleași considerații se aplică și Soarelui, dacă folosim poziția sa *extrapolată* de la miezul nopții (ora 24), pentru a raporta mișcarea lui la bolta stelelor fixe. Și Soarele se deplasează în jurul Pământului rotitor, tot la distanță constantă față Pământ, pentru că mărimea aparentă a Soarelui nu pare să se schimbe (dacă distanța s-ar fi schimbat, atunci Soarele ar fi apărut când mai mic cand mai mare). Este interesant de remarcat că mișcarea anuală a Soarelui și cea lunară a satelitului Pământului au loc în planuri foarte apropiate (vezi figura 1.8).

## 6. Dimensiunea Lunii

Luna are pe cer o dimensiune unghiulară de o jumătate de grad, ușor de măsurat. *Distanța* până la Lună pare însă imposibil de măsurat, atâta timp cât nu cunoaștem mărimea ei. Astfel, Luna e mai aproape de Pământ și mai mare, sau mai departe și mai mică. Cine poate ști,

atâta timp cât nu ne ducem acolo? Este atunci cu atât mai surprinzător că vechii greci au putut măsura această distanță, numai pe baza unor argumente corecte. Iar întrebarea este, cum de au reușit?

Unul dintre vechii greci, Aristarh din Samos (310 î.H.-230 î.H.), a pornit de la observații asupra eclipsei de Lună. După cum am menționat, eclipsa de Lună este datorată umbrei Pământului care se lasă peste Lună (vezi figura 1.9). Presupunând că Soarele este din nou la distanțe foarte îndepărtate, umbra lăsată de Pământ va fi cilindrică, iar Luna va trebui să treacă prin această zonă de umbră în timpul eclipsei. Zona de umbră are însă aproximativ dimensiunea Pământului, considerând Soarele la distanțe foarte mari.

Un prim lucru care se observă într-o eclipsă totală de Lună este faptul că umbra lasată de Pământ pe Lună este mai mare decât Luna. Pământul este deci probabil mai mare decât Luna. Urmărind evoluția umbrei lăsată de Pământ pe Lună în timpul eclipsei (sau raza de curbură a umbrei în raport cu cea a Lunii), se poate estima dimensiunea Lunii în raport cu cea a umbrei lăsată de Pământ, obținându-se un factor apropiat de doi.

Considerând că spațiul delimitat de umbră are o formă *cilindrică* (circumferința bazei cilindrului este egală cu cea a Pământului), putem deduce și noi, ca și Aristarh din Samos, că Luna trebuie să fie aproximativ jumătate cât Pământul (vezi partea de sus a figurii 1.9). Astăzi știm că Aristarh din Samos a greșit cu un factor de 2, căci lumina ce vine de la Soare nu creează chiar o umbră cilindrică, ci una *conică* (pentru că Soarele este foarte mare, vezi partea de jos a figurii 1.9), dar aceasta a devenit clar mai târziu. Astfel, Luna este de aproximativ patru ori mai mică în diametru decât Pământul.

Aristarh din Samos a trăit înaintea lui Eratostene și nu a cunoscut dimensiunea Pământului. Știind însă acum că Pământul are o rază de aproximativ 6000 km, putem

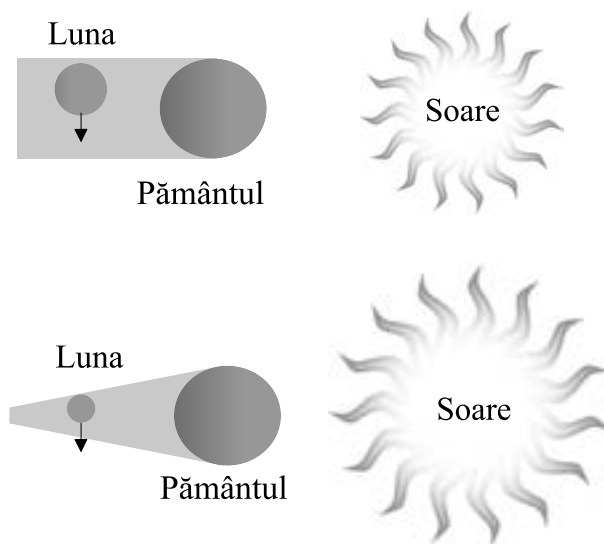


Figura 1.9: *Eclipsa de Lună în interpretarea lui Aristarh (sus) și în interpretarea modernă corectă (jos). În ambele cazuri Luna intră în conul de umbră al Pământului, atâta doar că Aristarh credea că umbra are o formă cilindrică.*