

III JORNADA D'HISTÒRIA DE LA CIÈNCIA I ENSENYAMENT

Sessió II

LA CONSTRUCCIÓ FÍSICA DE L'ÀTOM QUÍMIC: DE MENDELÉIEV A PAULING

MERCÈ IZQUIERDO

DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LES MATEMÀTIQUES
I DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS; CENTRE D'HISTÒRIA
DE LES CIÈNCIES. UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA.

Paraules clau: *atomisme, llibres de text, segle xx, ensenyament de la química*

The physical building of chemical atom: from Mendeleiev to Pauling

Summary: *Chemistry in the sixteenth century has built a «chemical atom» that has permitted to write formulae and chemical equations, to relate properties of substances with their structure, to assign a valence to the elements and to classify chemical elements in a periodic table. But many chemists didn't agree with the real existence of the particle «atom». It was necessary to obtain new evidences until a general acceptance the «physical atom» was achieved: a complex particle with an internal structure.*

In this paper some ideas derived from the analysis of textbooks in the first half of the sixteenth century are proposed. The final conclusions (transitory, because the research is not ended) show the evolution of the rhetoric and the explanations about the structure of the electronic atom and, also, the influence of the periodic table in its. Several considerations about teaching chemistry will be made.

Key words: *atomism, textbooks, sixteenth century, chemistry teaching*

Aportació de la història de la química (HQ) a la didàctica de la química (DQ)

La química actual és, per a la majoria de les persones, «aquella ciència que parla d'àtoms i d'enllaços i que no es pot aprendre si no se sap for-

mular». Encara ara, a moltes escoles, es comença l'ensenyament de la química amb les fórmules. «Com, si no es fa així —diuen els professors que prenen aquesta opció— podran explicar correctament, els alumnes, una reacció química? Com podran entendre el significat d'un canvi químic, si no disposen del llenguatge adequat per parlar-ne?». Actuant així, s'oblida que la química és la ciència que s'ocupa del canvi químic (del seu control, manipulació, aprofitament, identificació, classificació...), i no dels àtoms; que les fórmules prenen sentit en el «joc de la química» i no en tenen per a les persones que encara no saben química; abans de proporcionar el llenguatge i l'explicació, cal saber de què es parla.

La HQ és una companya inseparable de la DQ. Si aquesta darrera és la reflexió sobre la professió docent (es pregunta què és i què fa un bon professor de química, i per què ho fa), es veu de seguida que, a classe, es necessita una imatge evolutiva de la química, perquè al llarg del temps que l'alumne roman a l'escola els seus coneixements van canviant, i ho continuaran fent quan l'alumne deixi l'escola. Aquesta mirada cap al futur requereix una mirada cap al passat, quan la química era diferent de l'actual, però s'enfrontava a problemes que la van fer evolucionar i als quals es refereixen els termes químics i les entitats a les quals es refereixen. Aquests problemes són els que interessin a la DQ, perquè, sense viure'ls a classe, els termes especialitzats de la química perden bona part del seu sentit.

La representació del canvi químic mitjançant fórmules que es refereixen a àtoms i molècules és una d'aquestes respostes que arriben als alumnes abans d'haver-se pogut plantejar preguntes. Manca experiència per a saber què es vol dir amb aquest llenguatge tan esotèric, tan diferent del quotidià. Per això, molts alumnes no arriben a plantejar-se per què només hi ha els àtoms de la taula periòdica, quina diferència hi ha entre la quantitat de matèria i la quantitat de substància, la diferència entre substància simple i element..., qüestions, totes elles, que formen part del nucli teòric propi de la química.

La teoria atòmica és imprescindible per a interpretar el canvi químic. Però, per entendre-la, cal situar-se en la tradició de «fer substàncies» i tenir d'antuvi una percepció del canvi químic i de les regles de joc que permeten controlar-lo. De fet, l'explicació atòmica es va introduir en la química més tard que en la física, perquè no és fàcil imaginar uns àtoms permanents quan s'està parlant de canvi substancial, en el qual, aparentment, la matèria es transmuta, i tampoc és fàcil esbrinar quines propietats tenen uns suposats àtoms (pocs) que puguin explicar l'enorme diversitat de propietats de les substàncies de les quals formen part.

L'atomisme químic i la taula periòdica: l'àtom, una hipòtesi

Malgrat aquestes dificultats, la hipòtesi atòmica es va anar imposant al llarg del segle XIX. Així, si bé no tots els químics acceptaven l'existència real dels àtoms, s'havien generat un conjunt de conceptes, imatges i llenguatges que feien que unes determinades masses de reacció dels elements es poguessin considerar «àtoms químics». A mitjan segle XIX l'atomisme químic no aconseguia diferenciar àtoms de molècules, i van ser necessàries evidències físi-

ques (com, per exemple, les calors latents de gasos, que mostren diferències que es podien relacionar amb el nombre d'àtoms de les corresponents molècules) que Cannizzaro, en un llibre de text (1860), va combinar de manera magistral amb les evidències químiques i estequiomètriques per aconseguir, finalment, una taula fiable de «masses dels elements». Aquesta taula va ser la clau per a configurar el concepte de valència, que va tenir dos resultats molt importants: va permetre unificar i representar les fórmules (fins i tot en l'espai) i, sobretot, confegir un «sistema periòdic dels elements» (Lothar Meyer i Dmitri Mendeléiev), elaborat amb criteris didàctics que Mendeléiev fa molt explícits en el seu llibre *Principis de química*.

La taula periòdica de Mendeléiev proporciona una panoràmica general de la química a partir de les característiques dels elements i és la màxima expressió de la potència de l'atomisme químic. La proposta per tal que els alumnes puguin copsar d'un cop d'ull tot el panorama dels canvis químics, però relacionats tots ells per la llei periòdica dels elements. S'estableix a partir del convenciment que cada element és diferent dels altres i irreductible; en conjunt, la posició dels elements en la taula mostra les interaccions entre ells que són possibles i les que no ho són. Només un dels grups, afegit posteriorment, està format per elements que no interaccionen i que, per tant, no havien estat detectats pels químics. I, com deia Mendeléiev, «la idea d'element suggereix la idea d'àtom». L'àtom era encara una hipòtesi per a interpretar les interaccions químiques en les quals intervenia.

Mentre els químics del tombant de segle «fan química» en les indústries i en els laboratoris universitaris, nous fenòmens i nous enfocaments teòrics malden per fer-se lloc. Són les «radiacions» i el seu impacte sobre els materials; les ones i els instruments que en fan ús; la definitiva acceptació de la naturalesa particulada de la matèria, que s'estén al corrent elèctric i a l'energia; una nova termodinàmica. Comencen uns anys en els quals joves investigadors (en una Europa que viurà dues guerres mundials en quaranta anys, així com una gran crisi econòmica i cultural entre les dues guerres) construiran l'àtom físic que necessita la química. Amb això, donaran un nou significat a la taula periòdica dels elements i proposaran una nova explicació a la química.

Els llibres de química i la química

Intentem analitzar la presència progressiva de les noves idees en els llibres de text o manuals que es feien servir a l'ensenyament de la química a la universitat i en els quals divulgaven els nous descobriments entre un públic culte; poc a poc, l'àtom químic esdevé una partícula real, a la qual es dóna una configuració que, amb les «regles de joc» oportunes, permet explicar els canvis químics. I aquestes regles es construeixen de manera literària en els llibres.

La química és una ciència experimental, però, si es vol ensenyar, s'ha de poder escriure sobre ella. Segons Hannaway (1975), la química moderna apareix a començaments del segle XVII amb l'aparició d'un llibre: *Alchemia*, d'Andreas Libavius. En aquest llibre es posa per escrit la manera de treballar dels deixebles renaixentistes de Paracels (metges que utilitza-

ven medicaments químics), trencant, així, la tradició de mantenir en secret una pràctica d'intervenció en la natura que, com que podia tenir conseqüències no volgudes, havia de ser responsable i guiada per una il·luminació que no aconsegueix tothom. Els «tòpics» als quals es dediquen les lliçons o capítols del llibre són les operacions i els instruments de la química: els destil·lats (els materials que s'obtenen amb les destil·lacions), els precipitats (a partir de les solucions), les calçs (que resulten de la calcinació), els magisteris (que resulten d'operacions complexes), els elixirs... S'aconsegueix, així, fer una ciència del que havia estat una manipulació artesana en tallers que disposaven d'instruments propis. Les intervencions i els instruments (les bombes de buit, els calorímetres i termòmetres, els circuits elèctrics...) donen sentit als conceptes químics que s'aniran configurant al llarg d'aquesta tradició de «fer substàncies» (com: substància simple i composta, element, àtom, molècula, equivalent, afinitat...), que tenen, per això, una dimensió praxeològica i no es poden comprendre correctament sense la pràctica química.

El llibre de Libavius va proporcionar una pauta que va ser seguida pels químics-farmacèutics-metges durant gairebé dos segles; segons aquesta pauta, les substàncies es classifiquen segons les seves propietats, que es consideren degudes a algun principi estructural que comparteixen quan comparteixen també les propietats; obre un camí difícil, que arriba fins al moment present i que es podria representar per un seguit de manuals de química que, l'un darrere d'un altre, van reconstruint per escrit els fenòmens químics, amb uns recursos literaris que van esdevenint característics de la pràctica química i que, alhora, la identifiquen.

En la segona meitat del segle XIX els manuals de química, que havien estat escrits fins aquell moment pels grans mestres de la disciplina (Bergman, Lavoisier, Thomson, Berzelius, Liebig...) i en els quals predominava una retòrica magistral, cedeixen el protagonisme als «llibres de text», escrits per a facilitar els exàmens que calia superar per accedir a llocs de treball ben remunerats i en els quals predomina una retòrica apodíctica (Izquierdo, 2000 i 2005), amb un capítol dedicat a estequiometria a partir del qual es proposen «problemes» per ensenyar a formular. Comença a aparèixer una «química de paper» contra la qual es revoltent alguns professors, com per exemple H. Kolbe (Rocke, 1993).

A mesura que l'ensenyament es normalitza i els graus universitaris determinen professions reglades, els llibres de text esdevenen «la disciplina». En els llibres de text de finals del XIX es configuren també les «bones explicacions» que van fent creïbles els àtoms. Això és el que va fer Mendeléiev. En el seu llibre de text *Principis de química*, parla dels elements i què poden ser aquests, sinó àtoms irreductibles? En efecte, escriu a *Le Moniteur Scientifique* (març 1879, núm. 21, p. 693): «Le mot élément appelle l'idée d'atome» (Bensaude-Vincent, 1994).

La necessitat de disposar de joves amb una bona formació científica i tècnica que es pogués assolir en uns pocs anys no només es va mantenir, sinó que ha anat augmentant. Per tant, el llibre de text s'ha mantingut i ha tingut un lloc important en la construcció del co-

neixement químic actual, que estructura i selecciona determinats aspectes de la recerca per fer-la comprensible.

La teoria atòmica en els llibres de química

La química havia imaginat l'àtom químic que necessitava, el que li permetia calcular i escriure química. Els químics de les indústries, dels laboratoris de recerca... no pensaven que fenòmens com la radioactivitat podien canviar les regles del canvi químic ni aquests fenòmens els feien perdre la confiança en les lleis de la química, com per exemple la llei periòdica. Eren els físics els que ara aportaven nous coneixements, revolucionaris, amb els quals construïen... l'àtom dels químics! Va caldre inventar (descobrir?) els electrons, proposar una nova «electrodinàmica» i interpretar les valències... La química – física va esdevenir, des de 1887 (any de la fundació de *Zeitschrift für Physikalische Chemie*), la punta de llança d'aquestes innovacions. Els manuals de química general van anar incorporant les innovacions procedents d'aquestes recerques, però només les que s'hi podien afegir sense trencar la unitat del llibre ni introduir dubtes que dificultessin els aprenentatges dels alumnes. Però es publicaven també llibres que divulgaven les conferències i seminaris dels científics amb un llenguatge més planer que el de les revistes de recerca.

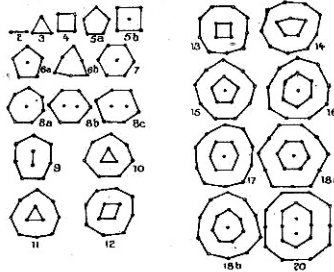
Per exemple, en les conferències que J. J. Thomson va pronunciar el 1903 (Thomson, 1922), es reprenen les idees de Faraday sobre les línies de força en un camp magnètic i s'apliquen als camps elèctrics (els tubs de Faraday, que s'estenen per l'èter sense omplir-lo totalment i que hi interaccionen); atribueix una estructura atòmica a les càrregues elèctriques que formen el començament i el final de les línies de força: els electrons. Aquests havien estat postulats per Arrhenius i Helmholtz, reinterpretant les lleis de Faraday, i s'havien identificat com a constituents dels raigs catòdics. Lorentz i Zeeman havien calculat la relació e/m a partir dels espectres atòmics el 1896 i Thomson, un any després, a partir dels raigs catòdics; aquesta relació havia estat discutida i comparada amb la relació entre la càrrega i la massa dipositada en l'electròlisi, i s'arriba a la conclusió que l'electró tenia una massa 2.000 vegades menor que la d'un àtom d'hidrogen. La qüestió que ara es planteja és la distribució dels electrons en l'interior de l'àtom i Thomson proposa «models» fàcilment visualitzables com l'analogia amb «imants flotants», segons els quals l'electricitat positiva i la negativa, unides per les línies de força elèctriques, arriben a diferents estats d'equilibri o «sistemes» que estan en moviment per tal de no caure els uns sobre els altres. Hi ha un límit al nombre de corpuscles que poden formar un sistema estable; si se sobrepassa, el sistema es divideix en altres de més simples (vegeu en la figura 1 les configuracions si el nombre d'imants flotants va de 2 a 19).

El 1913, Perrin proporciona proves aclaparadores de l'existència dels àtoms. Ens diu Urbain (1926, 92-93):

sont libres de se mouvoir dans l'espace dans toutes les directions, tandis que les pôles des aimants flottants sont forcés de se mouvoir dans un plan parallèle à la surface de l'eau.

Les configurations que présenteront les aimants flottants

Fig. 18.



avec l'accroissement du nombre des aimants de 2 à 19 sont illustrées par la figure 18, qui a été tracée par Mayer.

La configuration que présentent les aimants quand ils sont encore plus nombreux peut être déterminée par le Tableau suivant, qui est également dû à Mayer. Par ce Tableau, il est facile de voir que si le nombre des aimants

Figura 1. Model pels electrons en l'àtom (com si fossin imants flotants) segons J. J. Thomson (1922).

La thermodynamique triomphante a déclaré para la voix d'Ostwald, la faillite de l'atomisme... Un revirement s'est produit en France... moins parmi les chimistes purs... que parmi les physico.chimistes et les physiciens d'avant-garde comme Mme Curie, Perrin, Langevin, de Broglie... Même mouvement en Angleterre où brillent actuellement les noms de J. J. Thomson, Rutherford, Bragg, Soddy, Aston...

Bohr (1913) és l'heroi d'aquesta aventura. Decidit a incorporar els quantum de Planck a una interpretació dels espectres, abandona el laboratori de Thomson a Cambridge perquè aquest no considera interessant aquesta idea, i s'incorpora al laboratori de Rutherford, a Manchester, el mateix any que es postula l'existència del nucli atòmic encara sense neutrons (una extraordinària lliçó de paciència que va ser possible perquè es disposava d'una preuada mostra de pocs mil·ligrams de radi i que potser hauria resultat estèril si no fos pel comptador Geiger). Bohr es meravella de l'estabilitat de l'àtom químic, que els darrers descobriments físics no podien explicar fàcilment. Apassionat defensor dels «salts quàntics», proposa un model per a l'àtom d'hidrogen amb el qual inicia la reinterpretació de la taula periòdica. Ja en els anys vint, s'alia amb Heisenberg i discuteix amb Schrödinger i amb Einstein, que no podien acceptar la indeterminació en la naturalesa mateixa (Fernández Rañada, 2004).

El llibre de química general de Nernst (1922) incorpora ja la interpretació dels espectres amb el model de Bohr, però no inclou una interpretació de la valència a partir de l'estructura electrònica de vuit electrons en la capa externa de l'àtom ni reconstrueix la taula periòdica, com faria, finalment, Pauling. Altres llibres van incorporant les darreres aportacions de la teoria atòmica afegint un apèndix al llibre, com és el cas de les successives impressions dels llibres d'E. Vitoria.¹

En el llibre d'Urbain (1926), l'element queda definit pel seu nombre atòmic, a partir de la llei que va enunciar Moseley el 1913; l'àtom ja té nucli, a partir del treball de l'equip de Rutherford a Manchester. L'estabilitat de les molècules s'explica a partir de l'entorn de vuit electrons en els gasos nobles, seguint Lewis (1916, 1923) i Langmuir, i es dóna així un significat a la valència. «Electron rearrangement is the fundamental cause of chemical action», va dir aquest darrer en un reunió conjunta de les seccions de física i química de la BAAS a Edimburg, el 1921 (Nye, 1996: 180).

Bohr ja ha proposat un model quàntic de l'àtom, amb òrbites per als electrons, però la mecànica quàntica està en les beceroles. L'augment constant del coneixement químic feia necessari un plantejament didàctic estratègic, que permetés copsar les idees centrals a partir de les quals es podien deduir les altres. L'estructura de l'àtom dels elements, si s'aconseguia relacionar-la amb les propietats físiques i químiques dels seus compostos, podia fer aquesta funció, i culminar així l'obra de Mendeléiev; però també la termodinàmica podia fer-ho, perquè podia assignar «propietats termodinàmiques» a les substàncies, el comportament de les quals quedaria fixat per les lleis generals.

Més laboriosa va resultar la incorporació de la mecànica quàntica, que va passar per un període d'elaboració en llibres especialitzats, com *Valence and the Structure of Atoms and Molecules* (Lewis, 1923), abans de poder ser incorporada als «principis de química». Hi havia diversos factors que feien difícil aquest pas; el principal d'ells el constituïa la matemàtica que calia dominar, que contradeïa l'opció de la química pel que era «visualitzable».

Linus Pauling va intuir ja el 1919, i així ho va manifestar, que la nova teoria electrònica de l'enllaç químic podia ser el primer pas cap a la «ciència real i sistemàtica de la química estructural». Va fer estudis de postgraduació en els principals centres de recerca europeus: amb Sommerfeld (especialista en espectroscòpia atòmica, professor de set premis Nobel) a Munic, amb Bohr a Copenhagen, amb Schrödinger a Zuric. Quan va assumir responsabilitat docent al Caltech (California Institute of Technology) a Pasadena (1937), va optar de manera clara per una pedagogia de la química centrada en els àtoms i l'enllaç, clarament diferent de l'orientació de Noyes, el qual, segons la tradició antiatomística europea (era alumne d'Ostwald), fonamentava la química descriptiva i sistemàtica en els principis de termodinàmica. La seva aportació a la teoria de la valència —la hibridació— va ser un pas importantíssim per a connectar els orbitals amb els quatre enllaços tetraèdrics del carboni que eren

1. Vegeu l'article d'Ainoa Marzábal en aquestes mateixes actes.

la base de la química orgànica, i que permetien explicar, també, la ressonància entre les diferents estructuracions electròniques que eren possibles en el benzè, segons Kekulé i Dewar.

El 1947, va publicar el llibre *General Chemistry: An Introduction to Descriptive Chemistry and Modern Chemical Theory*, que culmina la incorporació del nou «àtom físic» a la química i triomfa la didàctica dels àtoms i molècules, representats amb imatges senzilles i fàcils de retenir. «La química es podia entendre, no només ser memoritzada» (en paraules del químic Perutz), citat per Nye (1996).

Conclusions

L'anàlisi dels textos ens mostra la influència de la química – física en la química general, que culmina amb l'elecció d'una retòrica de les imatges de les molècules i dels àtoms d'una gran eficàcia explicativa, però que ha tingut l'efecte de desplaçar l'atenció cap a l'àtom i la representació de les molècules, i oblidar el canvi químic i el seu control, les «regles de joc» que permeten intervenir-hi i pensar-hi..., que són els problemes que fan que els àtoms i les molècules siguin necessaris.

Els manuals escrits per a l'ensenyament tenen una importantíssima funció en la construcció de la «ciència normal», fins al punt que, sovint, els llibres de text, a les aules, es confonen amb la disciplina mateixa. En el moment actual, per a molts alumnes la química és una ciència dels àtoms i dels electrons. La reflexió que es proposa en aquesta comunicació és que l'àtom físic no hauria esdevingut tal com és sense la química, i que aquest procés no és reversible: si l'àtom és només una entitat física, no pot explicar el canvi químic.

La taula periòdica es va crear amb una intencionalitat didàctica en el segle XIX i, en el segle XX ha contribuït a la construcció de la teoria atòmica moderna, amb la qual cosa ha canviat radicalment: ha esdevingut el que es podria dir «un sistema de configuracions electròniques», però hauria de continuar essent, també, un «sistema de canvis químics» que, això sí, es poden explicar ara molt millor que en temps de Mendeléiev.

Bibliografia

- BENSAUDE-VINCENT, B. (1994), «Le langage chimique à la recherche de l'élément chimique», *Actualité Chimique*, (juliol-agost), 51-62.
- BOHR, N. (1913), *On the constitution of atoms and molecules*, Copenhagen, Munksgaard.
- CANNIZZARO, S. (1858), «Sunto di un corso di filosofia chimica», *Il Nuovo Cimento*, **7**, 321-366.
- FERNÁNDEZ-RAÑADA, A. (2004), *Ciencia, incertidumbre y conciencia. Heisenberg*, Madrid, Nivola.
- HANNAWAY, O. (1975), *The chemist and the word*, Baltimore, Londres, Hopkins University Press.
- IZQUIERDO, M. (2000), «Three rhetorical constructions of the chemistry of water». A: LUNDGREN, A.; BENSAUDE-VINCENT, B. (ed.), *Communicating chemistry. Textbooks and their audiences, 1789-1939*, Canton, Science History Publications, 255-272.
- (2005), «Estructuras retóricas en los libros de ciencias», *Tarbiya*, **136**, 11-34.
- LEWIS, G. N. (1916), «The atom and the molecule», *Journal of the American Chemical Society*, **38**, 762-785.
- (1923), *Valence and the Structure of Atoms and Molecules*, Nova York, The Chemical Catalog Company.
- LIBAVIUS, A. (1597), *Alchemia*, Francofurti, Excudebat J. Saurius.
- MENDELÉIEV, D. I. (1897), *Principes de chimie*, París, B. Tignol.
- MEYER, L. (1864), *Die modernen Theorien der Chemie und ihre Bedeutung für die chemische Statik*, Breslau, Wroclaw.
- NERNST, W. (1922), *Traité de chimie générale*, 2a ed., París, Hermann.
- NYE, M. J. (1996), *Before big science*, Nova York, Twaine.
- ROCKE, A. (1993), *The quiet revolution*, Berkeley, University of California Press.
- THOMSON, J. J. (1922), *Électricité et matière*, París, Gauthier-Villars. [Recull de conferències a la Universitat de Yale, 1903]
- URBAIN, G. (1926), *Les notions fondamentales d'élément chimique et d'atome*, París, Gauthier-Villars.

