

El dimoni de Maxwell

Bartomeu Monserrat

Estudiant de física, Imperial College, Londres

bartomeu.monserrat-sanchez07@imperial.ac.uk

Resum

El dimoni de Maxwell és el resultat d'un experiment mental que va proposar el físic escocès James Clerk Maxwell (1831-1879), que si es complís amenaçaria la validesa de la segona llei de la termodinàmica. Segons aquest experiment, seria possible la transmissió de calor d'un cos a un altre de més calent sense cap altre canvi. S'hi exposen diverses solucions, que van des de la interacció entre la mesura i el sistema mesurat, fins a la teoria de la informació.

Aquest article, originalment escrit en anglès, va rebre una menció especial en el Second Year Essay Prize (2008-09) del Departament de Física de l'Imperial College. La traducció al català és del propi autor.

La termodinàmica és la branca de la física que s'ocupa de la descripció de la matèria des d'un punt de vista macroscòpic. Aquest plantejament origina una teoria de la matèria que és independent de la visió microscòpica, i és en aquest punt on radica la importància i la gran capacitat de la termodinàmica.

Inicialment, durant el segle XIX, la termodinàmica es va desenvolupar paral·lelament a la mecanització del món industrialitzat, amb l'objectiu d'estudiar i explicar les propietats i les relacions entre calor i treball mecànic. Avui dia comprèn un camp molt ampli, amb una gran varietat d'aplicacions, des de l'estudi dels huracans fins als forats negres, i és el límit macroscòpic del que es coneix com a mecànica estadística.

La teoria es basa en quatre lleis o postulats molt generals, que introdueixen conceptes familiars com ara la temperatura, i d'altres que no ho són tant, com ara l'energia interna o l'entropia. La termodinàmica desenvolupa una teoria matemàticament rigorosa que fins ara podria semblar que és perfectament vàlida.

De totes maneres, a la segona meitat del segle XIX, Maxwell, conegut per la seva teoria electromagnètica, va proposar un experiment mental (*thought experiment*) que aparentment violava l'anomenada segona llei de la termodinàmica. Si realment aquest fos el cas, tota la teoria col·lapsaria, o com a mínim s'haurien d'introduir canvis fonamentals als quatre postulats bàsics, per adaptar-se a aquest nou fenomen. En definitiva, es tracta d'un exemple de com es fa avançar la ciència.

Físics d'arreu del món han proposat diferents solucions al problema, que van des de consideracions del procés de mesura fins a aplicacions de la teoria de la informació, de manera que avui dia, la major part de la comunitat científica accepta la validesa de la segona llei. Les lleis de la termodinàmica són tan generals i han produït tants resul-

tats positius que els físics d'arreu intentaran mantenir-la tal com està.

1 La segona llei

La segona llei s'anuncia normalment amb els coneguts enunciats de Kelvin i de Clausius, que són equivalents, i que mostren com la segona llei descriu processos irreversibles (Adkins, 1983):

Enunciat de Kelvin: «Cap procés és possible de manera que el seu únic resultat sigui la conversió completa de calor en treball mecànic».

Enunciat de Clausius: «Cap procés és possible de manera que el seu únic resultat sigui la transferència de calor d'un objecte fred a un de més calent».

Per desenvolupar una teoria matemàtica i obtenir previsions quantitatives, la introducció del terme *entropia* és essencial. En la termodinàmica clàssica l'entropia és una quantitat que es deriva de manera natural a partir dels enunciats anteriors com una funció d'estat per a qualsevol procés. Una funció d'estat, com el seu nom suggereix, és una funció dels paràmetres que descriuen el sistema, i només depèn de l'estat del sistema. En particular, per a un procés cíclic d'un sistema aïllat on l'estat inicial i el final són iguals (definició de procés cíclic), l'entropia és la mateixa al principi i al final. Si mirem el sistema des d'un punt de vista microscòpic, l'entropia s'associa al desordre, de manera que més desordre implica més entropia. Amb la introducció de l'entropia, la segona llei es pot exposar afirmant que per a un procés en un sistema aïllat l'entropia només pot augmentar o mantenir-se constant, però mai pot disminuir. A més, es mantindrà constant només per a un procés reversible, i incrementarà per a un procés irreversible.

Una de les conseqüències de la segona llei, que hau-

rem de considerar més endavant, és que implica que no és possible tenir el que s'anomena *moviment perpetu del segon tipus*. Això vol dir que no es pot fer cap màquina que funcioni contínuament usant l'energia interna d'un únic bany de calor. De manera equivalent, no es pot fer cap màquina que funcioni convertint completament calor en treball mecànic. Un bany de calor és un sistema ideal, una font o un dissipador de calor que sempre es manté a la mateixa temperatura. Una manera d'imaginar-se un bany de calor és mitjançant un bany d'aigua de grans dimensions, tan gran que afegir o llevar una mica de calor no canvia la temperatura global significativament. Per exemple, afegir un tassó d'aigua bullent al mar Mediterrani no canvia de manera apreciable la temperatura d'aquest.

2 El problema

L'experiment mental de Maxwell va aparèixer per primer cop en una carta que va escriure al seu amic i científic Peter Guthrie Tait (1831-1901) l'11 de desembre de 1867, i posteriorment el va publicar al llibre *The Theory of Heat*, de 1871. Es basava en una criatura, després coneguda com a *dimoni de Maxwell*, que podia transferir calor d'un objecte fred a un de més calent com a única acció, i per tant, violava la segona llei de la termodinàmica tal com l'expressa l'enunciat de Clausius.

Maxwell havia desenvolupat uns anys abans els primers estadis d'una teoria estadística per a gasos, avui dia molt usada, en què havia descobert que les velocitats individuals de les partícules que formen el gas segueixen una distribució estadística, és a dir, presenten valors dins d'un cert interval. A més, la mitjana dels quadrats de les velocitats de les partícules individuals està associada amb la temperatura de tot el gas.

L'experiment mental anava com segueix: considerau un contenidor separat pel mig per un diafragma, amb un gas calent a un costat i un gas fred a l'altre. De la teoria estadística de gasos segueix que en el gas calent hi hauria algunes partícules lentes, i en el gas fred, algunes de ràpides.

El dimoni de Maxwell va ser descrit per ell mateix com a (Mahon, 2003):

«... un ésser finit que sap les trajectòries i les velocitats de totes les molècules mitjançant una simple inspecció, però que no pot fer res excepte obrir o tancar un forat al diafragma mitjançant una comporta sense massa...».

Maxwell va proposar que el dimoni permetés passar a través del diafragma, cap a l'altre costat, les partícules lentes del gas calent i les partícules ràpides del gas fred, mantenint la resta als seus costats respectius. El resultat és que hi hauria transferència de calor des d'un objecte fred a un de calent sense fer gens de treball mecànic, només usant la intel·ligència d'un ésser molt especial. No s'ha fet treball perquè la comporta no té massa i no hi ha fricció. Si aquest procés ocorregués, es podria usar per

obtenir moviment perpetu del segon tipus, i es violaria la segona llei.

No està gaire clar si Maxwell només volia demostrar la naturalesa estadística de la segona llei, o si realment el seu objectiu era considerar la possibilitat que aquesta no fos vàlida. Els seus comentaris sobre l'experiment mental giren a l'entorn de la naturalesa estadística de la segona llei de la termodinàmica. Com ell mateix va descriure (Goldman, 1983):

«La segona llei de la termodinàmica té el mateix grau de veritat que l'afirmació que si tires un tassó d'aigua dins el mar, no pots tornar a treure la mateixa aigua del mar».

Efectivament, a causa de la naturalesa estadística de la distribució microscòpica de les partícules del gas, hi ha una certa probabilitat positiva, per més petita que sigui, que en un moment donat totes les partícules d'una capsula es trobin només en una meitat d'aquesta, i per tant disminueixi momentàniament l'entropia de tot el sistema, ja que hi hauria més ordre microscòpic. Aquestes fluctuacions són conegudes, i mostren el caràcter macroscòpic de la termodinàmica, que descriu la matèria a l'engròs i només té una validesa estadística.

Tot i que les intencions inicials de Maxwell no són gaire clares, la comunitat científica no s'ha aturat en el fet que el dimoni potser només demostra la naturalesa estadística de la termodinàmica, i hi ha hagut una recerca constant sobre la possibilitat que aquest experiment mental, efectivament, amenaci la validesa de la segona llei de la termodinàmica.

3 El procés de mesura

Un dels avenços més importants per resoldre el problema va venir del físic Leo Szilard (1898-1964), l'any 1929. Va simplificar el problema considerant només una única partícula en un escenari similar al proposat per Maxwell, de manera que es podia tractar més fàcilment que un gas amb un gran nombre de partícules.

El seu disseny consistia en una capsula separada en dues regions, i amb un pistó sense fricció a cada costat de la capsula. A més, la barrera de la partició tenia un forat, que operava com el de l'experiment de Maxwell, utilitzant un dimoni sense fer treball. El nou escenari simula l'experiment original de Maxwell, ja que també esdevé una màquina de moviment perpetu del segon tipus. La figura 1 explica com funcionava l'experiment:

Si el dimoni trobà la partícula a l'altre costat, es podria usar un procés mirall al descrit aquí.

Tot el sistema està en contacte amb un bany de calor, que el manté a una temperatura constant. Per tant, el procés complet consisteix en la partícula fent treball sobre el pistó, que pot ser extret mitjançant algun mecanisme. Per compensar aquest treball fet per la partícula, s'absorbeix calor del bany de calor i, per tant, es manté una temperatura constant. Aquest procés deriva en una

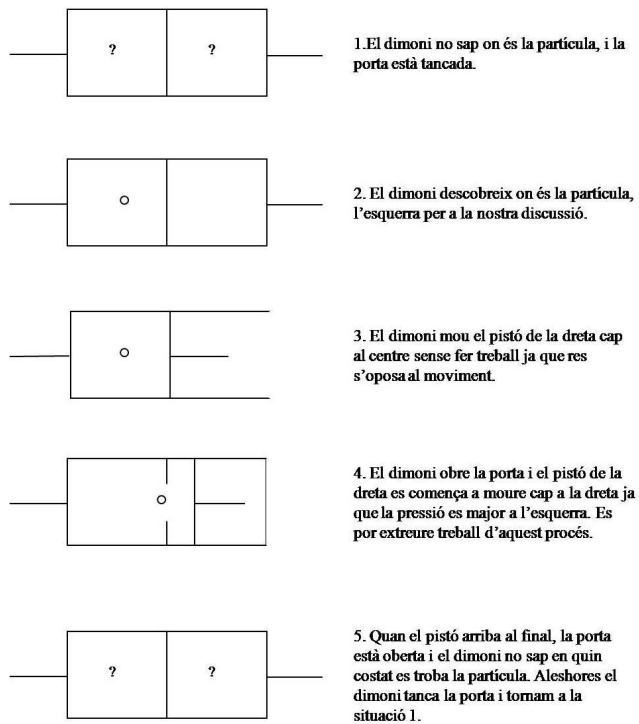


Figura 1: Diagrama que mostra l'experiment dissenyat per Szilard. Adaptat de Splasho

màquina de moviment perpetu del segon tipus. La calor és transformada completament en treball mecànic, i per tant simula l'operació del dimoni de Maxwell. En l'experiment original hi havia diferències de temperatura entre les dues meitats de la capsa, mentre que en aquesta simplificació la diferència que porta a la possible violació de la segona llei és de pressió, però el resultat és el mateix, i per tant, els experiments són equivalents.

La recerca de Szilard parteix d'aquest escenari simplificat. Va proposar que en l'obtenció de la informació d'on es troba la partícula, el dimoni ha de fer una mesura i recordar-la. Necessita recordar-la per saber de quin pistó ha d'extreure el treball mecànic, fet que serà important més endavant. En aquest procés de mesura, segons Szilard, s'usa energia i es crea entropia, que es compensa per la màquina de moviment perpetu i la disminució d'entropia. Aquesta mesura ha de crear entropia perquè en l'acció de mesurar hi ha d'haver alguna interacció amb el sistema mesurat. Una manera possible de portar a terme la mesura és usar llum per localitzar la partícula. L'ús de la llum crea una dissipació d'energia i, per tant, un augment en l'entropia, pel fet que hi ha més desordre microscòpic. En mecànica quàntica aquesta interacció amb el sistema durant el procés de mesura té un paper importantíssim.

Aquestes consideracions sembla que solucionen la disminució d'entropia en l'experiment mental. Alguns científics, però, discuteixen que l'explicació de Szilard no és

Entrada	Resultat
0	1
1	0

Taula 1: Taula de veritat de NOT. Adaptada de Splasho

Entrada		Resultat
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

Taula 2: Taula de veritat d'AND. Adaptada de Splasho

completament satisfactòria. Efectivament, hi ha alguns experiments que han mostrat que es poden mesurar estats d'alguns sistemes simples, com la partícula individual del procés que consideram, d'una manera que no els canvia (vegeu Splasho). Van més enllà i diuen que existeix la possibilitat de crear alguna forma molt intel·ligent de detectar on és la partícula dins la capsa sense destorbar-la. Aleshores, seria possible trobar on és la partícula sense incrementar l'entropia del sistema en el procés de mesura.

4 Informació i termodinàmica

Un estudi més modern del problema procedeix de la teoria de la informació. Hi ha una relació directa entre el maneig d'informació i la termodinàmica, que oferirà una possible solució diferent, però fins a cert punt equivalent, a la de Szilard.

Informació és «coneixement» sobre l'estat del sistema considerat. Els ordinadors, per exemple, treballen amb cadenes de zeros i uns, que representen aquests estats. Es poden fer operacions sobre aquestes cadenes per tenir en compte canvis en la informació. Resulta que algunes operacions són reversibles i d'altres són irreversibles. Considerau l'operació lògica NOT, és a dir, la negació. La seva taula de veritat es mostra en la taula 1. Es pot veure que a partir del resultat de l'operació lògica NOT, es pot recuperar l'entrada, de manera que el procés s'anomena reversible. Ara considerau la taula de veritat de l'operador lògic AND, és a dir, una intersecció, com es mostra en la taula 2. En aquest cas es pot veure que a partir del resultat no es pot recuperar l'entrada, ja que els darrers tres casos tenen el mateix resultat però diferent entrada. Una operació com aquesta s'anomena irreversible.

El punt central en la introducció de la teoria d'informació al nostre problema és que la irreversibilitat en processos d'informació està relacionada amb la irreversibilitat termodinàmica, en el sentit que una operació lògica irreversible com AND deriva en un increment d'entropia. Aquesta idea la va introduir el físic Rolf Landauer (1927-1999) l'any 1961, mentre analitzava els circuits necessaris per emmagatzemar informació.

La solució de l'informàtic Charles Bennett (nascut el 1943) és bàsicament la mateixa que la de Szilard, però la compensació d'entropia apareix en una altra part del procés. Això podria ajudar a solucionar el problema de mesures que no creen entropia.

Bennett considera la mateixa situació que la descrita en la figura 1. Argumenta que el dimoni necessita obtenir informació d'on es troba la partícula, però també necessita emmagatzemar-la. Aquest emmagatzemament és necessari perquè, com s'ha vist anteriorment, necessita saber de quin pistó s'ha d'extreure el treball. Una vegada el cicle s'ha completat, per retornar a l'estat inicial s'ha d'eliminar aquesta informació. El punt essencial en el seu argument és que en aquest procés d'eliminació d'informació l'entropia augmenta, compensant la pèrdua anterior.

Efectivament, l'operació eliminar o esborrar consisteix a convertir tots els elements de la cadena de zeros i uns en zeros. Aquest és un procés irreversible, tal com hem descrit abans, i per tant s'associa amb un increment d'entropia.

Els dos mètodes es basen en el fet que la disminució d'entropia en l'experiment sempre és compensada en algun altre lloc, en el procés de mesura o en l'eliminació de la memòria. Per tant, podem veure que la idea general és intentar mantenir la validesa de la segona llei tal com està actualment, trobant nous processos sobre el funcionament del sistema que fins ara havien estat ignorats o eren desconeguts.

5 La termodinàmica sobreviu

Les lleis de la termodinàmica s'han mostrat molt útils en una gran varietat de situacions, i no hi ha evidència experimental que indiqui que no siguin vàlides.

De totes maneres, hem vist que Maxwell va dissenyar un experiment mental que va amenaçar la validesa de la segona llei, i que s'han proposat diverses solucions al problema. Tot i que hi ha hagut científics treballant en aquesta qüestió durant més de cent anys, i tot i que s'han proposat algunes explicacions molt intel·ligents, encara existeix un cert malestar entre la comunitat científica pel que fa al dimoni de Maxwell (Earham i Norton, 1998, 1999). Alguns científics encara esperen un exorcisme definitiu i convincent.

Els problemes que confronten el coneixement establert són els més interessants, perquè solen desembocar en descobriments nous i originals. A dia d'avui, el dimoni de Maxwell ja ha donat lloc a un desenvolupament de la ciència molt interessant. És molt possible que si algun dia el problema s'aborda d'una manera innovadora, arribarem una mica més enllà en la nostra comprensió de com funciona la natura.

Bibliografia

ADKINS, C. J. *Equilibrium Thermodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.

EARHAM, J. i NORTON, J. D. "Exorcist XIV: The Wrath of Maxwell's Demon. Part I. From Maxwell to Szilard". *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.*. Vol. 29 [4] (1998), p. 435–471.

EARHAM, J. i NORTON, J. D. "Exorcist XIV: The Wrath of Maxwell's Demon. Part II. From Szilard to Landauer and Beyond". *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.*. Vol. 30 [1] (1999), p. 1–40.

GOLDMAN, M. *The Demon in the Aether*. Paul Harris Publishing, 1983.

LEFF, H. S. i REX, A. F. *Maxwell's Demon. Entropy, Classical and Quantum Information Computing*. CRC Press, 2002.

MAHON, B. *The Man who Changed Everything. The Life of James Clerk Maxwell*. John Wiley & Sons, 2003.

SPLASHO. *Maxwell: Thermodynamics meets the demon* [En línia] <<http://splasho.com/blog/maxwell-thermodynamics-meets-the-demon>> [Consulta: 14 de juliol de 2009]