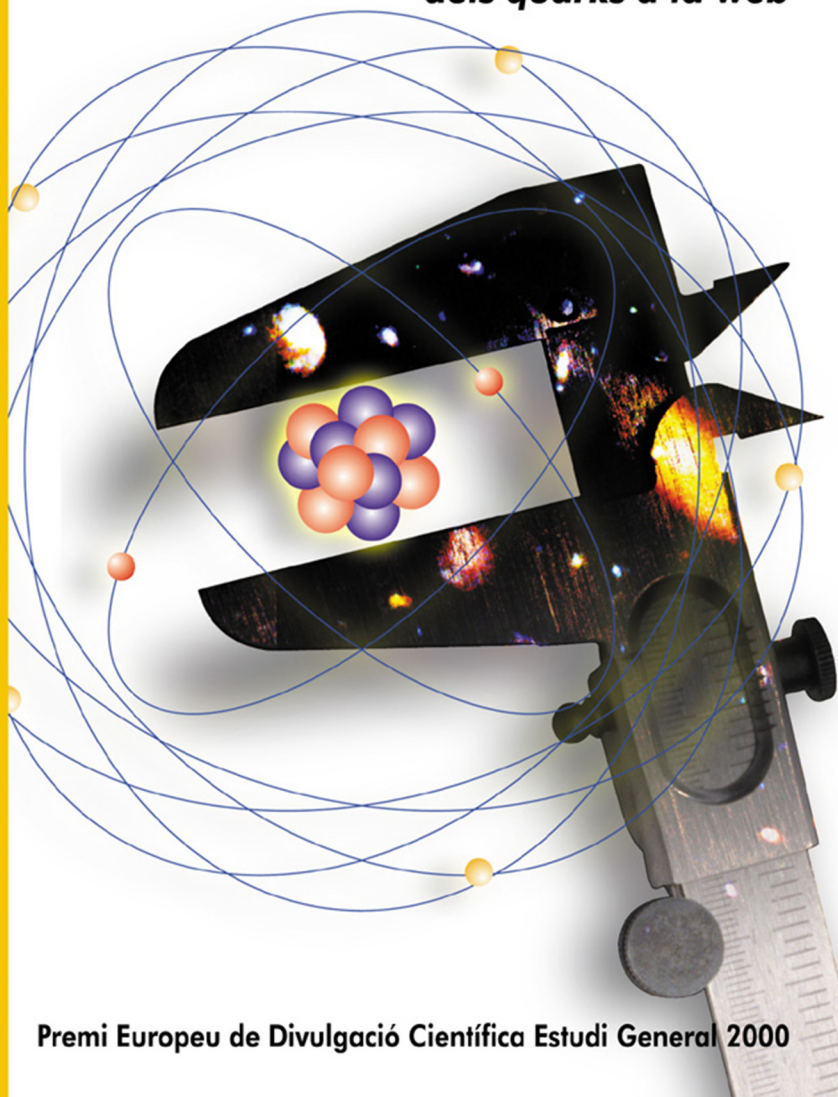


La textura del món

Jorge Velasco

**Les partícules elementals:
dels quarks a la web**



Premi Europeu de Divulgació Científica Estudi General 2000

1. A LES PARTÍCULES, A TRAVÉS DE L'ÀTOM I DEL NUCLI

Lo más bello es el átomo último
el solo indivisible y, que por serlo
no es ya más, pequeño.

JIMÉNEZ, J. R. *Espacio*. Fragment primer

EL NOM

El món està format per partícules, les dimensions de les quals són increïblement menors que les dels objectes de la nostra vida quotidiana. Les partícules ho constitueixen tot: el món, l'univers, nosaltres... L'estudi de les seues propietats i de les lleis que les regeixen ha generat una branca de la ciència anomenada Física de Partícules, a la qual, de vegades, se li afegeix l'adjectiu Elementals. Però l'estatus d'*elemental* canvia amb el pas del temps i partícules que, en algun moment, es va pensar que eren elementals, com ara el protó i el neutró, o algunes altres, més exòtiques, anomenades hiperons, han resultat no ser-ho, ja que estan formades per partícules menors, els quarks, que són, ara, les considerades *elementals*. En conseqüència, elemental, vol dir 'elemental de moment'.

Al llarg dels anys seixanta, hi va haver corrents d'opinió que defensaven una idea denominada *democràcia nuclear*, la qual afirmava que totes les partícules estaven en igualtat

de condicions i no n'hi havia cap de més fonamental que les altres. No obstant aquests corrents, les teories de constituents van triomfar finalment, en formular una millor descripció del món. Una altra denominació, tan corrent com la de Física de Partícules, sobretot entre la comunitat dels físics experimentals, és la de Física d'Altes Energies.

Tots tenim, a partir de la nostra experiència quotidiana, una idea de què és l'energia. Observem que l'acció de molts fenòmens —la caiguda de les gotes de pluja, els projectils llançats contra un blanc, un accident d'automòbil...— augmenta amb la velocitat. No és igual colpejar lleugerament el cotxe de davant o el de darrere, mentre intentem aparcar, que xocar a cent quilòmetres per hora. Per a mesurar l'energia, o qualsevol altra magnitud, necessitem un sistema d'unitats. El més utilitzat és el Sistema Internacional, que considera tres unitats fonamentals amb les quals estem familiaritzats, gràcies a la influència benèfica de la Revolució Francesa, que es va entossudir a imposar-la a la resta del món i ho va aconseguir mitjançant una llei del 18 de germinal de l'any III: el 7 d'abril de 1795. Són el metre per a la longitud, el quilogram per a la massa i el segon per al temps. També mencionarem, perquè la necessitarem més endavant, la unitat de càrrega elèctrica: el coulomb. Així, la velocitat s'expressa en metres per segon; ens diu quants metres recorre un objecte en un segon de temps. En aquestes unitats, l'energia s'expressa en joules. Una pilota de tennis, colpejada amb força, té uns cinquanta joules d'energia i un cotxe de mil quilos que circula a 70 quilòmetres per hora, uns dos-cents mil joules. En la vida quotidiana, la unitat d'energia que millor coneixem és, probablement, el quilovat/hora, que és la quantitat amb què les companyies ens facturen el consum d'electricitat als nostres domicilis. És molt més gran que el joule. Un quilovat/hora (que és

el consum d'un electrodomèstic de mil vats, com ara una estufa o una rentadora, si funciona durant una hora) equival a 3.600.000 joules.

L'enorme interès que el concepte d'energia té per als físics deriva de la propietat següent. Quan es considera un sistema aïllat, és a dir, que no té contacte amb cap altre ni hi ha cap mena d'intercanvi amb l'exterior, ja siga de matèria o d'energia, s'hi observa un fet importantíssim: *l'energia total es conserva*. Aquest és un dels fets essencials de la natura. Fins ara, no s'ha trobat cap excepció a aquesta llei.

Però el joule no s'adapta bé a les necessitats de la Física de Partícules, la unitat d'energia fonamental de la qual és l'electronvolt que s'escriu eV i que es defineix com «l'energia que adquireix un electró en un camp elèctric quan és sotmés a una diferència de potencial d'un volt». Encara que no s'entenga aquesta definició, allò més important és saber que, si la comparem amb el joule, l'eV és una quantitat molt menuda: un joule és igual a 6.250.000.000.000.000 d'eV; més de sis trilions d'eV. Per això, generalment, es fan servir múltiples de l'eV: el MeV o megaelectronvolt, igual a 1.000.000 d'eV; el GeV o gigaelectronvolt, igual a 1.000.000.000 d'eV; o el TeV o teraelectronvolt, que equival a 1.000.000.000.000 d'eV.

La gestació del concepte d'energia va ser un procés llarg i complicat; només fa una miqueta més de cent anys, des de mitjan segle XIX, que ha assolit un paper preponderant en la descripció dels fenòmens de la natura.

En Física de Partícules, ens veiem obligats a treballar amb nombres o molt grans o molt menuts, comparats amb els de la nostra realitat habitual. Per a evitar escriure llargues corrues de zeros, fem servir una notació abreujada que simplifica les coses. Els números 10, 100, 1.000, 100.000, etc., s'escriuen amb un 10 i un numeret, anomenat exponent,

que indica el nombre de zeros que cal afegir-hi. Així, 10.000 l'abreujarem 10^4 . Si l'exponent és negatiu, caldrà dividir: $10^{-4} = 1/10.000 = 0,0001$. D'aquesta forma, escriurem 10^{-15} en compte de 0,000.000.000.000.001, o posarem 10^{20} en compte de 100.000.000.000.000.000.000 (cent trilions). Com veurem d'ara endavant, aquesta notació ens estalviarà temps i espai.

Tornem al nom de la Física d'Altes Energies. Com d'altres arriben a ser? Comparem dos fenòmens diferents. D'una banda, quan l'accelerador LEP (*Large Electron-Positron Collider*; és a dir, Gran Anell de Col·lisió d'Electrons i Positrons, que pertany al CERN, el Laboratori Europeu de Física de Partícules, situat a prop de Ginebra, a Suïssa), al seu túnel subterrani de 26 quilòmetres de llarg, ple d'imants i de cavitats superconductores, accelera en sentits contraris els electrons i les seues antipartícules, els positrons, per tal que, en col·lidir, formen la partícula anomenada Z^0 , els imposa una energia de 45 GeV. De l'altra, imaginem ara un mosquit, que té una massa de 2 mil·ligrams, el qual vola apaciblement, sense saber res de Física de Partícules ni de l'estructura de la matèria, a una velocitat d'un metre per segon. Descobrirem, aplicant la fórmula $E = \frac{1}{2} m v^2$, que la seua energia cinètica és igual a 1 microjoule, que equival a 6.250 GeV, és a dir, 125 voltes més gran que la d'un electró o un positró de 45 GeV del LEP. No semblen tan *altes* les altes energies!

També sabem que els electrons i positrons accelerats pel LEP, en xocar entre ells, engendren moltes partícules noves; per què no ho fan, també, dos mosquits? La resposta és que allò més important no és l'energia total, sinó la densitat d'energia, és a dir, la quantitat d'energia que som capaços de tancar en un volum determinat. L'electró té els seus 45 GeV *empaquetats* en un volum d'uns 10^{-48} cm^3 , mentre que el mosquit els té en uns 10^{-2} cm^3 , és a dir: la densitat

Entre els anys 1930 i 1940, els físics revisaren a fons les seues opinions sobre els constituents elementals de la matèria que, al llarg de la dècada dels vint, se suposava que es reduïen a l'electró i el protó. Aquesta revisió, i els problemes que se'n derivaren, són l'origen del naixement del camp de la Física de Partícules Elementals moderna.

Seguiré, per tant, l'opinió dels historiadors i parlaré una miqueta, abans d'entrar del tot en matèria, en el pròxim capítol, del naixement i la consolidació de la Física de Partícules. D'aquesta forma ens familiaritzarem amb la manera de fer dels físics, amb la interacció entre les idees i els experiments, i també veurem com les conseqüències pràctiques de tot això perduren visiblement en els nostres dies, en objectes d'ús quotidià.

Els raigs X i la radioactivitat

La fi del segle XIX va ser una època admirable en descobriments que condicionaren el desenvolupament de la física contemporània. L'any 1895, Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923) va demostrar l'existència d'una radiació molt penetrant que impressionava plaques fotogràfiques i produïa la fosforescència de molts materials. La va anomenar raigs X, perquè en desconeixia la procedència. Röntgen va ser guardonat, per aquest descobriment, amb el primer premi Nobel de Física, l'any 1901.

El febrer de 1896, Antoine Henri Becquerel (1852-1908), professor de l'Escola Politècnica de París, estudiava els raigs X, descoberts feia poc de temps. Va embolicar sals d'urani en un paper fosc i ho va posar tot sobre una placa fotogràfica, coberta per una làmina de coure. Pensava que, si la llum del

sol provocava que la sal emetera raigs X, aquests impressionarien la placa fotogràfica, però no travessarien el coure. Amb aquestes paraules, ens conta què va passar:

Des del 3 de març al 3 de maig, vaig mantenir les sals dins d'una capsula amb parets de plom, que va roman-dre en la foscor... Les sals continuaven emetent radiació activa. Totes les sals d'urani que vaig estudiar em donaren els mateixos resultats. He arribat, per tant, a la conclusió que l'efecte es deu a la presència d'urani en aquestes sals.

Becquerel havia descobert un nou fenomen. Poc de temps després, el 1898, Marie Sklodowska-Curie (1867-1934) va descobrir que l'element tori emetia una radiació semblant i, amb el seu marit, Pierre Curie (1859-1906), van descobrir el radi, milions de voltes més actiu que l'urani, i encunyarren el terme *radioactivitat* per a designar aquell fenomen. Els tres van compartir el premi Nobel de 1903 pels seus treballs.

El descobriment de l'electró i la realitat de l'àtom

L'estudi de com J. J. Thomson (1856-1940) va descobrir l'electró és molt interessant per diversos motius. Primer, perquè ens mostra com un descobriment molt important és el resultat de l'esforç combinat de moltes persones. Però també perquè les tècniques que va fer servir han tingut, després, unes aplicacions pràctiques que han canviat les nostres vides. Molta gent no sap què és l'electró i hi ha qui ni tan sols en coneix l'existència; però ningú no ignora el terme electrònica, que designa la indústria basada en les propietats de l'electró i en les seues aplicacions, que van del transistor

al xip. I, en tercer lloc, perquè cent anys després del descobriment, i a pesar dels grans progressos que s'han fet des d'aleshores, i sobretot si considerem que la imatge del món que ens donen les teories actuals és completament distinta de la que predominava en l'època de Thomson, l'electró continua sent, curiosament, una partícula elemental; de fet, és la menor de les partícules fonamentals carregades.

Comencem la nostra història, situant-nos a mitjan segle XIX i al centre d'un problema que preocupava els físics d'aleshores: estudiar les descàrregues elèctriques en condicions particulars. Tots recordem un pioner il·lustre: Benjamin Franklin, que, gràcies al seu estel i al seu desig de saber més sobre un tema que la majoria dels estudiosos ignoraven, va descobrir el parallamps, un dia de tempesta, i no hi va perdre la vida de miracle. Un any més tard, a Sant Petersburg, G. W. Richmann va intentar repetir la proesa, amb una fortuna adversa: el llamp el va matar. Un altre pioner dels estudis d'electricitat, el pastor de l'Església Unitària Joseph Priestley, va comentar: «No tots els homes poden morir d'una manera tan gloriosa».

Suposem, ara, que tenim un tub de vidre, del qual, amb una bomba de fer el buit, n'hem extret tot l'aire. El buit aconseguit pels pioners, aleshores, era de mala qualitat: la pressió de l'aire residual (el que no s'havia pogut traure del recipient) era unes seixanta vegades menor que la pressió atmosfèrica exterior. En connectar els extrems del recipient a una bateria, s'observaren, a l'interior del tub, unes estranyes descàrregues elèctriques. D'on provenien? Avui sabem que es deuen al xoc dels electrons del corrent contra els àtoms de gas que hi restaven i que aquelles eren les col·lisions que provocaven la llum. Els tubs de llums fosforescents i de neó actuals es basen en aquest principi.

El primer pas, el va fer Heinrich Geissler (1814-1879), en inventar una bomba de fer el buit que, dins del tub, aconseguia pressions equivalents a només unes mil·lèsimes de la pressió atmosfèrica. Julius Plucker (1801-1868), professor de la Universitat de Bonn, va introduir una altra millora: dins del recipient de vidre, va posar unes plaques metàl·liques, unides a la font elèctrica. La que anava al pol positiu s'anomena ànode i la que s'unia al pol negatiu càtode. Quan se n'evacuava el gas, deixaven de produir-s'hi les descàrregues elèctriques, però hi apareixia una resplendor verdosa a prop del càtode, la posició de la qual no depenia del lloc on estiguera l'ànode. Era com si, del càtode, n'eixira alguna cosa que travessava el tub buit i s'agrupava al voltant de l'ànode. Després de molts estudis i de moltes discussions i progressos, seguits d'errors i passos en fals, es va arribar a la conclusió que els raigs eren partícules amb una càrrega negativa, però que no podien ser les molècules que constituïen l'aire normal.

En aquest punt entra en escena J. J. Thomson que, l'any 1897, va demostrar que els raigs eren desviats de la seua trajectòria per les plaques elèctriques carregades. L'alemany Heinrich Hertz (1857-1894) també ho havia intentat, sense aconseguir-ho, l'any 1883. Però els tubs de Thomson tenien un buit de més qualitat que el de Hertz i per això els efectes negatius del gas residual eren insignificants. La desviació dels raigs era tan gran que es dirigien a la placa positiva i això confirmava que la seua càrrega era negativa. El tub de raigs catòdis de J. J. Thomson, el coneixem molt bé, ja que, sens dubte, hem passat moltes hores contemplant les imatges que ens proporciona la seua versió moderna. Es tracta del familiar tub que constitueix el cor del nostres televisors tradicionals, el funcionament del qual mostraré en la figura 1. Aquest tub va ser, també, el primer *accelerador*

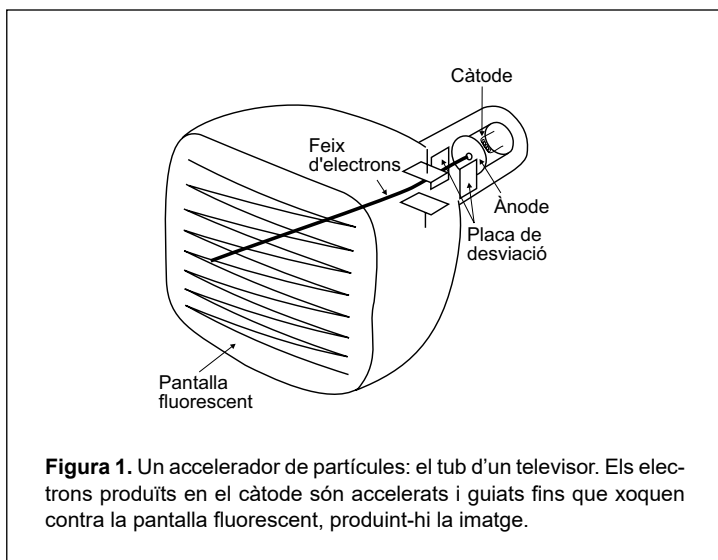
artificial de partícules. Un electró produït al càtode és sotmés a un camp elèctric d'uns quants milers de volts i adquireix, a la fi del seu trajecte, una energia de trenta a cinquanta mil eV, que el fa desplaçar-se a una velocitat d'uns quants milers de quilòmetres per segon.

Però encara s'havien d'estudiar més a fons la naturalesa i les propietats dels raigs catòdics. Thomson va iniciar una sèrie d'experiments que li permeteren descobrir que les propietats dels raigs no es modificaven si canviava el material del càtode, o el de l'ànode o el tipus de gas; els corpuscles eren, realment, constituents universals de la matèria. Més tard, va calcular el quocient entre la massa i la càrrega de les partícules i va arribar a la conclusió que el seu valor era de $0,54 \times 10^{-11}$ quilograms/coulomb; una xifra que, comparada amb l'actual, de $0,5687 \times 10^{-11}$ quilograms/coulomb, resulta excel·lent.

Thomson era una persona atrevida. Només havia calculat un quocient: el de la massa i la càrrega de les partícules que formaven els raigs, però va fer un salt endavant formidable i en va aventurar una conclusió molt més important:

Tenim, en els raigs catòdics, matèria en un estat nou, un estat en el qual, la subdivisió de la matèria va molt més enllà que en l'estat gasós ordinari: un estat en què tota la matèria, és a dir, matèria derivada de diverses fonts, com ara hidrogen, oxigen, etc., és de la mateixa classe; i aquesta matèria és la substància de què estan fets tots els elements químics.

Thomson no havia demostrat realment l'existència d'aquestes *partícules menudíssimes*, però els estudis posteriors confirmaren la seua hipòtesi. L'any 1894, el físic angloirlandés George Johnstone Stoney (1826-1911) havia proposat la paraula electró per a designar la unitat d'electricitat gua-



nyada o perduda quan els àtoms neutres es convertien en ions carregats. Després de l'experiment de Thomson, s'acceptà la realitat d'aquelles partícules, que s'anomenaren electrons.

Per tal de determinar la càrrega i la massa dels electrons se n'havia de mesurar almenys un separatament. Les primeres estimacions, poc precises, també les van fer Thomson i els seus col·laboradors, gràcies a l'invent d'un aparell, la cambra de boira, que permetia visualitzar les trajectòries de les partícules que la travessaven. Però va correspondre al nord-americà R. A. Millikan (1868-1953), la primera mesura precisa de la càrrega elèctrica de l'electró, gràcies a una sèrie d'enginyosos experiments que va fer entre 1906 i 1914, els quals li reportaren el premi Nobel de Física de 1923. Va obtenir el valor $1,592 \times 10^{-19}$ coulombs, molt pròxim a l'actual: $1,602 \times 10^{-19}$ coulombs. Amb aquest valor ja era possible saber, també, la massa de l'electró, que

va resultar increïblement menuda: 9×10^{-31} quilograms. El valor actual és de $9,109389 \times 10^{-31}$ quilograms; això vol dir que l'error va ser inferior al dos per cent.

Aquests resultats (i molts altres, com el fenomen anomenat moviment brownià) van convèncer, fins i tot els més escèptics, de la realitat dels àtoms. Un dels opositors més forts a la idea atomista, l'alemany Wilhelm Ostwald (1853-1932), va reconèixer la victòria de la nova concepció de la matèria en l'edició de 1908 del seu conegudíssim llibre *Fonaments de Química General*, en el qual afirmava:

Ara estic convençut que, des de fa poc de temps, disposem ja d'una evidència experimental sobre el caràcter discret o granular de la matèria, la mateixa que la hipòtesi atòmica havia estat buscant, sense èxit, durant centenars o milers d'anys.

Potser ens convé, arribats que som en aquest punt, fer una breu reflexió sobre la importància de les idees preconcebudes com una guia de la investigació científica. De vegades, s'ha dit que el científic s'ha de dedicar a anotar i acumular dades, sense cap prejudici, i, després, ha de construir noves teories per a tractar d'explicar-les. N'hi hauria prou a examinar la pràctica dels científics, com ara el cas de Thomson i l'electró, per a descobrir com d'equivocada és aquesta idea. Al mateix temps que Thomson duia endavant el seu experiment, Walter Kaufman en feia un de semblant, a Berlín. Avui sabem que els seus resultats eren, fins i tot, més precisos que els de Thomson; però Kaufman no va pretendre haver descobert una nova partícula. Per què? Bastants historiadors creuen que perquè les seues filosofies eren diferents. Com molts altres físics alemanys i austríacs, Kaufman estava molt influït per les idees del físic i filòsof vienès Ernst Mach (1836-1916), que afirmava que no era

científic postular objectes hipotètics, com els àtoms, que no es podien observar directament, (difícilment hauria pogut saber Mach que, al final del segle xx, seria possible *veure* directament els àtoms, amb instruments com el microscopi d'efecte túnel). Potser Thomson va descobrir l'electró perquè creia en l'existència de les partícules fonamentals. Això demostra que certes concepcions filosòfiques sobre com és la natura són més fructíferes que unes altres i, així, els *prejudicis* filosòfics que guien els treballs dels físics ens mostren la seua gran importància.

En això de l'acceptació de la realitat dels àtoms, com en el cas de l'origen de la Física de Partícules, tampoc no hi ha una data definitiva. El conegut físic francès Jean Perrin, que havia demostrat que les partícules dels raigs catòdics tenien una càrrega elèctrica negativa, va rebre el premi Nobel l'any 1926, per haver confirmat l'estructura atòmica de la matèria. Podem considerar, per tant, la publicació del seu llibre *Els àtoms* en 1913, que resumia i harmonitzava les conclusions de diversos experiments independents, com l'acta oficial de l'acceptació definitiva de la teoria atòmica en els àmbits científics acadèmics.

Les investigacions dels físics experimentals permetren saber el *volum* dels àtoms i posaren de manifest un món completament nou, de dimensions minúscules, en el qual les longituds interessants ja no eren, com en la nostra vida quotidiana, les que se centaven en el metre, sinó cent mil milions de voltes menors: 10^{-10} metres.

L'aventura acabava de començar. El descens vers un nou món de dimensions vertiginosament menudes estava en marxa i, encara avui, cent anys després, continua. Abans que ens haguérem acostumat a les minúscules dimensions atòmiques, n'havíem de descobrir unes altres, milers de vegades més reduïdes: les del nucli atòmic.