

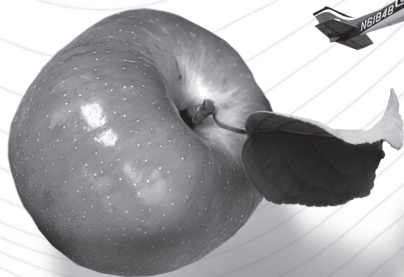
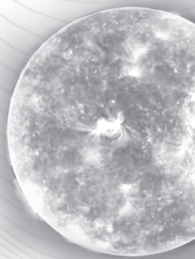
FRUMUȘEA CĂDERII



O VIAȚĂ
ÎN CĂUTAREA
GRAVITAȚIEI

**CLAUDIA
DE RHAM**

**FRUMUȘEȚA
CĂDERII**



**O VIAȚĂ
ÎN CĂUTAREA
GRAVITAȚIEI**

Traducere din limba engleză
de Constantin Dumitru-Palcus

TREI

Editori:
Silviu Dragomir
Magdalena Mărculescu
Vasile Dem. Zamfirescu

Director editorial nonfiction:
Victor Popescu

Redactare:
Raluca Hurduc

Ilustrație și design copertă:
Andrei Gamarț

Director producție:
Cristian Claudiu Coban

Dtp:
Gabriela Anghel

Corectură:
Lorina Chițan

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României
DE RHAM, CLAUDIA

Frumusețea căderii : o viață în căutarea gravitației / Claudia de Rham ; trad.
din lb. engleză de Constantin Dumitru-Palcus. - București : Editura Trei, 2025
Conține bibliografie
ISBN 978-606-40-2603-3

I. Dumitru-Palcus, Constantin (trad.)

53

Titlul original: *The Beauty of Falling. A Life in Pursuit of Gravity*
Autor: Claudia de Rahm

Copyright © 2024 by Claudia de Rham

Copyright © Editura Trei, 2025
pentru prezenta ediție

O.P. 16, Ghișeu 1, C.P. 0490, București
Tel.: +4 021 300 60 90 ; Fax: +4 0372 25 20 20
e-mail: comenzi@edituratrei.ro
www.edituratrei.ro

ISBN: 978-606-40-2603-3

Micușilor mei trol

Cuprins

<i>Introducere. O călătorie în lumea gravitației.....</i>	<i>9</i>
1. Un limbaj universal	21
Universalitatea vitezei luminii.....	24
Famosul experiment eşuat al lui Michelson și Morley	30
Rotații în spațiu și timp.....	37
Principiul echivalenței și universalitatea gravitației	41
2. Cât de curbată este realitatea.....	49
Firul din țesătura spațiu-timpului	51
O geometrie spațio-temporală	57
O linie dreaptă într-un spațiu-timp curbat	59
3. Gravitația și forța dinăuntru	66
Senzația de gravitație	70
Forțele mareice	75
Un mesager al gravitației	80
Întrezărind glumina.....	89
Einstein a avut dreptate! Sau nu?.....	100
4. Prezicerea propriei noastre căderi.....	105
Gravitația la limită	113
Singularități.....	115
Adoptarea scării Planck.....	120
Călătoria noastră în interiorul unei găuri negre	125
Călătoria noastră spre începuturile timpului.....	132

5. Extinderea în neant.....	137
Un Univers misterios în expansiune continuă.....	143
O expansiune accelerată	148
Energia întunecată	154
Constanta cosmologică a lui Einstein	160
Scufundarea în vid	162
Cea mai mare discrepanță din istoria științei.....	169
6. Gravitonul, ce mai particulă!	176
Până acum, totul e bine	177
O gravitație pe un ton mai puțin grav	179
Fantoma gravitației masive.....	189
De la dimensiuni suplimentare la gravitoni masivi.....	197
Gâdilarea unui elefant	206
Graffiti pe cer	213
7. Viețile noastre în căutarea gravitației.....	219
Cât de ușoară este gravitația	226
Doar (spațiu-)timpul ne va spune	228
Pi-ul din cer	233
Natura cuantică irevocabilă a gravitației	239
De la unde la particule	242
Călătoria finală	246
Concluzie: Creaturi ale gravitației.....	256
<i>Bibliografie</i>	261

Introducere

O călătorie în lumea gravitației

Gravitația. Un concept atât de familiar, prezent în toate limbile și culturile, dar pe care oamenii de știință se străduiesc să îl înțeleagă de milenii. Este miracolul suprem care leagă totul, pretutindeni și pentru totdeauna în Univers. Universală în toate sensurile. Ne putem gândi la ea ca la forța ascunsă care ne ține bine ancorați pe Pământ, la motivul pentru care Pământul se rotește pe orbită în jurul Soarelui sau la interacțiunea care a permis formarea Căii Lactee și a sutelor de miliarde de stele. Dar acest lucru abia dacă sugerează adevărata sa semnificație. Gravitația este motivul pentru care Universul însuși poate exista și evolua. Ea transformă spațiul și timpul din simple piese de decor în actori centrali ai dramei realității în desfășurare. Pe măsură ce acceptăm gravitația, nu ne putem abține să nu ne confruntăm cu ea: sărind, plutind sau zburând în timp ce urmărim scurte momente de eliberare de sub comanda ei. În ceea ce mă privește, am urmărit gravitația toată viața mea, căutând, ca mulți oameni de știință care m-au precedat, să-i deslușesc cele mai profunde mistere.

Imaginează-te singur în cabina de pilotaj a unui avion mic, monomotor, așteptând cu răbdare pe pista de rulare semnalul de la controlul traficului aerian. Trei

cuvinte simple, „liber la decolare“, rezonează ca o parolă magică, deblocând o serie precisă de evenimente care vor realiza ceea ce ar fi fost imposibil cu 120 de ani în urmă: ridicarea și menținerea în aer a unui obiect de o tonă. În timp ce aeronava se deplasează pe pistă, ești împins în spătarul capitonat al scaunului, accelerând pe orizontală până la o viteză de 100–200 km/h. În mod ironic, această viteză orizontală este cea care va permite presiunii de sub aripi să învingă atracția verticală a gravitației și să te ridice spre cer. Pe măsură ce urci la altitudinea de croazieră, chiar și cea mai mică turbulență zguduie micul avion. Pentru o clipă, te simți ca și cum ai fi prins în capcană într-un glob de zăpadă care e scuturat de mâna unui uriaș — până când îți amintești că o mică mișcare a cârmei, o ușoară reechilibrare sau o răsucire subtilă a eleroanelor este tot ce ai nevoie pentru a prelua controlul și a naviga lin pe curentul de aer, împins simultan în sus de presiune și tras în jos de gravitație.

Dacă să te înalți deasupra norilor nu e pe gustul tău, poate că ai prefera să te imaginezi scufundat în albastrelul adânc, amestecându-te cu mii de pești din reciful de corali, la câteva zeci de metri sub suprafața apei. În timp ce contempli seninătatea acestei lumi subacvatice, ești cufundat într-o liniște întreruptă doar de sunetele pocniturilor vibrante ale recifului de corali și de propria ta respirație, pe măsură ce inspiri încet din rezervorul de oxigen și expiri bule mici care ies la suprafață. Cu fiecare respirație, corpul tău se balansează ușor în sus și în jos cu câțiva centimetri, în timp ce presiunea aerului din plămâni încearcă să compenseze forța gravitațională și

masa coloanei de apă care apasă pe fiecare celulă din corpul tău.

Zborul la altitudine înaltă și scufundările în adâncul mării sunt două dintre cele mai palpitate moduri de a sfida gravitația, cel puțin aici, pe Pământ. Dar, pentru a obține senzația supremă de imponderabilitate, nimic nu se compară cu plutirea în spațiu, când pare că ai scăpat cu totul din ghearele gravitației. Sentimentul de libertate nu mai este o iluzie — nu există sfori de care să tragi sau presiuni pe care să le contracarezi. Observând Pământul de pe orbită, poți savura libertatea absolută a căderii libere, un concept adânc înrădăcinat în modul în care înțelegem gravitația, chiar dacă rămâne un lux de care puțini au avut ocazia să se bucure.

În viața mea, am cunoscut bucuria de a zbura și de a face scufundări și am fost la un pas de a ajunge în spațiul cosmic. Dar, până la urmă, nu avem nevoie de un avion de lux, de un echipament de scufundare sau de o navetă spațială pentru a experimenta gravitația. De fapt, fie că facem ceva simplu ca aruncarea unei mingi, legănatul într-un hamac sau aruncarea de pietre pe suprafața apei, suntem cu toții oameni de știință care desfășoară propriile experimente personale și trag propriile concluzii despre acest fenomen universal, dar misterios.

Dar ce se întâmplă mai exact în acele momente? Ce este gravitația? Pare o întrebare atât de naivă, dar răspunsul pare să fie mereu ascuns în spatele unor legi abstracte ale fizicii. Fenomenele fizice sunt adesea prezentate ca un set de reguli fundamentale obscure — principiul lui Arhimede, legea inversului pătratului a lui Newton, principiul lui Bernoulli și altele asemenea — pe care natura

trebuie să le respecte în mod incontestabil și rigid. Aceste legi sunt, bineînțeles, esențiale pentru modul în care înțelegem lumea și structura realității. Ele au dezvăluit modul în care flotabilitatea permite bărcilor să plutească și cum diferența de presiune cauzată de mișcarea aerului sub aripi permite păsărilor și avioanelor să navigheze pe cer. Acest lucru ne-a permis să trimitem pe Lună un bărbat și, sperăm, în curând o femeie. Totuși, prezentarea acestor legi ca fiind cioplite în piatră contrazice istoria noastră științifică. Departe de a fi imuabile, înțelegerea și aprecierea noastră cu privire la aceste legi — ce înseamnă ele, de unde provin și ce se află în spatele lor — se dezvoltă continuu sub ochii noștri.

Galileo Galilei, Johannes Kepler, Sir Isaac Newton, Albert Einstein, Stephen Hawking, Sir Roger Penrose, Andrea Ghez și nenumărați alți oameni de știință străluciți au adus fiecare o nouă perspectivă asupra înțelegerii gravitației, dar călătoria noastră este departe de a se fi încheiat. Așadar, gândește-te la această carte ca la o invitație de a mi te alătura în încercarea de a descoperi semnificația gravitației, de a înțelege legătura ei cu structura realității. Din fericire, în cea mai mare parte nu vom întreprinde această aventură singuri. În schimb, vom fi ghidați de unele dintre cele mai luminate minți din știința ultimelor secole — asta cel puțin până când vom ajunge la marginea hărții, unde vom face câțiva pași de explorare în necunoscut. Călătoria noastră va începe, totuși, pe un teritoriu bine cartografiat, cu câțiva tovarăși de încredere.

Realizând că gravitația trebuie să fie o forță universală, care acționează asupra tuturor și îi accelerează

pe toți în același mod, indiferent de masa lor, Galileo, Kepler și Newton au furnizat prima piesă crucială a acestui puzzle. Această percepție a fost posibilă datorită unei noi perspective asupra a ceea ce înseamnă *să fii liber*, o perspectivă care a renunțat la secole întregi de dogmă aristotelică și a transformat radical conceptul de *inertie*.

Această nouă perspectivă a ieșit la iveală în 1632, odată cu publicarea lucrării astronomului și fizicianului italian Galileo Galilei *Dialog despre cele două sisteme principale ale lumii* (*Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*). În acest dialog, Galileo a susținut o nouă revoluție copernicană, care nu se limita la simpla negare a faptului că Pământul ar ocupa un loc central în sistemul solar, ci respingea complet ideea că *vreo* persoană sau *vreun* obiect ar putea deține vreodată o poziție privilegiată în ceea ce privește legile naturii.

Pentru a susține acest argument, Galileo a privit lumea prin ochii unui marinar închis în cabina principală de sub puntea unei nave în mișcare. Incapabil să vadă lumea de afară, marinarul s-a distrat urmărind mișcarea „unor muște și fluturi” cu care împărțea cabina. Galileo a realizat că marinarul nu ar fi putut să-și dea seama dacă nava se afla în repaus sau în mișcare cu viteză constantă, cel puțin nu observând aceste mici animale zburătoare. De ce? Pentru că, dacă nava se mișcă cu viteză constantă, la fel se întâmplă și cu tot ce se află la bord, inclusiv cu aerul în care zboară muștele și fluturii. Marinarul, prins sub punte, poate observa doar mișcarea creaturilor zburătoare în raport cu interiorul cabinei navei. Galileo a folosit acest experiment mental, care a evidențiat importanța mișcării *relative*, pentru a explica cum se poate ca

Pământul să se rotească fără ca noi să simțim acest lucru. Mai mult, odată ce recunoaștem că nu putem face diferența între puntea inferioară a unei nave în repaus și cea a unei nave în mișcare uniformă, putem deduce că legile fizicii ar trebui să fie aceleași pentru orice observator care se mișcă având o viteză constantă, indiferent de valoarea acesteia.

Tocmai această noțiune de „relativitate galileeană” — conștientizarea faptului că legile naturii sunt aceleași, indiferent de cine le descrie — este consacrată de prima lege a mișcării a lui Newton, care susține că orice obiect va rămâne în repaus sau în mișcare uniformă pe o linie dreaptă, cu excepția cazului în care este obligat să-și schimbe starea prin acțiunea unei forțe externe.* Newton a înțeles că a fi liber înseamnă privilegiul de a continua nestingherit, urmându-ți călătoria cu aceeași viteză, în mod uniform. Pornind de la lucrarea lui Kepler, care a dezvoltat legile mișcărilor planetare, această perspectivă avea să conducă mai târziu la legea gravitației universale a lui Newton din 1687, cunoscută și sub numele de legea inversului pătratului. Conform acestei legi, forța de gravitație exercitată între două particule masive (adică particule care au masă) este o forță *universală* și *instantanee*, a cărei intensitate scade proporțional cu pătratul distanței dintre cele două particule.

* Această idee a înlocuit noțiunea aristotelică de *inerție* — dorința de a încetini și de a ajunge la o stare de repaus absolut. Spre deosebire de Aristotel, care credea că forțele sunt necesare pentru a menține viteza, Newton și-a dat seama că *forțele* duc la *accelerare* (schimbarea vitezei). În viața noastră de zi cu zi, frecarea cu aerul și cu solul acționează ca o forță, încetinindu-ne în mod natural (decelerație sau accelerație negativă). Cu toate acestea, în spațiul cosmic, unde nu există aer și nici frecare, obiectele pot fi libere și își pot menține o viteză uniformă.

Legea lui Newton, așa cum mulți dintre noi au fost învățați, descrie modul în care un obiect, atunci când este lăsat să cadă, este atras în mod inexorabil de masa Pământului. Dar natura universală a gravitației se extinde mult dincolo de acest fenomen simplu. Ea se aplică la tot și la toate, indiferent de obiect, indiferent de distanță. În 1798, Henry Cavendish a fost printre primii care au testat-o în mod oficial într-un laborator și, la mai bine de trei secole de la descoperirea sa, legea inversului pătratului a lui Newton a fost analizată cu o precizie impecabilă, de la distanțe mai mici de o zecime din grosimea unui fir de păr uman până la distanțe care se întind pe miliarde de kilometri. De fapt, legea gravitației universale a lui Newton este fundamentală într-o asemenea măsură, încât poate fi folosită în continuare pentru a descrie modul în care gravitația a guvernat cea mai mare parte a evoluției Universului nostru, de la colapsul gravitațional al materiei întunecate la formarea roiurilor de galaxii și crearea sistemului solar.

Au trecut secole până când dovezile observaționale au început să pună sub semnul întrebării legea gravitației a lui Newton. Cu toate acestea, în retrospectivă, ideea că atracția gravitațională între oricare două obiecte se produce *instantaneu* ar fi trebuit să tragă un semnal de alarmă. Conform legii simple a lui Newton, dacă ar apărea două particule, acestea ar fi *imediat* atrase una spre cealaltă, fără nicio întârziere. Indiferent de părerea ta despre atracție, știm cu toții că acest fenomen nu poate fi imediat. Chiar și atunci când vine vorba de dragoste la prima vedere, trebuie mai întâi să „vezi” cealaltă persoană (adică să „comunici”, chiar dacă nu verbal) pentru

ca atracția să aibă loc. Newton însuși, într-o scrisoare adresată lui Richard Bentley, și-a exprimat nemulțumirea față de conceptul unei legi instantanee: „Este de neconceput că materia brută inanimată ar trebui (fără medierea a altceva care nu este material) să opereze și să afecteze altă materie fără contact reciproc; așa cum trebuie să fie dacă gravitația, în sensul lui Epicur, este esențială și inerentă în ea. Și acesta este motivul pentru care am dorit să nu-mi atribuiți gravitația {înnăscută}”⁴¹.

Călătoria noastră va începe două secole mai târziu, când oamenii de știință americani Albert Michelson și Edward Morley au dezvăluit rezultatele celebrului lor „experiment eșuat”, inițiind o nouă revoluție științifică. La scurt timp după aceea, Einstein a introdus noi idei referitoare la relativitate în modul în care înțelegem gravitația: mai întâi a prezentat noțiunea de relativitate specială, care a înlocuit cinematica lui Galileo, iar apoi a dezvăluit gravitația așa cum o înțelegem astăzi prin teoria relativității generale. Ghidați de aceste teorii, vom descoperi o structură cu totul nouă a fizicii și a înțelegerii Universului nostru, în care gravitația se identifică în mod fundamental cu însăși structura spațiului și a timpului, împletite și unificate.

Astăzi, a trecut mai mult de un secol de la descoperirile lui Einstein, iar relativitatea generală este mai puternică decât oricând. Gravitația a fost testată în mod exhaustiv, inclusiv în unele dintre cele mai extreme medii, iar dovezile concordă în mod neîndoielnic cu predicțiile lui Einstein. Însăși forța din cadrul gravitației a fost detectată datorită undelor gravitaționale. În același timp,

am aflat, de asemenea, mult mai multe despre natura cuantică a lumii noastre datorită fizicii atomice, nucleare și fizicii particulelor, datorită chimiei cuantice și a numeroaselor progrese tehnologice ale erei electronice și informatice. Odată cu aceste progrese, noi idei și teorii apar în mod constant în efortul nostru de a da sens lumii în care trăim. Și totuși, până în prezent, niciuna nu a depășit teoria relativității generale a lui Einstein, în ciuda faptului că este evident nevoie de o nouă fizică. Pentru că există un lucru cu privire la care, încă de la început, relativitatea generală însăși a fost clară: de la un punct încolo, teoria trebuie să clacheze, căci un strat nou al fizicii așteaptă să fie dezvăluit. Din acest eșec rezultă oportunitatea de a cerceta și de a aprecia natura la un nivel și mai profund. Pe măsură ce ne continuăm călătoria, vom vedea cum gravitația, privită dintr-o perspectivă mai modernă, poate fi considerată și ca manifestarea unei particule fundamentale — gravitonul — așa cum electromagnetismul este manifestarea fotonului, particula fundamentală a luminii. În același mod în care putem „vedea” *lumina* în timp ce undele electromagnetice se propagă prin spațiu și timp, putem acum „auzi” undele gravitaționale (sau *glumina*, așa cum le vom numi aici) în timp ce acestea perturbă însăși structura spațiu-timpului. În prezent, am observat undele gravitaționale cu ajutorul mai multor instrumente diferite, iar realitatea *gluminii* a devenit incontestabilă. Detectarea sa oferă o oportunitate de neegalat de a descifra numeroasele mistere pe care Universul nostru le ascunde încă. Care este originea Universului? Care sunt componentele întunecate ale Universului, care explică structura și evoluția acestuia, dar care nu pot fi detectate

direct cu instrumentele noastre? Care este soarta noastră? Aceste întrebări profunde cer insistent răspunsuri. Și cine nu ar vrea să meargă pe această pistă?

În cele din urmă, călătoria noastră ne va duce la marginea hărții. Deși teoria relativității generale a lui Einstein a oferit răspunsuri naturale și elegante la unele dintre cele mai complexe întrebări legate de natura gravitației, ea a revelat, de asemenea, mai multe enigme cu care continuăm să ne confruntăm. Cum se face că particulele cunoscute, pe care le înțelegem atât de bine în acceleratoarele noastre subterane de particule, afectează Universul în moduri pe care nici măcar nu am început să le înțelegem?

Pe măsură ce încercăm să reconciliem evoluția Universului nostru cu natura cuantică fundamentală a lumii, vom fi nevoiți să reconsiderăm gravitația la un nivel și mai profund. Ce se întâmplă dacă, la scări cosmologice mari, gravitația se comportă diferit de ceea ce prevede relativitatea generală? Dacă gravitația, despre care s-a presupus mult timp că nu are masă, are de fapt masă? Această idee este aproape la fel de veche ca și relativitatea generală însăși și a fost explorată de unii dintre cei mai mari oameni de știință ai secolului trecut. Până de curând, toate încercările de a da sens acestei idei au eșuat dramatic. Cu toate acestea, departe de a fi sfârșitul, aici va începe partea cea mai interesantă a călătoriei noastre, pe măsură ce vă voi ghida pe noile căi pe care colegii mei și cu mine le-am descoperit recent în încercarea noastră de a ne confrunța cu gravitația.

Anterior, aceste căi păreau atât de puțin promițătoare, încât explorarea lor era considerată nu doar

nepractică sau periculoasă, ci pur și simplu de neconceput. Astăzi, însă, se pare că ele ne pot conduce către un mod cu totul nou de a gândi despre gravitație. Și, deși este posibil ca aceste noi teorii să nu ofere răspunsuri definitive la toate întrebările noastre, explorând gravitația așa cum ar putea fi ea, chiar dacă nu în propria noastră realitate, am putea ajunge să apreciem natura pentru tot ceea ce are de oferit.

Gravitația este unul dintre primele fenomene fizice de care suntem conștienți și avem o dorință aproape universală de a-i cerceta limitele. Când eram bebeluși, împingeam în mod repetat jucăriile de pe masă, urmărindu-le cum cad (și observând cum părinții noștri exasperați le ridică de jos). În copilărie, săream neobosiți pe trambulină, pentru a vedea cât de sus ne putem înălța înainte de a fi trași înapoi în jos, în casa noastră terestră. Cu prietenii, aruncam pietre pe suprafața apei, minunându-ne de frumusețea vălurelor. În fiecare caz, ne jucam, dar în același timp încercam să contracărăm acest fenomen tenace. Atracția gravitațională este o importantă sursă de stres în viețile noastre, dar, în loc să ne ascundem de ea, învățăm cu toții să o acceptăm.

Pe măsură ce cădem prin curbura spațiu-timpului la fel de liber cum cădem prin viețile noastre, ne dăm seama curând că, deși liberă și rectilinie, călătoria noastră prin spațiu și timp este departe de a fi simplă. Cu siguranță, călătoria noastră nu ar fi completă fără partea ei de obstacole și căderi. Să le acceptăm și să apreciem frumusețea căderii este esențial dacă vrem să progresăm în căutarea noastră nesfârșită. Toate teoriile gravitației dezvoltate

până în prezent au cunoscut virtutea eșecului. A îndrăzni să dai greș înseamnă să apreciezi fiecare cădere nu ca pe un epilog jenant, ci mai degrabă ca pe o oportunitate pentru o înțelegere și mai profundă a naturii.

Așadar, gândește-te la această călătorie ca la o celebrare a misterelor gravitației și a științei înseși — cu îndoielile și eșecurile sale, da, dar și cu incredibilul fior al descoperirii. Aceasta nu este doar căutarea mea sau a colegilor mei. Nu este doar descoperirea lui Einstein sau a lui Newton. Este aventura noastră comună, atât a voastră, cât și a marilor oameni de știință care au deschis calea. Este o călătorie care a început cu mii de ani în urmă și care s-ar putea să nu se încheie niciodată. Pe parcurs, însă, sperăm să dobândim cunoștințe care să îmbogățească viețile generațiilor și civilizațiilor viitoare, permițându-le să își urmeze propriul destin, să navigheze între noi straturi ale realității și să interacționeze cu structura atotcuprinzătoare a Universului.