

INTRODUCCIÓ A LA FÍSICA EXPERIMENTAL: LABORATORI DE TERMODINÀMICA

Lluís Mañosa i Carrera
José María Sancho Herrero
Eduard Vives i Santa Eulàlia

Departament d'Estructura i Constituents de la Matèria



UNIVERSITAT DE BARCELONA



INTRODUCCIÓ A LA FÍSICA EXPERIMENTAL: LABORATORI DE TERMODINÀMICA Versió preliminar

Lluís Mañosa i Carrera
José María Sancho Herrero
Eduard Vives i Santa Eulàlia

Departament d'Estructura i Constituents de la Matèria

Publicacions i Edicions



UNIVERSITAT DE BARCELONA



L'objectiu principal d'aquest llibre és servir com a eina de treball per als alumnes de l'assignatura Laboratori de Termodinàmica, de l'ensenyament de Física de la Universitat de Barcelona. Aquesta assignatura consta d'1.5 crèdits teòrics (teoria i problemes) i de 3 crèdits de pràctiques de laboratori.

El llibre consta de dues parts. En la primera s'introdueix l'alumne en la problemàtica general de la ciència experimental, amb especial èmfasi en aquells aspectes relacionats amb la termodinàmica. A més, es donen les eines matemàtiques necessàries per un correcte tractament de les dades experimentals, amb exemples i exercicis per resoldre. La segona part consisteix en el manual del laboratori, on es descriuen cadascuna de les pràctiques que l'alumne trobarà en els bancs del laboratori i on es donen les indicacions necessàries per a la seva realització.

El Laboratori de Termodinàmica de la Facultat de Física ha anat evolucionant al llarg del temps. Des de l'any 1988 en té la responsabilitat docent el Departament d'Estructura i Constituents de la Matèria. Seria impossible anomenar totes les persones que han contribuït al disseny i a la preparació de les pràctiques tal com estan actualment. Si ens remunten als orígens del Departament, el primer responsable va ser el doctor Antoni Planes. Ell va fer el trasllat a l'edifici de l'aulari, seleccionant algunes de les pràctiques existents anteriors i incorporant-ne també de noves. Després d'un breu període en que el responsable va ser el doctor Jordi Ortín, el Laboratori va esdevenir una assignatura independent en el pla d'estudis. La tasca de coordinació va ser represa aleshores i durant diversos cursos pel doctor Lluís Mañosa. Es van construir les dues pràctiques del calorímetre, es van adquirir les d'equació d'estat dels gasos i la del punt crític i equació de Clausius-Clapeyron i es van modernitzar moltes de les altres. A més, el doctor Mañosa va editar per primera vegada el manual del laboratori amb format de text-guia. El va seguir en les tasques de coordinació el doctor Jesús Salan, que va adaptar la pràctica del mètode de Clément-Desormes per a ser usada amb argó.

Aquest llibre correspon a una revisió profunda del manual de laboratori anterior, editat pel doctor Mañosa, que havia quedat obsolet en alguns aspectes. La revisió ha permès adaptar el manual al nou pla d'estudis reformat que, considera alguns crèdits teòrics. A banda, s'hi han inclòs també dues pràctiques noves (simulació de l'equació d'estat d'una làmina magnètica i mesura de la calor de vaporització del N_2) i s'han modernitzat algunes de les antigues. Precisament perquè incorpora moltes novetats, aquesta edició no està mancada d'errors, que caldrà esmenar en properes edicions. Cal pensar que una assignatura de laboratori és molt dinàmica. Aconseguir un bon acord entre les pràctiques i el manual no és una tasca senzilla.

L'elaboració d'aquest llibre s'ha dut a terme dins dels projectes docents del Grup Reconegut d'Innovació Docent en Termodinàmica i Física Estadística de la Universitat de Barcelona. Finalment, els autors agraïm la col·laboració del Servei de Llengua Catalana de la Universitat de Barcelona, que ha fet la correcció ortogràfica de gran part d'aquest document.

En la segona edició d'aquest llibre s'ha intentat corregir la majoria d'errades de la primera edició. Els autors volem agrair a la Dra. Nuria Barberan, al Dr. Jaume Casademunt, al Dr. Joan Parellada, al Dr. Antoni Planes, al Dr. Emili Rojas, al Dr. Jesús Salan i al Dr. Rolf Tarrach la correcció d'algunes errades.

Índex

I. Fonaments de física experimental	1
1. Introducció al mètode científic	3
1.1. L'escenari científic	3
1.2. Elements estructurals	4
1.2.1. Fets	4
1.2.2. Lleis	5
1.2.3. Teories	5
1.2.4. Models	6
1.3. Elements metodològics	6
1.3.1. El raonament deductiu	6
1.3.2. El raonament inductiu	8
1.3.3. La rellevància del treball experimental	9
1.4. La pràctica del mètode científic	10
1.4.1. Els professionals del mètode científic	10
1.4.2. Funcionament pràctic del mètode científic	11
1.5. Resum del funcionament del mètode científic	12
1.5.1. Estructura lògica	13
1.5.2. El progrés científic	13
1.5.3. Comentaris finals	13
2. El mètode científic i la termodinàmica	15
2.1. Estructura de la termodinàmica	15

2.1.1.	Els prolegòmens dels fenòmens tèrmics	15
2.1.2.	Mesura de la temperatura: el principi zero	16
2.1.3.	Equivalència entre treball i calor: el primer principi	17
2.1.4.	Els processos irreversibles: el segon principi	17
2.1.5.	Alguns experiments decisius de termodinàmica amb implicacions en el desenvolupament de la física moderna	18
2.1.6.	Conclusions d'aquesta secció	19
2.2.	El laboratori de termodinàmica	19
3.	Introducció al tractament dels errors experimentals	21
3.1.	Error sistemàtics i errors aleatoris	21
3.1.1.	Els errors aleatoris	22
3.1.2.	Els errors sistemàtics	22
3.1.3.	La incertesa en la presa de dades	22
3.2.	Mesures indirectes: propagació d'errors	23
3.3.	Les xifres significatives	24
3.4.	El sentit comú en els errors	24
4.	Anàlisi estadística de les mesures	27
4.1.	Introducció	27
4.1.1.	Dades repetitives	27
4.1.2.	Mesures en funció de paràmetres variables	28
4.2.	Anàlisi de mesures repetitives d'una magnitud x	28
4.2.1.	Probabilitats	28
4.2.2.	Estadística	35
4.2.3.	Tractament de les incerteses experimentals en les mesures	38
4.3.	Estimació de la densitat $g(x)$: histogrames	39
4.4.	Anàlisi de mesures simultànies de diverses magnituds (x, y, z)	41
4.4.1.	Estimació de les densitats conjuntes $g(x, y)$	42
5.	Acord entre mesures i models	43

5.1. Introducció	43
5.2. Comparació entre mesures i models	43
5.3. Ajust de models deterministes $z = f(x, y, P_1, P_2 \dots)$	44
5.3.1. Cas general	46
5.3.2. Ajust de models polinòmics amb una variable	46
5.3.3. Dades amb error	48
5.4. Incertesa en els paràmetres	48
5.5. Ajust de models estocàstics	49
5.5.1. Màxima versemblança (MV)	49
5.5.2. Propietats dels estimadors de màxima versemblança	50
5.5.3. Error de l'estimador de MV	51
6. Metodologia del laboratori	53
6.1. Calibratge i sistema de mesura	53
6.2. Mètodes de detecció i correcció d'errors	53
6.2.1. Simetria aparent als aparells	54
6.2.2. Variacions sistemàtiques	54
6.2.3. Deriva	55
6.2.4. Mètodes relatius	55
6.2.5. L'experiment preliminar	55
6.2.6. Errors personals	56
6.2.7. Repetició de les mesures	56
6.3. Eines bàsiques	56
6.3.1. El quadern de laboratori	56
6.3.2. Taules	57
6.3.3. Representacions Gràfiques	57
6.3.4. Càlculs	60
6.3.5. Presentació dels resultats: l'article o assaig científic.	60
6.4. Consideracions finals	62

6.5. Exemples de llibreta de laboratori i de publicació científica	62
7. Casos pràctics: exemples i exercicis	73
7.1. Capacitat calorífica de la plata	73
7.2. Distribució d'allaus	79
7.3. Exercicis i problemes per resoldre ¹	83
II. Pràctiques de laboratori	85
1. CONSTRUCCIÓ I CALIBRATGE D'UN TERMOPARELL	87
1.1. Objectius	87
1.2. Introducció	87
1.3. Calibratge	88
1.4. Material	88
1.4.1. Material per a la construcció	88
1.4.2. Material per al calibratge	88
1.4.3. Funcionament del programa per a l'adquisició i el tractament de les dades	89
1.5. Operacions que cal dur a terme	91
1.6. Processament de les dades	92
1.7. Advertiments	93
2. MESURA DE LA CALOR LATENT DE VAPORITZACIÓ DEL N_2	95
2.1. Objectius	95
2.2. Introducció	95
2.3. Material	96
2.3.1. Funcionament de la interfície de connexió de la balança	97
2.4. Operacions que cal dur a terme	97
2.5. Tractament de les dades	98
2.6. Advertiments	98
3. MESURA DE LA CALOR LATENT DE VAPORITZACIÓ DE L'AIGUA	99

3.1. Objectius	99
3.2. Introducció	99
3.3. Material	99
3.4. Operacions que cal dur a terme	100
3.5. Processament de les dades	101
3.6. Advertiments	101
4. DETERMINACIÓ DE LA CONDUCTIVITAT TÈRMICA D'UN METALL	103
4.1. Objectius	103
4.2. Introducció	103
4.2.1. Equació general de transport de la calor	104
4.2.2. Solució estacionària	105
4.3. Material	105
4.4. Operacions que cal dur a terme	105
4.5. Advertiments	106
5. EQUACIÓ D'ESTAT D'UN GAS REAL	107
5.1. Objectiu	107
5.2. Introducció	107
5.3. Material	107
5.3.1. Funcionament del termòstat	108
5.4. Operacions que cal dur a terme	109
5.5. Processament de les dades	109
5.6. Advertiments	109
6. EQUACIÓ DE CLAUSIUS-CLAPEYRON I PUNT CRÍTIC	111
6.1. Objectius	111
6.2. Introducció	111
6.3. Material	112
6.4. Operacions que cal dur a terme	112

6.5. Procesament de les dades	112
6.6. Advertiments	112
7. MESURA DE LA CALOR: CALIBRATGE D'UN CALORÍMETRE	113
7.1. Objectius	113
7.2. Introducció	113
7.2.1. Funcionament d'un calorímetre diferencial de flux	113
7.3. Material	114
7.3.1. El calorímetre	114
7.3.2. Funcionament del programa d'adquisició	114
7.4. Operacions que cal dur a terme	115
7.5. Tractament de les dades	117
7.6. Advertiments	118
8. MESURA DE LA CALOR LATENT DE SOLIDIFICACIÓ DE L'H₂O	119
8.1. Objectius	119
8.2. Introducció	119
8.3. Material	120
8.4. Operacions que cal dur a terme	120
8.5. Tractament de les dades	121
8.6. Advertiments	121
9. MESURA DEL COEFICIENT C_p/C_v D'UN GAS	123
9.1. Objectius	123
9.2. Introducció	123
9.3. Material	123
9.4. Operacions que cal dur a terme	124
9.5. Processament de les dades	125
9.6. Advertiments	125
10.SIMULACIÓ DE L'EQUACIÓ D'ESTAT D'UNA LÀMINA MAGNÈTICA	127

10.1. Objectius	127
10.2. Introducció	127
10.3. Programa de simulació	128
10.3.1. Simulació de Monte Carlo	128
10.3.2. Interfície gràfica	129
10.3.3. Unitats reduïdes	130
10.4. Operacions que cal dur a terme	131
10.5. Processament de les dades	132
10.6. Advertiments	132

CAPÍTOL 1.

Introducció al mètode científic

1.1. L'escenari científic

El nostre objectiu principal en els dos primers capítols és presentar una visió pràctica del mètode científic que pugui ser útil per guiar el treball experimental de l'alumnat de ciències, encara que es fa èmfasi en els aspectes més relacionats amb la física. No pretenem fer un tractat sobre filosofia o història de la ciència, sinó donar una eina útil per acostar-s'hi [Kuhn 1971, Feyerabend 1989, Lakatos 1981, Bunge 1995].

Una de les disciplines científiques més antigues de la humanitat és la filosofia, que té per objectiu augmentar els nostres coneixements usant com a eina el raonament pur. Es fa preguntes del tipus: què és el coneixement?, quines coses es poden conèixer i amb quina fiabilitat?, quin tipus de realitat hi ha més enllà de la nostra consciència?, quina relació hi ha entre la informació que ens donen els sentits i la realitat exterior?, etc. A mesura que algunes d'aquestes preguntes reben una resposta més o menys consistent en algun àmbit concret, neix una nova disciplina que se separa de la filosofia. D'entre totes, particularment tenen èxit les diferents branques del que comunament s'anomena *ciències*. Aquestes branques tenen usualment un component empíric o experimental important. Totes es qualifiquen com a *ciències* i asseguren que el seu èxit es basa en l'ús d'una certa metodologia d'estudi: el mètode científic.

Les diferents ciències asseguren que han arribat a un cert grau de coneixement veritable, fiable i controlable sobre una part de la natura. Els resultats experimentals, els avenços tecnològics i el control sobre molts fenòmens naturals es posen com a arguments que aquestes disciplines estan en la bona direcció del progrés continu del coneixement. Aquest èxit s'atribueix al mètode científic, que, malgrat tot, no es formula de manera consistent, i es donen per estèrils les discussions filosòfiques sobre els seus temes de treball. Aquesta és una visió massa pragmàtica per als filòsofs, els quals sovint troben raonaments formalment erronis en els treballs científics però que sorprenentment sembla que funcionen i condueixen a resultats amb un contingut pràctic espectacular. Què té, doncs, de bo el mètode científic, que permet conèixer coses (fi) a partir d'argumentacions potser mal fonamentades (mitjans)? En aquest capítol volem presentar, sense ànim de fixar una doctrina filosòfica, el mètode científic, de manera que puguem entendre per què funciona. A més, procurem destacar el paper important que té l'experimentació, que és una eina clau en totes les anomenades *ciències*.

Arribats a aquest punt, és convenient establir, perquè no hi hagi dubtes, el que podríem anomenar *principis d'ordre zero* del mètode científic, que no sempre han estat compartits per alguns filòsofs [Feyerabend 1989]:

- Hi ha una realitat exterior a la nostra consciència que pot ser entesa i controlada.
- Els efectes se segueixen de les seves causes i el bon científic busca conèixer aquesta relació.

Si no acceptéssim aquests principis, és obvi que el treball científic no tindria cap sentit. També cal deixar molt clar que el mètode científic, quan s'aplica correctament:

- Aporta coneixements veritables i universals sobre la realitat exterior (continguts, utilitat).

- Estableix el grau de versemblança que tenen les seves prediccions (fiabilitat).
- Proposa procediments específics per obtenir els resultats desitjats (causalitat).
- Dóna orientacions per avançar de manera sistemàtica per zones no explorades (predicció).
- És autocorrectiu, ja que disposa de mecanismes per reduir errors (progrés).
- Connecta les diferents branques de la ciència entre si (consistència).

El mètode científic no és més que una formalització sistemàtica i raonada del que anomenaríem *intel·ligència natural*, que ha guiat la humanitat fins als nostres dies. En altres paraules és el sentit comú (part deductiva) i el coneixement adquirit mitjançant l'assaig i l'error (part empírica). A continuació descrivim els diferents elements constitutius del mètode científic, que dividim en dos grups: estructurals i metodològics. Els elements estructurals són les peces de l'edifici de la ciència i els metodològics, els lligams que uneixen aquests elements. Malgrat que la nomenclatura que usem no és filosòficament molt correcta, és adequada als objectius del curs.

1.2. Elements estructurals

Tal com hem explicat, aquests són els maons amb els quals es construeix l'edifici de la ciència. Els separem en quatre grans grups:

- **Fets:** dades obtingudes mitjançant observació o experimentació.
- **Lleis:** regularitats en la classificació dels fets.
- **Teories:** esquemes formals per entendre i manipular els fets i les lleis.
- **Models:** representacions del sistema natural amb un *escenari* ideal i simplificat en què estan ben definits els problemes que s'han d'estudiar i les seves variables rellevants.

Podem desenvolupar aquestes definicions per precisar-ne millor el significat i el contingut.

1.2.1. Fets

Un **fet científic** és una dada, usualment quantitativa, sobre alguna propietat de la natura. Els fets científics poden dividir-se en dos grups:

- **Observacions:** la informació és subministrada pels sentits corporals, amb l'ajuda d'instruments o sense, i no hi ha manipulació de l'objecte observat (per exemple, les dades astronòmiques).
- **Experiments:** manipulació controlada d'un sistema i quantificació de la seva resposta (per exemple, la mesura i el control de la temperatura d'un sistema).

Els fets científics també s'anomenen **dades** o **resultats** i se suposa que són correctes, encara que sempre s'ha d'especificar quin és el seu marge de veracitat. Per això s'acompanyen d'una altra dada que anomenem **error**, que no s'ha de confondre amb el concepte d'equivocació o errada. En el capítol 3. estudiarem de manera detallada el tractament d'aquests errors. Els fets poden presentar-se en forma de taules o gràfiques. Els detalls d'aquestes presentacions i el seu tractament matemàtic s'estudiaran en el capítol 6.. Com a exemple cal recordar les taules de dades de Tycho Brahe sobre el moviment dels planetes

per establir les lleis de Kepler i que posteriorment van donar lloc a la formulació de la teoria de la gravitació de Newton.

Les observacions qualitatives d'alguns fets no necessiten gaire estructuració formal, però la seva quantificació requereix més esforç i sobretot una metodologia de la mesura (vegeu el capítol 6.). Perquè una dada sigui científica i tingui utilitat, ha d'anar acompanyada d'un esquema conceptual mínim que garanteixi com s'ha mesurat (unitats, escales) i, per tant, que possibiliti la reproductibilitat per altres persones o en altres circumstàncies. Un altre aspecte de les dades o els fets científics és la seva rellevància: què cal observar i mesurar?, per què?, quines són les variables que incideixen sobre el resultat? Aquestes preguntes únicament es poden resoldre dins d'un marc teòric previ, encara que sigui molt elemental.

Com a resum, podríem concloure que els fets no poden separar-se de l'esquema formal, o teoria primitiva, dins del qual s'han obtingut, malgrat que a vegades la teoria que els expliqui correctament encara s'hagi de descobrir.

1.2.2. Lleis

Pot succeir que davant dels fets observats puguem establir alguna regularitat fàcil de formular però sense entendre'n el perquè. El resultat d'aquesta regularitat s'anomena **lleï empírica**. Com veurem en els apartats següents, es poden deduir també altres regularitats o lleis dins del marc d'una teoria.

Una llei pot expressar-se matemàticament de diferents maneres. La majoria de les vegades es fa mitjançant una relació funcional, $A = f(B)$, que ens diu que A es conseqüència de B en la forma determinada per la funció f . Hi ha altres formulacions no funcionals (per exemple, les lleis de la cristal·lografia) i lleis que s'expressen mitjançant proposicions (per exemple, les lleis de Mendel). En principi, es considera que tant els fets com les lleis són veritables i no tenen canvis dràstics, excepte el refinament de les dades (menor error), la delimitació més precisa del domini de validesa de les lleis, etc. Tota aquesta informació serà útil per formular teories més bones que les usades per obtenir les dades.

1.2.3. Teories

La teoria és el nucli dur del mètode científic i, per tant, de qualsevol disciplina científica. Una **teoria** és el marc conceptual que ordena i explica els fets i les lleis. Sense la teoria no som capaços de moure'ns en la immensitat de dades desordenades i majoritàriament irrellevants. La teoria ens guia en la manera de pensar, mesurar, calcular i interpretar. Amb el seu ajust podem entendre què està passant i, encara més, podem preveure nous fets i noves lleis.

Una formulació matemàtica molt habitual de les teories més ben establertes són les equacions diferencials: mecànica clàssica, electromagnetisme, etc. En altres casos, s'usen principis variacionals (extremals). Naturalment, també hi ha teories expressades mitjançant proposicions (teoria de Darwin).

Ara bé, sovint la situació no és tan idíl·lica: les teories poden ser falses. Tot i això, no cal desesperar-se: el mètode científic té eines per detectar les teories errònies o, la majoria de les vegades, incompletes. Les teories, fins i tot dins d'una mateixa disciplina, poden ordenar-se de menys a més generals. Així, començaríem per les teories molt primigènies, basades en el sentit comú i en les observacions acurades (per exemple, la calor es propaga dels cossos calents als cossos freds i mai a l'inrevés). A dalt de tot de la llista trobaríem les superteories, que poden ser d'aplicació universal (segon principi de la termodinàmica).

Cada teoria té un domini d'aplicabilitat en el qual s'usa habitualment, de manera que els problemes no s'estudien amb les teories més generals, sinó amb les més específiques i properes al problema. La pregunta crucial és la següent: d'on surten les teories? Hi ha dues respostes possibles. En la primera, les teories simplement es formulen com a primers principis, la certesa dels quals no es discuteix però els quals han de ser falsables. En una segona ruta, les teories de nivell inferior es dedueixen a partir de les teories més

generals. En aquest cas, la seva veracitat està garantida pel mètode seguit en la deducció, que es basa en la validesa de les teories de partida.

Un altre concepte, no sempre equivalent a teoria, però que també s'usa, és el de **hipòtesi**. Formular una hipòtesi és pressuposar com a veritable un enunciat (principi) sobre el sistema i treure conclusions mitjançant raonaments. La hipòtesi s'usa molt freqüentment en matemàtiques i està lligada al raonament deductiu, que veurem més endavant.

1.2.4. Models

El **model** és una representació més o menys ideal del sistema real, que permet ser estudiat per alguna teoria disponible. En altres disciplines científiques els models no s'usen gaire, però en física són imprescindibles. No podem estudiar cap sistema físic real sense especificar quins en són els components, les interaccions, l'estructura, etc., de manera que puguem aplicar una teoria determinada. Assegurar simplement que un material està format per àtoms o molècules que interaccionen seguint les lleis de la mecànica quàntica és insuficient.

Fixem-nos en la llista següent de propietats observables en un material sòlid: densitat, estructura cristal·logràfica, capacitat calorífica, conductivitat tèrmica, reactivitat, etc. La majoria de les vegades ens interessa conèixer com aquestes propietats depenen de les nostres variables de control (pressió, temperatura, etc.) i com aquests comportaments estan relacionats amb l'estructura interna del material. És impossible contestar aquestes preguntes a partir de l'estructura íntima del material: les partícules elementals, p. e. L'experiència ens indica que cada propietat depèn d'alguna característica interna molt concreta i que ens podem oblidar de la resta de components microscòpics. Així, per a cada estudi particular, modelitzarem el sistema, usant una descripció simplificada però suficient i únicament amb els elements microscòpics necessaris i les seves interaccions. A aquest escenari simplificat, anomenat **model**, li aplicarem la teoria que correspongui per tal d'obtenir una bona descripció d'una propietat del sistema. En alguns casos, el sòlid serà un continu de matèria; en d'altres, un conjunt d'àtoms fixos; en d'altres, aquests àtoms es mouran clàssicament o quànticament segons el que convingui, etc.

En l'estat actual de la física, els models estan sotmesos a canvis, més que no pas les teories que fem servir.

1.3. Elements metodològics

Com ja hem dit anteriorment, els elements metodològics són els responsables d'establir les connexions correctes entre els elements estructurals. Podem denominar-los amb els noms genèrics de **raonaments** o **demostracions**. Es tracta, doncs, de treure conclusions correctes a partir d'unes premisses. El resultat correcte del raonament depèn de les seves dues parts: de la mecànica del raonament, que suposarem que està ben feta, i de la validesa de les premisses, que no sempre podrem assegurar.

1.3.1. El raonament deductiu

Aquest mètode consta dels ingredients següents: premisses o hipòtesis, operacions lògiques o matemàtiques i tesis. La tesi és la conclusió o el resultat final, que, a partir d'un raonament correcte, té un contingut de certesa ben determinat: és veritable o falsa. Per a aquest tipus de raonament és bàsic escollir bé les premisses i estar molt segur de la seva veracitat.

Hi ha una gran varietat de raonaments vàlids. Els que no ho són s'anomenen **fal·làcies** (la conclusió no se segueix de les premisses perquè el raonament està mal fet). Sovint no és fàcil trobar on és el pas erroni. Podem repassar alguns tipus de raonament deductiu: