

Els tres estats de la matèria, o hi ha més?

Alberto Cabrera

Professor de Física i Química · IES Sorts de la Mar. Dénia

La ciència, des dels inicis, ha despertat un interès i un desig profund de coneixements que ha impulsat l'estudi de tot allò que ens envolta. Des de la Terra i fins a arribar a les zones més llunyanes de l'univers, tot pareix format per matèria. La matèria constitueix l'univers visible i adopta diferents formes segons les condicions físiques en què es troba. Ja en l'escola, i més endavant en l'ESO i en el batxillerat, aprenem que la matèria es presenta com a sòlida, líquida o gasosa. Ara bé, gràcies als avanços científics del segle XX, s'ha ampliat el panorama: hi ha estats de la matèria més enllà de la vida quotidiana, com el plasma, el condensat de **Bose-Einstein** i d'altres.

L'estat sòlid. Ací les partícules (àtoms i molècules) constituents de la matèria es troben molt pròximes i unides per forces d'atracció intenses. Això fa que presenten una forma i un volum definits. Encara que es podria pensar que les partícules romanen immòbils, no és així, excepte a 0 K, temperatura a la qual no es podrà arribar mai (tercera llei de la termodinàmica), les partícules vibren al voltant de les seues posicions d'equilibri i aquest moviment augmenta amb la temperatura. Les propietats que poden manifestar (elasticitat, conductivitats elèctrica i tèrmica, duresa, fragilitat, solubilitat i temperatures de fusió i ebullició) depenen tant de l'estructura atòmica com dels enllaços químics que hi ha entre les partícules. Per exemple, el diamant i el grafit, formats els dos únicament per àtoms de carboni, el primer té una extraordinària duresa deguda a la forta xarxa covalent tridimensional que uneix els seus àtoms, mentre que el grafit és exfoliable i condueix l'electricitat a causa de la seua estructura laminar. En aquest estat sòlid pot haver-hi des d'un tros de gel fins a una roca o un cristall de quars.

L'estat líquid. En augmentar la temperatura, o disminuir la pressió, moltes substàncies passen de l'estat sòlid al líquid, on les partícules encara mantenen una certa cohesió interna però amb un major grau de llibertat de moviment per a desplaçar-se les unes respecte de les altres. Això fa que el seu volum siga definit però no la forma, on adopta la del recipient que el conté. La interacció entre les partícules explica la viscositat (resistència a fluir) o la capil·laritat.

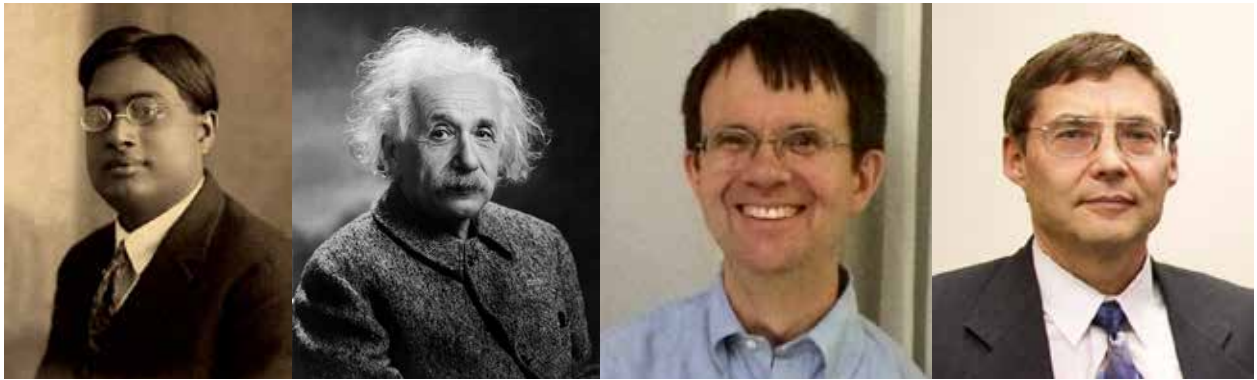
El gas. Si continuem amb l'augment de la temperatura, o amb la disminució de la pressió, podem arribar a l'estat gasós. Les partícules es troben molt separades i ja es mouen a gran velocitat, així que hi ha poca interacció entre les partícules. Els gasos no tenen ni

forma ni volum definit, ja que s'expandeixen fins a ocupar tot l'espai disponible. L'estudi i descripció dels gasos va ser un dels grans èxits de la física clàssica. La teoria cineticomolecular va ser desenvolupada a partir dels treballs de **R. Clausius**, **J. C. Maxwell** i **L. Boltzman**, que desenvolupen i consoliden les idees atòmiques inicials de **J. Dalton**, i es va completar amb les aportacions d' **A. Avogadro**, **R. Boyle**, **J. Charles** i **J. Gay-Lussac**, juntament amb l'equació dels gasos ideals ($PV=nRT$). Aquest conjunt de desenvolupaments va establir els fonaments de la termodinàmica clàssica. Tot i que inicialment es va centrar en l'estudi dels gasos, molts dels seus principis bàsics són extensibles als sòlids i líquids.

Exemples de gasos són l'aire que respirem (barreja d'oxigen, nitrogen i d'altres), el diòxid de carboni de la fotosíntesi de les plantes o l'heli dels globus aerostàtics. A partir d'aquest estat, si arribem a condicions extremes, se'ns obri un nou món.

El plasma: el quart estat. És l'estat més abundant a l'univers. Encara que a la Terra no siga comú, més del 99% de la matèria bariònica (la matèria visible) de tot l'univers es troba en forma de plasma. El Sol, les estrelles, els llamps i les aurores boreals són exemples naturals d'aquest estat. Un plasma es forma quan un gas se sotmet a temperatures tan elevades que els electrons s'alliberen dels seus àtoms i generen una barreja de ions positius i electrons lliures. Aquest gas ionitzat té unes propietats úniques com a gas: és quasi neutre elèctricament en conjunt, però condueix l'electricitat, interacciona amb camps magnètics i és capaç d'emetre llum intensa. El plasma el podem reproduir artificialment en tubs de descàrrega (tubs fluorescents, neó) i en reactors experimentals de fusió nuclear, on és necessari confinar-lo magnèticament a milions de graus Celsius. També són necessaris per als motors iònics en la navegació espacial i la fabricació de microxips i pantalles.

El condensat Bose-Einstein, CBE. Si amb el plasma podem afirmar que ens anàvem a l'extrem més calent en una escala energètica, amb el CBE ens situem en l'extrem oposat: temperatures molt properes al zero absolut ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), de l'ordre de nanokelvins, en què la matèria es refreda fins a un punt on les lleis de la física clàssica deixen d'aplicar-se. Aquest estat va ser predit per Satyendra Nath Bose i Albert Einstein. No va ser fins a 1995, quan **Eric Cornell** i **Carl Wieman**, de la Universitat de Colorado, van poder produir el primer condensat de rubidi mitjançant refredament per làser i confinament magnètic.



Satyendra Nath Bose. (Font: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SatyenBose1925.jpg>)

Albert Einstein. (Font: https://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Albert_Einstein_Head_cleaned.jpg)

Eric Allin Cornell. (Font: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Physics_Nobel_Laureate_Eric_Allin_Cornell_in_June_of_2015.jpg)

Carl Wieman. (Font: https://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Carl_Wieman.jpg)

El 2001 reberen el premi Nobel per aquest assoliment. En aquestes condicions tèrmiques tan baixes, els àtoms bosònics (*spin enter*) perden quasi tota l'energia cinètica, que significa perdre la seua identitat individual o funció d'ona, i comencen a comportar-se com una sola entitat quàntica amb les funcions d'ona solapades, un superàtom col·lectiu. És com si milers o milions d'àtoms actuaren com si sols en foren un. Com deia Carl Wieman, "el CBE ens permet veure amb els nostres ulls el que normalment pertany al món quàntic, és una finestra al món quàntic". Podem observar fenòmens com la superfluïdesa (fluir sense fricció) o la coherència quàntica a gran escala. Com hem vist, per a la seua creació són necessàries condicions extremes i controlades, però les seues aplicacions potencials són molt interessants, com la computació quàntica i la mesura superprecisa del temps i la gravetat.

Ara que ja sabem què són, com es caracteritzen i alguns exemples i aplicacions de cada estat, intentarem analitzar per què aquests dos últims, o altres, no ixen en els llibres de física i química. Quan un alumne arriba a 3r d'ESO i obri un llibre de física i química es troba amb la mateixa tríada sagrada de sempre: sòlid, líquid i gas. El mateix passa en 4t d'ESO i també en batxillerat. En algun llibre d'alguna editorial ambiciosa pot ser que aparega el plasma com a quart estat de la matèria, de passada i poc més. El CBE simplement no existeix en el currículum oficial. Per què s'està ometent sistemàticament dos estats de la matèria que, en realitat, dominen l'univers observable (el plasma) i representen uns dels majors èxits científics experimentals del segle XX? Possiblement hi ha molts factors que cal tindre en compte. El currículum espanyol de secundària i batxillerat està dissenyat per a anar a mínims exigibles i prioritza els conceptes que poden explicar-se amb fenòmens quotidians i matemàtiques elementals. Es podria argumentar que per al plasma faria falta estudiar el fenomen de la ionització i l'electromagnetisme; el cas del CBE exigiria la mecànica quàntica, i per als dos, el model estàndard. Les dues coses pareix que

siguen massa difícils o poc útils per a menors de 16 anys. El resultat és que generacions senceres acaben creient que el 99,9% de l'univers visible és una raresa de laboratori o, simplement, que la matèria només té tres estats.

Els primers tres estats de la matèria són explicats a l'alumnat amb la teoria cineticomolecular. És suficient per a entendre la vida quotidiana i la major part de la tecnologia abans dels anys 80 del segle passat. Per això, pot ser que continuen sent els únics que apareixen en la LOMLOE. Però, de veres que cal comprendre l'electromagnetisme, la ionització de la matèria, la mecànica quàntica formal i el model estàndard per a explicar el plasma i el CBE? És que en 2n i 3r d'ESO (que és on per primera vegada apareix en el currículum els estats de la matèria) citem la termodinàmica de Clausius i Boltzmann per a explicar els sòlids, líquids i gasos? Potser les aplicacions del plasma i, sobretot, del CBE sí que són més difícils d'entendre i explicar en secundària. Tot i així, perfectament es pot explicar tant el plasma com el CBE sense aprofundir, amb el mateix llenguatge que s'explica els altres tres estats, amb exemplificacions, encara que imperfectes. Com se sol dir, no hi ha cap exemple perfecte. Només cal veure els exemples quan s'explica el bosó i el camp de Higgs, fins i tot ja a escala universitària.

Una altra reflexió sobre el fet de parlar només dels tres estats típics de la matèria és la dificultat de definir-ne la frontera. En realitat, podem considerar molts altres estats. A més del plasma i el condensat de Bose-Einstein, també sabem que existeixen el plasma de quarks i gluons (amb matèria mesònica), els superfluids, els fluids supercrítics, els cristalls líquids, el condensat fermiònic (amb àtoms fermiònics) i d'altres. On situem el límit? Quins d'aquests estats caldria ensenyar? És difícil decidir-ho, encara que el plasma bariònic seria probablement el millor candidat. Per tots aquests motius, i segurament d'altres, allò més fàcil ha sigut mantenir, fins ara, els tres estats clàssics en els llibres.