

El nét magnètic del gat de Schrödinger¹

JAVIER TEJADA PALACIOS
Universitat de Barcelona

Ningú no discuteix que el segle xx ha tingut un marcat caràcter quàntic. La mecànica quàntica va nàixer al començament del segle passat de la mà d'experiments que qüestionaven la validesa de les lleis de la física clàssica i, durant cent anys, a més de dotar-se d'un cos de doctrina paradigmàtic, ha anat estenent els seus tentacles sobre totes les ciències naturals. Avui en dia disposem, a més, d'una gran varietat de dispositius tecnològics que es basen en lleis quàntiques.

L'efecte túnel és, sens dubte, el que millor reflecteix la diferent naturalesa de les lleis quàntiques, i és la conseqüència més directa de la dualitat ona-corpúscle i del principi d'incertesa d'Heisenberg. Per a les ments "clàssiques" es tracta d'un efecte màgic que entra en la categoria de l'impossible. Si no, com explicar el fet que un electró pugui saltar barreres infranquejables energèticament? O quina lògica té que els pols d'un imant puguin tenir simultàniament caràcter nord i sud? I què dir d'aquell resultat experimental que indica que el corrent elèctric en un anell d'un material superconductor gira en els dos sentits al mateix temps?

En aquest article comentaré, en primer lloc, les "essències" de l'efecte túnel, per passar després al cas de la inversió quàntica dels pols d'un imant, i entrar així de ple en el segle vint-i-u amb els fenòmens quàntics en objectes de grandària molt major que el dels àtoms i molècules. Finalment, descriuré com és el nét magnètic del famós gat de Schrödinger i quines possibles aplicacions tecnològiques pot tenir.

El primer resultat "anormal" en el camí cap a l'efecte túnel va ser el descobriment que hi havia nuclis d'àtoms, els nuclis radioactius, que emeten partícules alfa. En efecte, fins a començaments del segle xx les lleis de la física no podien explicar l'esmentada emissió, perquè les partícules alfa en l'interior del nucli es troben tan ben confinades que no és possible que s'escapen. Gamov va ser el primer a suggerir que les partícules alfa es podien escapar sense tenir que "saltar" les barreres d'energia que les mantenen lligades. Per escapar, va dir Gamov, les partícules poden travessar les barreres d'energia per efecte túnel. La cosa tenia la seua molla, perquè atès que l'energia total és la suma de l'energia cinètica, deguda al moviment, i l'energia potencial, associada a les forces que mantenen les partícules en l'interior del nucli, resulta que quan les partícules passen a través del "túnel", per escapar-se del nucli, havien de tenir energia cinètica negativa. Tots sabem que açò és totalment impossible, perquè l'energia cinètica és el producte de dues quantitats positives, la massa de l'objecte i el quadrat de la seua velocitat.

¹ Traducció del castellà de María Dolores Burdeus.

També per la mateixa època, Oppenheimer va utilitzar la idea de l'efecte túnel per explicar l'emissió d'electrons per àtoms sotmesos a camps elèctrics. És a dir que, com en el cas de les partícules alfa, per escapar-se dels àtoms els electrons havien de fer un "túnel" en les parets d'energia que els mantenen lligats als nuclis. En els dos casos, la idea de l'efecte túnel salvava la situació, però no explicava com pot ser que existisca aquest "túnel" que involucra energies cinètiques negatives. La mecànica quàntica explica aquesta paradoxa i ha mantingut el nom d'efecte túnel tot sabent que en els fenòmens quàntics no podem parlar de trajectòries.

El primer pas teòric en pro d'una interpretació ondulatòria dels fenòmens que involucren electrons i àtoms el va donar Louis de Broglie quan va postular la dualitat ona-corpúscle. En altres paraules, tota partícula material en moviment té associada una ona que es mou a la mateixa velocitat que la partícula. És a dir, que els electrons i partícules alfa han de comportar-se també com a ones. Schrödinger va postular l'equació que havien de verificar les ones pilot de les partícules, donant lloc així a l'equació "mestra" de la mecànica quàntica.

La idea de la indeterminació quàntica la va proporcionar Heisenberg: si volem conèixer molt bé la posició d'un objecte perdrem precisió sobre la seua velocitat. La física quàntica va nàixer, així doncs, ondulatòria i indeterminista, i són precisament aquests nous atributs els que han encertat amb l'explicació del comportament de la matèria a escales atòmiques.

Tornant a l'efecte túnel de la partícula alfa i electrons, la mecànica quàntica demostra que aquestes partícules poden estar simultàniament a un costat i a l'altre de la barrera d'energia, i la probabilitat que les trobem a cada costat ve donada pel quadrat de la funció d'ones que compleix l'equació de Schrödinger. Així doncs, l'efecte túnel té una explicació perfecta en el marc de la mecànica quàntica i, des dels primers experiments d'emissió de partícules alfa i de la ionització d'àtoms, "hem vist tunejar" electrons des de la superfície de metalls i semiconductors, i parelles d'electrons (parelles Cooper) en els anomenats superconductors, i s'han construït sofisticats instruments de mesura basats en aquest fenomen.

Però, hi ha altres manifestacions de l'efecte túnel que involucren altres magnituds físiques que no siga la posició de l'objecte? La resposta és afirmativa, i ara em centraré a discutir l'efecte túnel de l'orientació del vector moment magnètic. En altres paraules, la conversió quàntica del bit 1 en el bit 0. Ja no es tracta que l'objecte quàntic canvie la seua posició per efecte túnel, com és el cas d'electrons i partícules alfa, sinó d'un imant que, tot i estar quiet, els seus pols magnètics s'intercanvien sense consum energètic. Com explicaré més endavant, aquest fenomen pot ser que tinga alguna cosa a "veure" amb els anomenats computadors quàntics.

Fem per a començar una mica d'història. Els primers xips de l'any 1964 tenien 32 transistors; enguany l'últim Pentium té 28 milions de transistors i es preveu que l'any 2025 els xips seran tan petits com una cèl·lula i posseiran una velocitat major que la del nostre cervell (10 teraflops). Heus ací una dada que reflecteix perfectament la magnitud de la revolució informàtica en què ens trobem: l'any 1999 les empreses nord-americanes es van gastar 44 bilions de pessetes en ordinadors.

La computació actual es basa en l'anomenada lògica binària, i amb ella podrem créixer durant 25 anys més. Però en aqueix any ja haurem arribat al límit de la miniaturització

dels xips, per la qual cosa ja no podem construir computadors més potents ni més ràpids. Així doncs, hem de repensar el futur més enllà del 2025.

D'altra banda, les unitats magnètiques (bits per a gravar la informació magnèticament) que s'utilitzen en els discos durs dels ordinadors per a gravar la informació són cada vegada més diminutes. Les primeres que es van utilitzar pels anys cinquanta eren com un gra de sucre, mentre que les actuals tenen la grandària d'una cèl·lula. En altres paraules, en seixanta anys el volum de les unitats magnètiques s'ha reduït un bilió de vegades.

Un bit magnètic és un imant o brúixola, i per tant posseeix dos pols: el nord i el sud. L'1 correspon a l'orientació del pol N cap amunt, mentre que el 0 es fa correspondre al cas que siga el pol S el que apunta cap amunt. Un camp magnètic orienta la brúixola, i llavors el bit posseeix només un valor dels dos possibles, 1 o 0. Per contra, quan la brúixola està sola, els dos valors 1 o 0 són possibles perquè posseeixen la mateixa energia. És a dir, si tinguérem moltes brúixoles aïllades, la meitat d'elles tindrien el pol nord cap amunt (bit 1) i en l'altra meitat seria el pol sud el que apuntaria cap amunt (bit 0). Quan una brúixola està en un estat (1 o 0), és difícil que canvie aquesta orientació, perquè el canvi exigeix fer un treball. És el mateix que quan ens trobem davant d'una muntanya; la nostra energia és la mateixa si estem davant o darrere, però per passar d'un costat a un altre, en primer lloc hem de pujar-la i després baixar-la, i no sempre tenim les forces i ganes de fer-ho. Per això ens estabilitzem a un costat. En el cas dels homes, l'energia per a pujar ens la proporciona el nostre organisme; en el cas de les brúixoles, l'energia per a canviar l'orientació la proporciona el medi en què es troba. Per exemple, si gravàrem una òpera de Verdi en un disc magnètic i l'exposàrem al sol barceloní de l'estiu, al cap d'un cert temps Verdi sonaria com una òpera atonal: l'energia tèrmica del sol ajuda les brúixoles a canviar la seua orientació i els 1 es converteixen en 0 i els 0 en 1. En altres paraules, si volem guardar de forma segura la informació, el millor és tenir els discos magnètics en ambients freds. De fet, si volguérem guardar per a sempre una certa informació que es correspon amb una determinada orientació dels bits magnètics, hauríem de refredar el disc magnètic a la temperatura més baixa possible. Segons la física clàssica, en el zero absolut (-273°C) la probabilitat d'invertir l'orientació d'una brúixola és, estrictament, zero i la informació guardada seria sempre la mateixa.

Però l'any 1988, el professor Eugene Chudnovsky es va repensar aquest problema des del punt de vista quàntic i va postular teòricament que la inversió dels pols es podia produir quànticament tot predint l'anomenat efecte túnel dels pols: l'intercanvi quàntic dels pols es fa sense treball, per davall de la barrera o muntanya. La informació ja no està segura ni tan sols a zero graus. La certesa absoluta quedava així desterrada i calia començar a torear amb la incertesa quàntica magnètica.

En uns pocs anys hem passat de "veure" aquest efecte túnel en el laboratori a fer-nos preguntes que han anat més enllà del simple intercanvi quàntic de pols. L'última d'aquestes preguntes ha estat si és possible que els dos pols estiguen simultàniament en les dues posicions. En altres paraules, si el pol N es converteix en el S i el S en el N, és possible la seua cohabitació-simultània?

Aquesta pregunta apunta a la pròpia essència de la mecànica quàntica, perquè consisteix a saber si és possible observar, en objectes petits, però molt més grans que els àtoms, la superposició d'estats. Posem un exemple. Suposem que estem menjant cara a

cara amb un amic. Només ens separa la taula que actua a manera de barrera d'energia que ens obliga a fer un treball per a canviar les nostres posicions. Si fórem electrons, podríem canviar les nostres posicions per efecte túnel i a més ocupar-les simultàniament. Però, en ser molt més grans i interactuar a més amb el medi, la probabilitat que ens ocorregui el que als electrons és menyspreable. De fet, aquesta probabilitat es pot estimar matemàticament, i el càlcul ens diu que hauríem d'esperar milions d'anys abans d'experimentar la deslocalització dels nostres cossos. Però si agafem brúixoles de la grandària d'una cèl·lula, resulta que experiments recents realitzats en el nostre laboratori de Barcelona han mostrat que aquestes brúixoles, refredades a temperatures pròximes al zero, posseeixen, durant una milionèsima de segon, els dos pols en les dues posicions. En altres paraules, els bits posseeixen simultàniament els valors 1 i 0. Ara cal parlar no de bits sinó de *qubits* que corresponen a la suma $1 + 0$ i a la resta $1 - 0$. Tornem a tenir altres dues possibilitats, però ara ja no són l'1 i 0 o el blanc i el negre, o el sí i el no o la bondat i la maldat, sinó la suma i resta dels dos.

Estem doncs davant del cas d'objectes clàssics de la grandària d'una petita cèl·lula que es comporten quànticament. Schrödinger va discutir en els anys vint aquesta possibilitat amb una paradoxa que, amb el temps, s'ha conegut com la del gat de Schrödinger. La idea és que si un objecte gran, un gat per exemple, es comportara quànticament podria trobar-se viu i mort a la vegada si el seu estat estiguera lligat al comportament quàntic de la partícula alfa que pot eixir del nucli per efecte túnel. El raonament és el següent: si la partícula alfa està dins del nucli, el gat està viu, però si la partícula alfa ix del nucli per efecte túnel, el gat mor per l'acció d'un verí que es desprèn d'un recipient al mateix temps que es produeix l'emissió de la partícula alfa. Així doncs, es podria concloure que mai no es podrà trobar comportament quàntic en objectes grans per estar sempre lligats amb el seu entorn. Els nostres resultats indiquen que si es redueix la influència del medi sobre objectes de la grandària d'una cèl·lula, aquests objectes posseeixen comportaments quàntics. Per això, els bits magnètics, imants de la grandària d'una cèl·lula, es poden considerar, donat la seua grandària, com els nets del gat de Schrödinger.

Ara es tracta d'albirar quines aplicacions tecnològiques poden tenir aquests "gatets" magnètics. Alguns pensem que una possible aplicació podria ser la de l'anomenat computador quàntic. Un ordinador quàntic podria ben bé estar format per un conjunt de petites brúixoles refredades a temperatures molt baixes i els pols de les quals posseeixen simultàniament caràcter nord i sud, i que a més estigueren connectades entre elles a fi que la indeterminació es poguera propagar entre elles.

Com el lector es pot imaginar, la qüestió no és gens senzilla, perquè cal intentar que un nombre elevat d'aquestes brúixoles estiga "vivint" simultàniament la indeterminació quàntica, i que de sobte totes es facen clàssiques i tornen a transformar-se en bits. De totes maneres, els entesos diuen que en principi no s'endevina que la construcció d'un ordinador de característiques semblants vaja en contra dels principis de la física.

I per a què un computador quàntic? Un computador quàntic es pot entendre com una màquina gegantina de sumar en la que es realitzarà una manipulació en paral·lel de tots els *qubits*, per la qual cosa es podran realitzar molts càlculs simultàniament. Per exemple, s'ha estimat que si volguérem factoritzar un nombre de 250 dígit, el major dels

computadors actuals tardaria segles en fer-ho, mentre que un computador quàntic ho faria en uns pocs dies. Aquesta qüestió apunta directament al nucli de la qüestió de com guardar i transmetre la informació de forma absolutament segura. Es tracta ara de fer-nos noves preguntes per a les quals el computador quàntic siga l'única solució.

Per a quan el computador quàntic? Contestar aquesta pregunta pot ser fàcil, però encertat amb la resposta és difícil. Vegem: en aquest moment hi ha diverses propostes sobre la taula, sis en concret, i sembla que tres d'elles són tecnològicament interessants. Un aspecte positiu és que part de la tecnologia involucrada en la fabricació d'aquest nou computador ja existeix, encara que necessita ser millorada. L'aspecte més delicat des del punt de vista tecnològic, que no científic, és que els *qubits* són tan fràgils que es converteixen en bits a la primera de canvi. Per això, cal aïllar-los del medi i tenir-los "tranquils". Però, si els aïllem, com els mesurem? I si els volem tenir tranquils, significa que cal refredar-los a temperatures pròximes al zero absolut (-273° C).

En acabar, m'agradaria dir que el camí que cal recórrer per arribar a manipular quànticament la informació pot proporcionar-nos grans sorpreses, perquè, encara que sabem el final de la història, aquest camí està ple d'indeterminacions quàntiques.