



Jordi Mazón

# El joc de la física

**El tauler, les fitxes i les regles de l'Univers**



# El joc de la física

Jordi Mazón

# El joc de la física

**El tauler, les fitxes i les regles de l'Univers**



UNIVERSITAT DE  
BARCELONA

Edicions

Collecció  
Catàlisi

# Sumari

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Introducció</i> . . . . .                                                           | 11 |
| <br>CAPÍTOL 1. EL TAULER I LES FITXES DEL JOC: QUÈ ÉS LA FÍSICA? . . . . .             | 15 |
| La física: ciència de l'experimentació i la mesura . . . . .                           | 15 |
| El tauler de joc: l'àmbit d'estudi de la física . . . . .                              | 16 |
| Sistemes de referència . . . . .                                                       | 18 |
| Les fitxes del joc, o l'estructura de la matèria (1): l'àtom . . . . .                 | 20 |
| Més fitxes, o l'estructura de la matèria (2): quarks, leptons i bosons . . . . .       | 21 |
| Característiques de les fitxes, o els estats de la matèria . . . . .                   | 25 |
| Característiques de les fitxes: les magnituds i les unitats . . . . .                  | 28 |
| El metre, el quilogram, el segon, l'ampere i la candela . . . . .                      | 29 |
| <br>CAPÍTOL 2. LES REGLES DEL JOC (1): FORCES I PRINCIPIS DE CONSERVACIÓ . .           | 33 |
| Les forces de l'Univers . . . . .                                                      | 33 |
| Els principis de conservació: lots en la foscor. . . . .                               | 36 |
| Principi de conservació de la massa . . . . .                                          | 37 |
| Principi de conservació de la càrrega elèctrica . . . . .                              | 40 |
| Principi de conservació de l'energia . . . . .                                         | 42 |
| Principi de conservació del moment lineal . . . . .                                    | 47 |
| Principi de conservació del moment angular . . . . .                                   | 51 |
| Principi de conservació dels nombres leptònic, bariònic<br>i de l'estranyesa . . . . . | 54 |

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CAPÍTOL 3. LES REGLES DEL JOC (2): PRINCIPIS, LLEIS, TEORIES I EFECTES . .        | 57  |
| Principi de Pascal . . . . .                                                      | 57  |
| Principi d'Arquimedes . . . . .                                                   | 58  |
| Principi de Bernoulli . . . . .                                                   | 59  |
| Les lleis dels gasos . . . . .                                                    | 62  |
| Teoria cinètica dels gasos . . . . .                                              | 64  |
| Els tres principis de la termodinàmica . . . . .                                  | 66  |
| Principi de Fermat. . . . .                                                       | 67  |
| Llei de la reflexió i de Snell de la refracció: els miratges existeixen . . . . . | 68  |
| Principi de Huygens-Fresnel. . . . .                                              | 72  |
| Principi d'incertesa de Heisenberg. . . . .                                       | 76  |
| Principi d'exclusió de Pauli . . . . .                                            | 77  |
| Teoria especial de la relativitat . . . . .                                       | 78  |
| Principi d'equivalència. . . . .                                                  | 83  |
| Teoria general de la relativitat. . . . .                                         | 85  |
| Principi d'equivalència massa-energia . . . . .                                   | 90  |
| Principi cosmològic . . . . .                                                     | 90  |
| Lleis de Newton . . . . .                                                         | 91  |
| La segona llei de Newton per a les rotacions: la llei de la palanca. . . . .      | 96  |
| Llei de la gravitació universal . . . . .                                         | 97  |
| Lleis de Kepler . . . . .                                                         | 99  |
| Llei de Hooke . . . . .                                                           | 101 |
| Llei de Coulomb . . . . .                                                         | 102 |
| Llei de Biot i Savart, els imants i la força de Lorentz . . . . .                 | 103 |
| Llei de Faraday-Lenz . . . . .                                                    | 105 |
| Lleis de Maxwell . . . . .                                                        | 108 |
| Llei de Gauss. . . . .                                                            | 109 |
| Llei d'Ampère . . . . .                                                           | 110 |
| Llei de desintegració radioactiva . . . . .                                       | 111 |
| Llei de Fajans-Soddy. Reaccions nuclears espontànies . . . . .                    | 112 |
| Llei d'Ohm . . . . .                                                              | 119 |
| Efecte Joule . . . . .                                                            | 121 |
| Efecte Doppler . . . . .                                                          | 122 |

|                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Llei de Hubble. . . . .                                                                           | 123 |
| Teoria del big-bang . . . . .                                                                     | 124 |
| La hipòtesi de Planck i la catàstrofe de l'ultraviolat. . . . .                                   | 125 |
| Cossos negres: llei de Stefan-Boltzmann i llei del desplaçament<br>de Wien . . . . .              | 126 |
| Efecte fotoelèctric. . . . .                                                                      | 128 |
| Efecte Compton . . . . .                                                                          | 130 |
| Teoria de De Broglie. . . . .                                                                     | 131 |
| Teoria de la mecànica quàntica . . . . .                                                          | 132 |
| Efecte túnel . . . . .                                                                            | 133 |
| Principi d'entrellaçament quàntic . . . . .                                                       | 135 |
| <br>CAPÍTOL 4. JUGADES HISTÒRIQUES: ELS EXPERIMENTS CLAU DE LA FÍSICA . .                         | 137 |
| La descoberta del moviment dels àtoms: el moviment brownià . . . . .                              | 137 |
| La determinació de la constant de la gravitació universal:<br>l'experiment de Cavendish . . . . . | 139 |
| El descobriment de la quantització de la càrrega elèctrica:<br>l'experiment de Millikan. . . . .  | 141 |
| L'avanç de les ones: l'experiment de Fresnel . . . . .                                            | 143 |
| La força de Lorentz: el ciclotró . . . . .                                                        | 145 |
| La primera reacció nuclear controlada: el Chicago Pile . . . . .                                  | 147 |
| L'spin quàntic: l'experiment de Stern-Gerlach. . . . .                                            | 150 |
| La demostració del principi de conservació de l'energia: l'experiment<br>de Joule . . . . .       | 152 |
| El fracàs rotund més important de la física: l'experiment<br>de Michelson-Morley. . . . .         | 153 |
| La verificació de la dilatació del temps: l'experiment<br>de Hafele-Keating . . . . .             | 156 |
| La radiació de fons de microones: el WMAP . . . . .                                               | 158 |
| LIGO: la detecció de les ones gravitatòries . . . . .                                             | 160 |
| La detecció del bosó de Higgs . . . . .                                                           | 162 |
| La caiguda dels cossos de Galileu i l'experiment de Riccioli . . . . .                            | 163 |
| L'experiment de Rutherford . . . . .                                                              | 165 |

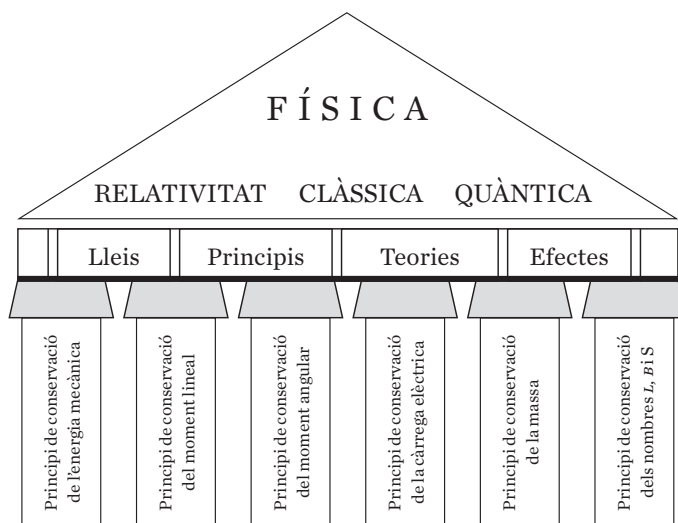
|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CAPÍTOL 5. TRAMPES EN EL JOC: LA PSEUDOFÍSICA . . . . .                                       | 167 |
| Els deixants dels avions: núvols antròpics versus complot<br>dels <i>chemtrails</i> . . . . . | 168 |
| La Terra és plana: els terraplanistes . . . . .                                               | 172 |
| Les radiacions del mòbil i les wifis . . . . .                                                | 174 |
| Viatgers del futur . . . . .                                                                  | 176 |
| La vidència del futur . . . . .                                                               | 178 |
| Mons extrasensorials: la física quàntica ho explica tot. . . . .                              | 179 |
| El forn de microones . . . . .                                                                | 180 |
| L'horòscop: predicció del futur i predeterminació del caràcter. . . . .                       | 181 |
| Polseres magnètiques . . . . .                                                                | 183 |
| Teoria dels ovnis . . . . .                                                                   | 184 |
| Telecinesi: moure objectes amb la força de la ment. . . . .                                   | 185 |
| Telepatia: transmissió d'informació de cervell a cervell. . . . .                             | 187 |
| <i>Bibliografia</i> . . . . .                                                                 | 191 |

## Introducció

Per gaudir d'un joc, a banda de tenir certa habilitat i destresa, cal conèixer el tauler, les fitxes i les regles del joc. Sense aquest coneixement, un no pot gaudir del joc i ens poden fer trampes sense que ens n'adonem... De manera similar, no podem apreciar i saber realment el funcionament dels fenòmens físics que observem i passen al nostre voltant sense conèixer l'entorn en què es produeixen, les escales espacials i temporals i, sobre tot, quines són les regles que els regeixen. Aprendre física vol dir comprendre l'àmbit i l'escala en què tenen lloc els fenòmens i quines són les regles de la natura, per poder comprendre així la diversitat de fenòmens que ocorren al nostre Univers.

Com si es tractés d'un joc, aquest llibre pretén mostrar el tauler, les fitxes i les regles d'aquest joc que és la física. El llibre s'estructura en cinc capítols. Al capítol 1 es descriu què és la física, quines són les diferents escales dels fenòmens físics, les magnituds i les fitxes de la partida. El capítol 2 se centra en les forces de la natura i els principis de conservació. El capítol 3 descriu les principals teories, les lleis, els principis i els efectes més importants de la física. El capítol 4 es focalitza en els experiments clau de la història de la física, el que podríem anomenar les partides mestres. El darrer capítol parla de com la pseudofísica s'apropia del llenguatge i com mal interpreta, de manera intencionada o sense voler-ho, algunes lleis i teories per crear falsa física. Són les trampes del joc.

Amb tot aquest contingut, el lector pot fer-se la idea dels fonaments d'aquest gran edifici que és la física: principis de conservació, principis, lleis, teories i efectes (figura 1).



**Figura 1.** La física i els principis de conservació que la sustenten.

Una *teoria* és un conjunt de conceptes i regles científics que expressen les relacions que hi ha entre les observacions d'un determinat fenomen físic. Es construeix per ajustar-se a les dades observacionals de què es disposa sobre aquestes observacions; la teoria es planteja com un principi per explicar un determinat fenomen: es basa en hipòtesis que s'han anat validant. És important remarcar que una teoria és un plantejament sobre les regles d'un fenomen experimental, el qual no s'ha comprovat que sigui vàlid. Una teoria pot ser vàlida avui, però incompleta o errònia en el futur, si es fan nous experiments o es troben dades que així ho demostren. Quan es verifica i es té la seguretat que la teoria és certa, es converteix en llei.

Una *llei* és un conjunt de conceptes, definicions i proposicions científics interrelacionats entre si d'una manera constant i invariable, i que

presenten una perspectiva sistemàtica dels fenòmens. Les lleis poden demostrar-se comprovant les proposicions en què es fonamenten. Una llei és una teoria que ha demostrat ser vertadera i que no falla. Sempre que es deixa caure una pedra, cau cap a terra, i, per tant, parlem de la llei de la gravetat. Quan fem una força sobre un objecte, aquest reacciona amb una força idèntica en sentit contrari, i això sempre és així: és la tercera llei de Newton.

Un *principi* és una llei física que es compleix i que serveix de base per a un raonament ampli. Un principi és considerat una llei general que regula un determinat tipus de fenomen físic. Entre els principis destaquen els anomenats *principis de conservació*, que són els fonaments de la física, pels quals determinades magnituds mantenen el seu valor constant en el temps. És a dir, abans i després d'un determinat fenomen, tot i que hi hagi hagut un canvi físic, el seu valor global és el mateix, es manté constant. Saber quines són aquestes variables que es conserven és com una llanterna enmig de la foscor, ens permet tenir una visió del que ens envolta.

Un *efecte* és el resultat que s'aconsegueix com a conseqüència d'algun fet, després d'una causa. Constitueix un fenomen que es genera per una causa determinada i que està acompanyat d'unes manifestacions físiques puntuals.

Aquest llibre, doncs, va de teories, principis i principis de conservació, lleis i efectes de la física. Tots plegats sustenten l'Univers físic que coneixem.

JORDI MAZÓN

## CAPÍTOL 1

### El tauler i les fitxes del joc: què és la física?

Per començar a entendre el món de la física, primerament cal saber quin és el seu àmbit d'estudi, quin és exactament l'objectiu que es planteja i amb quines eines compta. Aquest és l'objectiu del primer capítol.

#### LA FÍSICA: CIÈNCIA DE L'EXPERIMENTACIÓ I LA MESURA

A l'ensenyament secundari, els llibres de ciències s'han agrupat típicament en física i química, d'una banda, i en biologia i geologia, de l'altra. Aquesta agrupació clàssica no és atzarosa, sinó que respon a un criteri global ben definit. La física i la química tenen en comú que són ciències de l'experimentació, mentre que la biologia i la geologia han estat històricament ciències de l'observació (malgrat que des de fa dècades ho són també de l'experimentació). És a dir, per avançar en el coneixement de la física i la química, cal, sobretot, experimentar. A partir dels experiments realitzats i de la posterior observació i mesura de magnituds, el coneixement sobre el món físic i químic que ens envolta avança. En biologia i geologia, històricament no es feien experiments: un no pot fer xocar la placa tectònica euroasiàtica amb l'africana i veure com es formen les muntanyes. Basant-se en l'observació dels plecs de les muntanyes, les roques o els sediments

en diferents zones, un pot construir una teoria i anar avançant així en el coneixement geològic i biològic del món que ens envolta. El mateix es pot dir de la biologia clàssica, malgrat que actualment sigui també una ciència de l'experimentació.

Per això, diem que la física és una ciència de l'experimentació. Ens cal fer experiments, observar-ne el resultat i, sobretot, mesurar *coses* d'una manera objectiva. La mesura és clau per quantificar i per obtenir, refutar i confirmar lleis, principis i teories de la física.

En aquest llibre no proposarem experiments ni farem mesurar res. En el decurs de la història, les diferents lleis, teories i principis que han plantejat els físics han quedat confirmats a partir dels experiments i les mesures d'aquestes *coses* (les magnituds). Aquest és el veritable joc de la física: fer-se preguntes que relacionin magnituds, fer experiments i prendre'n mesures, per construir així un coneixement del món físic.

Ens cal veure quin és el tauler de joc de la física, quines fitxes cal fer servir i què cal mesurar. Un cop tinguem clar això, haurem de conèixer les regles del joc.

### EL TAULER DE JOC: L'ÀMBIT D'ESTUDI DE LA FÍSICA

La física té per objectiu donar respostes al perquè dels fenòmens que ocorren al nostre voltant, a l'Univers. Aquest és, de fet, el tauler de joc de la física, en el qual succeeixen tot d'esdeveniments en una escala temporal i espacial molt àmplia, que va des d'una mida inferior al nucli atòmic fins a dimensions que inclouen galàxies i fins i tot l'Univers sencer; en què els fenòmens duren des de menys de mil·lèsimes de segon fins a eons, i que es poden produir en un ventall que comprèn des de velocitats extremament lentes fins a velocitats properes a la de la llum, un topall impossible de superar.

Segurament, la física és, d'entre totes les ciències, la que comprèn un rang espacial i temporal més gran. Si ens fixem en l'escala espacial, la físi-

ca estudia dimensions tan petites com ho són les partícules subatòmiques (interaccions entre quarks d'un ordre de magnitud de  $10^{-18}$  m) fins a les galàxies o l'Univers sencer (distàncies superiors a  $10^{22}$  m). Cap altra ciència té aquest rang espacial tan ampli.

En l'escala temporal, el rang és també amplíssim: des de fenòmens físics inferiors en milions de vegades a les mil·lèsimes de segon, com la desintegració del bosó de Higgs, estimada en  $10^{-22}$  segons, fins a fenòmens que ocorren en milers de milions d'anys, com la rotació de galàxies o la formació d'estrelles i sistemes planetaris.

La taula 1 mostra un esquema d'aquesta diversitat de rang espaciotemporal que la física estudia.

|                                      |                                                                  |                                                               |                               |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| $v \approx c$                        | Física quàntica relativista                                      | Física relativista                                            | Cosmologia relativista        |
| $v \ll c$                            | Física quàntica                                                  | Física clàssica o newtoniana                                  | Cosmologia                    |
| <div>Velocitat</div> <div>Mida</div> | <b>Partícules subatòmiques - àtom</b><br>$10^{-18} - 10^{-10}$ m | <b>Microscòpica - quotidiana</b><br>$10^{-8}$ m - $10^{10}$ m | <b>Galàxia</b><br>$10^{20}$ m |

**Taula 1.** Rang espaciotemporal de la física. La velocitat de la llum al buit es representa amb la lletra  $c$  i equival a  $3 \cdot 10^8$  m/s.

La física que coneixem en el nostre dia a dia, la que podríem qualificar com a física intuïtiva, és l'anomenada física clàssica o newtoniana. Comprèn els fenòmens que tenen lloc a unes velocitats molt inferiors a les de la llum i en unes escales espacials que estan per sobre de la mida de l'àtom. És la física que van descriure matemàticament físics com Isaac Newton amb les seves lleis al segle XVI i que altres científics han anat desenvolupant des d'aleshores.

Quan els processos físics es desenvolupen a velocitats properes a la de la llum, la física clàssica deixa de ser vàlida i entra en joc la física relativista,

el pare de la qual fou Albert Einstein, que la va desenvolupar en uns treballs crucials que va publicar els anys 1905 i 1912, i que es corresponen amb les anomenades teoria especial i general de la relativitat, respectivament.

La mida dels fenòmens i processos físics per estudiar importa, i la física clàssica també deixa de ser vàlida per a unes dimensions iguals o inferiors a les de l'àtom. La física quàntica, desenvolupada a començaments del segle XX, és la que permet descriure els fenòmens d'aquesta petita escala espacial. La física clàssica no és incorrecta en l'àmbit de la relativitat o de la quàntica: simplement deixa de ser vàlida, i aleshores són la relativitat i la quàntica les que entren en joc. Tant la relativitat com la quàntica reproduïxen la física newtoniana en els límits clàssics, és a dir, en mides superiors a les de l'àtom i a velocitats molt inferiors a la de la llum en el buit, respectivament.

### SISTEMES DE REFERÈNCIA

Els cossos del nostre voltant es mouen: les fulles dels arbres cauen, els ocells volen, la Lluna canvia de posició nit rere nit, els planetes canvien la seva posició al cel, el cabell i les ungles creixen, els continents es desplacen, els núvols es formen, es mouen i es dissipen, etcètera. Tot el que es troba a l'Univers està en constant moviment, i l'ésser humà ha sentit des de sempre la necessitat d'entendre i descriure aquest moviment. Determinar la posició dels objectes és el primer pas, imprescindible, per estudiar-los, i per fer-ho cal fixar un origen a partir del qual es puguin donar les posicions espacials dels objectes. És el que en física s'anomena un sistema de referència.

No hi ha un únic sistema de referència sobre el qual es puguin posicionar els objectes, sinó que n'hi ha d'infinitos: els que defineixi cada observador. Per exemple, la posició d'un avió i el moviment que descriu al cel vistos des d'un observador que està en repòs situat a terra són ben diferents dels que veurà un altre observador que estigui dins d'un tren mo-

vent-se a una velocitat constant, o un astronauta de l'Estació Espacial Internacional que orbita la Terra, o un pilot d'un altre avió. Si deixem caure una pedra des de la finestra d'un tren que es mou a gran velocitat i descrivim el moviment des del terra, veurem com descriu una paràbola, mentre que si el descrivim des de la finestra, suposant que no hi hagi fricció amb l'aire, veurem com cau verticalment respecte a nosaltres. Tot depèn del sistema de referència que fem servir. Això no és cap problema, ja que existeixen relacions matemàtiques, anomenades transformacions de Galileu, que permeten descriure el moviment que des d'un sistema de referència observa un altre que estigui en moviment relatiu respecte del primer.

Des d'un punt de vista més filosòfic, l'existència d'un sistema de referència en repòs absolut ha estat plantejada històricament. El llibre que el lector té a les mans està en repòs respecte al seu punt de vista, però, en canvi, s'està movent respecte al sistema de referència situat sobre el Sol. La Terra rota sobre el seu eix a mesura que es desplaça al voltant del Sol per l'eclíptica. El Sol, però, tampoc no està en repòs vist des d'un sistema de referència centrat a la galàxia, la qual està en rotació sobre el seu centre. Però és que aquest centre galàctic tampoc no està en repòs, ja que gira al voltant d'un grup local de galàxies, les quals es desplacen amb l'Univers. El repòs absolut no existeix a l'Univers: sempre hi ha un sistema de referència en moviment relatiu.

La primera de les lleis de Newton estableix, com es veurà més endavant, que si sobre un cos no hi actua cap força, aquest romandrà indefinidament movent-se en una trajectòria rectilínia amb velocitat constant, o bé estarà en repòs, entès com un estat sense velocitat. Einstein, amb la seva teoria de la relativitat, va confirmar que el repòs no existeix, ja que si un cos està en repòs en un sistema de referència, segur que en un altre sistema un observador en descriurà un moviment. Per tant, els sistemes de referència en repòs absolut no existeixen.

És interessant diferenciar els sistemes de referència anomenats inercials dels no inercials. Els primers són sistemes de referència en què es