

## LA BASE EXPERIMENTAL DE LA FÍSICA

JOSEP M. CASALS I GUIU

Des dels inicis de la seva existència, la humanitat ha anat progressant en coneixements, p. ex. de l'època en què no hi ha documents escrits perquè no s'havia desenvolupat l'escriptura en diem prehistòria i d'un cert moment ençà ja en diem història. Juntament amb la mera escriptura es van desenvolupar altres branques del saber, l'agricultura, les tècniques elementals de construcció i de fabricació d'eines, etc.

La gent va començar a constatar l'existència d'uns fenòmens naturals en el sentit que no depenien de la seva voluntat, p. ex. la successió de les estacions de l'any amb el fred i la calor, la pluja, els vents, etc. i una hora o altra algú es devia començar a preguntar sobre qui, el com i el perquè d'aquelles coses. L'evolució del pensament i el raonament no devia pas ser uniforme i els camps del saber encara no s'havien destriat, com és natural, però amb l'excepció potser de l'escola jònica uns 600 anys aC, hom va adquirir l'hàbit d'atribuir un origen mític als fenòmens naturals i també l'hàbit de donar credibilitat a l'argument d'autoritat. Si Aristòtil, posem per exemple, deia que un cos es movia quan se li aplicava una força i que quan cessava la força aplicada el cos s'aturava, allò es creia més de mil o de mil cinc-cents anys sense discutir-ho.

A l'acabament de l'Edat Mitjana encara hom volia deduir el comportament de les coses a partir de la mera especulació mental i no va ser fins al Renaixement i el barroc que van començar a canviar les coses, canvi que hom acostuma a personificar en la figura de Galilei, a cavall entre els segles XVI i XVII. En efecte, aquest interessant personatge va fer coses tan interessants com adonar-se que els llums de les esglésies oscil·laven més de pressa o més a poc a poc segons la llargada de la cadena de què penjaven i que un mateix llum tardava el mateix a oscil·lar, tant si l'amplitud de l'oscil·lació era gran com si era petita. Va utilitzar la ullera de llarga vista, no pas per veure si venien enemics o per tafanejar el veïnat, sinó per mirar enlaire: va adonar-se que la Lluna no era un disc pla sinó que allà hi havia muntanyes, que Venus tenia fases com la Lluna, que al voltant de Júpiter hi havia unes estrelletes que cada dia canviaven de posició al voltant seu, que Saturn no era ben rodó i que tenia com una mena de nanses als costats, etc. Va deixar caure objectes a terra des de la torre de Pisa i va constatar que queien a la mateixa velo-

citat encara que fossin de densitats diferents. Com a fet més estrident va tenir una famosa controvèrsia amb els poders fàctics de l'època sobre les posicions relatives dels astres del Sistema Solar que és universalment coneguda.

Aquest darrer exemple il·lustra a bastament la contraposició entre el concepte antic de ciència, intentant explicar els fenòmens a partir dels mites i dels arguments d'autoritat, i el concepte modern, derivat de l'observació dels fets i de l'elaboració o adequació de les teories d'acord amb els fets observats. Podem pensar que és a partir d'aquí que neixen les anomenades ciències experimentals o bé que neix el caràcter experimental d'algunes ciències. El segle passat, William Thompson, potser més conegut per lord Kelvin, va anar més endavant, dient que la ciència començava quan hom podia quantificar els fenòmens. És a dir, ordenar, classificar, objectivar, mesurar i, sempre que sigui possible, posar-hi xifres. William Herschel, potser l'astrònom més admirable de tots, tenia per divisa «*Quidquid nitet, notandum*», o sigui «anotar tot allò que brilla» i aquestes paraules il·lustren prou la que ha de ser la curiositat insaciada del científic.

Primerament, cal veure tot allò que passa, però amb això no n'hi ha prou. Un cop vistos els fets s'han de saber interpretar, a veure si són normals i explicables amb les teories científiques en voga o bé si s'ha detectat cap anomalia o cap cosa estranya. Veure si aquella anomalia és imputable a l'acte d'observació o bé a la cosa observada. Òbviament molts avenços científics han estat precedits per avenços en les tècniques d'observació i mesurament, que han permès veure coses noves o detectar fenòmens anòmals que abans passaven desapercibuts. Anant al capdavant, la física moderna ve a explicar que un mesurament perfecte és impossible perquè el mateix acte de mesurar sempre modifica d'una manera o altra la cosa observada. La història de la ciència està farcida d'exemples en què una observació feta correctament no va ser adequadament interpretada, p. ex. els tres planetes descoberts en l'època moderna, Urà, Neptú i Plutó, tots havien estat enregistrats com a estrelles per algú abans del seu «descobriment», i fins i tot sembla que Neptú havia estat anotat pel mateix Galilei.

Però anem a una altra cosa. Avui dia els científics tenen la pretensió d'haver «descobert» una colla de principis i lleis fonamentals de la naturalesa, d'entre les quals ara ens fixarem en les lleis de la física. Aquestes lleis ja no tenen un origen mític com abans, sinó que les han formulades uns savis a partir de les seves observacions. Ara bé, nosaltres, com a espectadors o usuaris, també podem ser crítics amb els savis, almenys tant com ells ho són amb els fenòmens que estudien. Ara bé, com saben els savis allò que saben? Ens creiem que aquestes anomenades lleis fonamentals de la física han estat formulades a través d'observacions, experiments i mesuraments. Molt bé, però quins? Amb quina garantia es van fer i quina precisió tenien els seus resultats?

Els savis han tingut tendència a formular unes lleis simples. La creença, però, que les lleis fonamentals han de ser simples, tanmateix és ben arbitrària. I per què no poden ser lleis complicades? Els savis poden dir que si són simples són més elegants. Això també és discutible (en el temps del barroc, les coses tingudes per elegants no ho eren gaire de simples), però encara que fos així, quina obligació tenen les lleis físiques de ser elegants? Més aviat hauríem de dir que en ciència no s'ha de buscar principalment l'estètica sinó el rigor i l'exactitud. Per tant: Quin és el grau comprovat d'exactitud de les lleis de la física? P. ex. la llei de la gravitació

universal diu que la força d'atracció entre dues masses és inversament proporcional al quadrat de la distància. I per què l'exponent de la distància ha de ser exactament 2 i no pot ser 1,99 o bé 2,01? Com se sap?

Per tranquil·litzar-nos una mica, fem doncs ara unes pinzellades i un breu repàs de com s'han arribat a esbrinar algunes d'aquestes lleis i amb quina precisió s'han fet els mesuraments que les suporten. Justament aquest és el tema que suggereix el títol d'aquest treball.

### La força gravitacional

Tots els objectes cauen amb la mateixa acceleració. Per comprovar-ho amb precisió a través d'experiments de caiguda lliure caldria eliminar tots els fenòmens que puguin emmascarar el resultat, com la resistència de l'aire, o almenys mesurar els seus efectes i poder fer les corresponents correccions. Això hauria estat difícil i més aviat es va anar cap a fer experiments amb pèndols. Newton ho comprovava amb pèndols construïts amb diferents materials, a veure si amb masses iguals i llargades iguals resultaven períodes d'oscil·lació iguals. A principis de segle Eötvös va mesurar que pèndols fets amb diferents materials responien igualment a la força de la gravitació, amb un error inferior a  $5 \times 10^{-9}$ , o sigui a 1 part entre 200.000.000. Per tant, dels seus experiments no es podia dir estrictament que la gravetat actuava igualment sobre tots els cossos, sinó que si per un tenia el valor  $g$ , per a un altre no era superior al valor  $1.000\ 000\ 005g$ . I prou. El 1959 Dicke, a la universitat de Princeton, va arribar a mesurar la influència de la gravitació del Sol sobre un pèndol i el seu experiment va millorar la precisió d'Eötvös en un factor de 500, o sigui que les possibles diferències entre l'atracció del Sol sobre una massa d'or i una massa d'alumini, no eren superiors a  $10^{-11}$ . De més a més, com que la proporció entre protons i neutrons en l'àtom d'or (79 i 118 respectivament) és diferent a la que hi ha en l'àtom d'alumini (13 i 14), es dedueix que l'atracció gravitatòria és la mateixa per als uns que per als altres.

### La llei de la gravitació universal

N'hem parlat al principi com a exemple. La força d'atracció entre dos cossos és directament proporcional al producte de les seves masses i inversament proporcional al quadrat de la distància que les separa. Ara bé, en realitat cal tenir en compte que les masses no estan concentrades en un sol punt i per això cada fracció de la massa d'un dels cossos atreu totes les fraccions de massa de l'altre cos i que cal sumar totes aquestes atraccions per trobar la resultant. En el cas, p. ex. d'un satèl·lit artificial de la Terra, tenim que la Terra no és una esfera perfecta o un el·lipsoide, i ni tan sols té una forma simètrica o de revolució. La seva densitat no és uniforme, en alguns llocs hi ha materials més densos i en d'altres de més lleugers i el seu camp magnètic tampoc no és uniforme. Si ho fos, i eliminant els efectes secundaris del frenat de l'atmosfera, la pressió del vent solar, els efectes del camp magnètic terrestre sobre les càrregues elèctriques degudes a ions capturats en l'espai i les perturbacions gravitacionals del Sol, la Lluna i els altres planetes, un satèl·lit amb una òrbita perfectament circular romandria en aquella òrbita i un satèl·lit amb una òrbita el·líptica mantindria l'eix major de l'el·lipse sempre en

una mateixa posició de l'espai, si l'exponent que afecta la distància en la fórmula és exactament un 2, sinó l'eix major tindria un cert moviment de precessió. Per tant, una comprovació molt sensible de la llei pot ser l'observació del periastre de les òrbites. Bé, de tot això, per al cas dels satèl·lits artificials, en surt una expressió que és la mateixa que la de Newton però amb unes correccions que depenen de l'altura del satèl·lit i de la seva latitud, que naturalment varia constantment mentre s'està movent. Aquestes correccions són de l'ordre de  $10^{-3}$  o menys, i per a un satèl·lit allunyat com la Lluna són de l'ordre de  $2 \times 10^{-7}$ .

Quant a la revolució dels planetes al voltant del Sol, sí que fa molts anys que es va observar que el periheli de Mercuri girava  $574,10 \pm 0,41''$  d'arc per segle. Es va calcular que la influència de l'aplanament del Sol i de l'atracció dels altres planetes produïa una precessió de  $531,509''$ , però que encara quedaven  $42,56 \pm 0,5''$  per justificar. Si no es trobava una altra explicació, el famós exponent de la llei de Newton, en lloc de 2 hauria de ser 2,000 000 16. Ara bé, va aparèixer Einstein i les teories de la relativitat referents a la variació de la massa inert d'acord amb la velocitat que va permetre explicar en gran part aquell valor residual. La precessió del periheli es nota més en els planetes més pròxims al Sol perquè tenen una velocitat més elevada (3a llei de Kepler) i, per a Mercuri, la precessió calculada segons les teories de la relativitat resulta ser de  $43,03 \pm 0,003''$  per segle, valor que s'acosta en un 99% al valor observat. De fet, aquesta coincidència es considera com una de les proves experimentals de la teoria de la relativitat.

### La llei de la conservació de l'energia

Aquesta llei ens diu que l'energia no es crea ni es destrueix sinó que només es transforma, p. ex. en forma química, mecànica (cinètica o potencial), calor, elèctrica, etc. Vegem fins a quina precisió s'ha comprovat aquesta llei en alguns camps de la física.

Tenim que els làsers (acrònim de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) de neó tenen una longitud d'ona extraordinàriament precisa, de manera que presenten una dispersió en la longitud d'ona dels fotons emesos inferior a  $10^{-13}$  vegades la pròpia longitud d'ona. Com que l'energia dels fotons és proporcional a la seva freqüència, això significa que la conservació de l'energia en fenòmens comprensius dels estats excitats dels electrons orbitals es compleix amb un error inferior a  $10^{-13}$ .

Dintre els nuclis dels àtoms també hi ha diferents nivells d'energia i en determinades circumstàncies, p. ex. bombardejant  $\text{Fe}^{56}$  amb deuterons, es passa a  $\text{Co}^{57}$ , que passa a  $\text{Fe}^{57}$  i aquest  $\text{Fe}^{57}$  emet fotons (d'això se'n diu efecte Mössbauer). Doncs bé, s'ha pogut mesurar que l'energia d'aquests fotons emesos és sempre la mateixa amb un error inferior a  $5 \times 10^{-14}$ . Un experiment semblant amb  $\text{Cd}^{107}$  que passa a  $\text{Ag}^{107}$  dona un error encara més baix, inferior a  $10^{-17}$ .

En el cas de reaccions nuclears, en la mateixa reacció abans esmentada  $\text{H}^2 + \text{Fe}^{56} \rightarrow \text{Fe}^{57} + \text{H}^1 + \text{Q}$  (calor), aquesta calor Q es pot mesurar en Joule i comparar-la amb la variació de massa entre els dos termes de la reacció, d'acord amb l'equivalència d'Einstein  $E = m \times c^2$  ( $c =$  a la velocitat de la llum,  $300.000.000 \text{ m/s}$ ). Doncs bé, Q va resultar ser de  $8,626 \times 10^{-11}$  Joule i l'energia

corresponent a la pèrdua de massa és de  $8,668 \times 10^{-13}$  Joule. La relació entre aquests dos valors és de  $0,9998 \pm 0,0012$  i no s'ha pogut afinar més degut a les dificultats en el mesurament exacte de  $Q$ . En la reacció  $H^2 + H^2 \rightarrow H^3 + H^1 + Q$ , els valors respectius de  $Q$  i de l'equivalent a la pèrdua de massa són de  $3,016\ 056 \pm 0,000\ 015$  i de  $3,016\ 040\ 4 \pm 0,000\ 000\ 7$ , que només difereixen en  $2 \times 10^{-6}$ .

Podem dir doncs, per ara, que les lleis de la conservació de l'energia, de conservació de la quantitat de moviment i de la relació massa-energia són certes fins als límits d'error que ens donen aquests experiments.

### La constància de la velocitat de la llum en totes direccions

L'origen de l'experiment de Michelson i Morley ja fa més de cent anys, va ser trobar si existia l'èter com a fluid de suport de les ones lluminoses, ja que el moviment orbital de la Terra produiria un "vent de l'èter" que influiria en el valor de la velocitat de la llum, segons si el raig de llum i l'hipotètic vent de l'èter anessin en el mateix sentit, en sentit contrari o de través. Ara no és el moment de detallar aquest experiment, però en resum podem dir que consistia a dividir un mateix raig de llum en dues parts, dirigir aquestes dues parts en direccions perpendiculars entre si i després d'unes reflexions en uns miralls tornar a ajuntar aquests raigs de llum, de manera que es produïen unes franges d'interferència sobre una pantalla. Girant l'aparell  $90^\circ$  i repetint els mesuraments, si l'èter existia i afectava la velocitat de la llum, les ratlles d'interferència s'havien de moure de lloc. Essent la velocitat orbital de la Terra de l'ordre dels 30 km/s, el corriment calculat per al cas d'un èter estacionari en l'univers hauria estat del 40% de l'amplada d'una franja, però tot i que l'experiment era capaç de poder detectar fins a l'1% de desviació no es va trobar res.

Això va destruir la fe dels físics en l'èter (la dels que encara n'hi tenien; Einstein no es va prendre la molèstia de negar la seva existència i es va limitar a dir que, si existia, els seus efectes no podrien ser mai detectats, la qual cosa volia dir que la seva existència o no existència era irrellevant). Entre els anys 1929 i 1931, Kennedy i Thorndyke van millorar aquest experiment al CalTech, fet en una cambra de buit, amb els braços de l'instrument de llargada desigual i fent un angle diferent dels  $90^\circ$ . La temperatura no variava en més de  $0,001^\circ$  i treballaven amb llum monocromàtica de 546,1 nm de l'espectre de mercuri. Van fer sèries de 6 mesuraments espaiats cada mitja hora i els van repetir 12 h després, per veure si la rotació de la Terra hi influïa, i no s'hi va notar res. Ho van repetir tot cada 3 mesos consecutius durant 9 mesos i l'efecte de translació de la Terra en l'espai (inversió del sentit de la velocitat orbital) va tornar a ser nul. L'any 1964, Saseja, Javin i Townes van repetir l'experiment amb dos raigs làser i tampoc no van trobar res, tot i que els instruments utilitzats haurien pogut detectar una variació en la freqüència d'1 part de  $10^{11}$ . Per tant, es pot afirmar que la velocitat de la llum és constant en totes direccions dintre els límits de precisió donats pels experiments esmentats.

## El valor de les càrregues elèctriques elementals

Aquest valor es va determinar per primera vegada amb el famós experiment de la gota d'oli de Millikan, equilibrant una gota d'oli electrificada per una font radioactiva per mitjà d'un camp electrostàtic. El 1967, Stower, Moran i Trischa, a la universitat de Syracuse, van afinar aquest experiment amb una esfera d'acer de 0,1 mm de diàmetre i van determinar dues coses: a) que la diferència de càrrega entre un protó i un electró era inferior a  $10^{-16}e$ , essent e la càrrega de l'electró mateix, i b) que la llum que incidia sobre l'esfera d'acer no alterava el resultat de l'experiment, de manera que la càrrega elèctrica del fotó havia de ser inferior a  $10^{-16}e$ . El 1960, King va fer al MIT un experiment molt enginyós per verificar que les càrregues elèctriques d'una molècula sumaven zero, és a dir, que les dels protons (positives) i les dels electrons (negatives) es compensaven. Va posar hidrogen en un recipient perfectament aïllat i va deixar anar el gas a poc a poc. Si el balanç de càrregues no hagués estat nul, el recipient hauria acabat assolint un potencial elèctric, cosa que no va passar. D'aquesta manera es va determinar que la càrrega elèctrica neta d'una molècula d'hidrogen era inferior a  $(7 \pm 2,5) \times 10^{-20}e$ , la de l'argó inferior a  $8 \times 10^{-20}e$  i la del nitrogen inferior a  $12 \times 10^{-20}e$ . D'aquí es va deduir que la diferència entre la càrrega del protó i la de l'electró és inferior a  $(1 \pm 4) \times 10^{-20}e$  i que la càrrega neta del neutró és inferior a  $4 \times 10^{-20}e$ .

## La llei de Coulomb

Aquesta llei és semblant a la de la gravitació universal de Newton però s'aplica a les càrregues elèctriques. La fórmula és similar però la força pot ser d'atracció o de repulsió, segons si les càrregues elèctriques són del mateix signe o de signes diferents. Coulomb va deduir aquesta llei fent mesuraments amb una balança de torsió, semblant a la utilitzada per Cavendish per determinar la constant de gravitació universal. Maxwell va fer un experiment amb dues boles metàl·liques posades una dintre de l'altra i interconnectades entre si. Carregant l'exterior a un potencial elevat i tallant després la interconnexió va mesurar el potencial de l'esfera interior, que segons la teoria havia de ser nul si l'exponent que afecta la distància de separació entre càrregues elèctriques de la llei de Coulomb és igual a 2. Doncs bé, si se suposava que aquest exponent, en lloc de ser 2 era  $2 \pm q$ , el valor de  $q$  va resultar inferior a  $4,63 \times 10^{-4}$ . L'any 1936 Plinton i Lawton van repetir l'experiment i van augmentar la precisió, de manera que  $q$  va disminuir fins a prop de  $10^{-9}$ . Els anys 70 aquesta precisió va augmentar encara fins a determinar un valor inferior a  $2,7 \times 10^{-16}$ .

Aquests experiments i d'altres basats en l'observació del camp magnètic terrestre per mitjà de satèl·lits artificials, van permetre determinar que la massa del fotó en repòs, que teòricament és nul·la, experimentalment és inferior a  $4 \times 10^{-48}$  grams, o sigui menor que  $4,4 \times 10^{-21}$  vegades la massa de l'electró.

Així doncs, a través d'aquestes pinzellades hem pogut veure, a) que les teories i les lleis de la física han de concordar amb els resultats experimentals observats; b) que aquestes teories i lleis s'han hagut de corregir, retocar i esmenar moltes

vegades, i fins i tot abandonar i substituir per unes altres si cal; c) que el descobriment de nous fenòmens avança de manera paral·lela al progrés i a la sofisticació en la construcció d'instruments i aparells i al desenvolupament de noves tècniques; d) que els anomenats principis i lleis fonamentals es compleixen i són coherents amb les teories acceptades per la comunitat científica, almenys fins als límits que la millor precisió actual pot determinar i, e) que en qualsevol cas sempre queda un espai reservat a la ment humana, a la intuïció, tenacitat, ull clínic, geni o qualsevol altre terme més o menys equivalent, en tot el seu significat, de no només mirar sinó de saber buscar, saber veure, saber trobar i saber interpretar.