

LA TAULA PERIÒDICA: MÉS ENLLÀ D'UNA ORDENACIÓ DELS ELEMENTS

Josep Lluís Doménech. Professor de Física i Química. IES Antoni Llidó. Xàbia

Si preguntàrem a la població per elements identificadors de les classes de química segurament una majoria assenyalaria a més de buretes, matrassos o flascons, la taula periòdica, i és que és una imatge que presideix laboratoris i aules de química. La taula periòdica és la icona de la química, i en tots els cursos se l'estudia. Alguns, però en tindran un mal record i això perquè en l'ensenyament secundari sovint ha estat objecte de memorització. La paradoxa és que aquesta memorització no ha estat mai un objectiu de l'ensenyament universitari, és més, recorde de l'època d'estudiant que als exàmens ens deixaven utilitzar la taula periòdica (una taula que únicament contenia els símbols dels elements, i els nombres i els pesos atòmics). La memorització de la taula és una tasca amb poc sentit, i és que el punt de partida que portà els químics a la confecció de la taula era sistematitzar el coneixement químic disponible, de manera que si no hi ha coneixement, i els alumnes de secundària en tenen poc de coneixement químic, no hi ha res a sistematitzar.

L'ensenyament dóna importància a la taula periòdica, però si preguntàrem a gent formada en química per les grans idees d'aquesta àrea, no crec que foren massa els que esmentaren la taula, i menys encara la llei periòdica que hi ha al darrere i que és una de les grans desconegudes de la química. El que podem assegurar és que els estudiants de batxillerat (i segurament també els universitaris), no li veuen cap utilitat més enllà d'usar-la per a esbrinar el nombre i el pes atòmic dels elements.

Tanmateix, la construcció de la taula periòdica, i la descoberta de la llei periòdica, constitueix un dels èxits intel·lectuals de la humanitat. Com a reconeixement, el 20 de desembre de 2017, l'Assemblea General de Nacions Unides proclamà 2019 com l'Any Internacional de la Taula Periòdica dels elements químics. Amb aquesta commemoració, que coincideix amb el 150 aniversari de la proposta per Dmitri Mendeleiev de la taula periòdica, es vol animar a la població a promoure i celebrar la rellevància, aplicacions i contribució a la societat de la Taula Periòdica.

En aquest treball mostrarem la part final de l'establiment de la taula, la història que començà en Mendeleiev, i en el pròxim número de DAUALDEU presentarem els antecedents. La raó d'aquesta inversió cronològica és per a, tenint present el resultat final, poder valorar justament les contribucions prèvies.

1. La taula periòdica de Mendeleiev

El desenvolupament de la química a partir d'Antoine Lavoisier (1743-1794) fou tan espectacular que en uns pocs anys a més de descobrir-se un grapat d'elements (vint-i-un en el primer terç del segle XIX), es determinaren les seues propietats i comportaments. El ritme de descobriment portava els químics a preguntar-se pel nombre d'elements existents i sobre l'existència de relacions entre ells.

Quan Mendeleiev començà de professor, la química que s'estudiava a les universitats es caracteritzava per la manca de sistematització, es limitava a una descripció de fets

aïllats. Mendeleiev s'adonà d'aquesta debilitat de l'ensenyament químic, i quan el 1867 s'encarregà d'impartir un curs sobre química inorgànica es proposà elaborar un manual on el coneixement fóra presentat d'una manera racional i ordenada, és a dir, amb base teòrica:

“La química actual es proposa, com a missió fonamental, investigar la dependència de la composició, les reaccions i les propietats dels cossos simples i dels compostos, de les propietats bàsiques dels elements continguts en aquests, a fi de fer possible, partint del caràcter conegut d'un element, la deducció de la composició i les propietats desconegudes dels compostos en què participa”.

Al parer de l'historiador de la ciència William Brock, el títol del manual, *Principis de química*, era una declaració d'intencions. Amb el terme *Principis* Mendeleiev volia ressaltar no sols que allò que perseguia era explicar les propietats de substàncies simples i compostos a partir dels elements constituents (els principis últims de la matèria, diferents els uns dels altres, sense res en comú entre ells), sinó també mostrar que la química es basava en principis o lleis empíriques, igual que passa en la física. En la tasca per classificar els elements¹, Mendeleiev descobrí la llei periòdica².

En l'establiment d'aquesta llei estigué influït per la relació entre les propietats físiques i químiques dels membres d'una sèrie homòloga de compostos orgànics i els seus pesos moleculars, relació que Mendeleiev descobrí en els anys en què fou professor de Química orgànica en l'Institut Tecnològic de San Petersburg. Quan en 1867 s'encarà a l'elaboració de *Principis de química* es plantejà si no hi hauria una relació entre les propietats dels elements i els pesos atòmics. Mendeleiev estava convençut d'aquesta relació.

A mitjan segle XIX els químics sabien de l'existència d'elements anàlegs, elements amb comportaments físics i químics semblants (com ara el caràcter metàl·lic, les fórmules dels compostos, el comportament àcid o bàsic dels compostos en què participaven, etc.): alcalins (Li, Na, K, Rb, Cs), alcalino-terris (Mg, Ca, Sr, Ba), calcògens (O, S, Se, Te), el grup del nitrogen (N, P, As, Sb), halògens (F, Cl, Br, I), etc., el que es desconeixia era l'existència de relacions entre elements de grups diferents.

¹ Mendeleiev distingia explícitament entre element (“el component material dels cossos simples que hi determina el comportament físic i químic”) i substància simple (qualsevol cosa material “dotada de propietats físiques i capacitat de reacció química”). Un exemple aclareix la diferència: el grafit i el diamant són substàncies simples formades per un mateix element, carboni. A diferència de la substància simple, l'element no presenta propietats macroscòpiques, és una abstracció.

Les substàncies simples desapareixen quan reaccionen per a formar un compost, però els elements hi continuen. Per exemple, el sodi (un metall que reacciona explosivament amb l'aigua) reacciona amb el clor (un gas irritant que fou utilitzat com a arma química en la Gran Guerra) per a formar clorur de sodi (el component principal de la sal de cuina), una substància que ingerim a diari sense que notem els efectes nocius del metall sodi ni del gas clor. En la reacció, les substàncies sodi i clor desapareixen, però no així els elements sodi i clor.

Mendeleiev associà el concepte d'àtom a element i el de molècula a substància simple, i la taula que elaborà fou una taula d'elements, no de substàncies simples.

² Tot i que anteriorment a 1867 diferents científics presentaren taules periòdiques semblants a la de Mendeleiev, aquest mai no es referí als treballs d'aquesta gent. Mendeleiev sols reconegué la influència d'Ernst Lenné i Jean Baptiste Dumas.

El 1869, Mendeleiev utilitzà el pes atòmic (en aquell moment, l'única propietat exactament mesurable dels elements) per a construir una taula on els elements anàlegs estan agrupats en files. La taula de 1871 és millor no sols pels valors més correctes dels pesos atòmics sinó també per l'ordenació dels elements. En aquesta taula els elements anàlegs apareixen en columnes, tot i que en cada columna, els elements situats a la part esquerra, o a la dreta, se semblen més entre ells.

| | | | | | |
|--------|----------|-----------|--------------|------------|------------|
| | | | Ti = 50 | Zr = 90 | ? = 180 |
| | | | V = 51 | Nb = 94 | Ta = 182 |
| | | | Cr = 52 | Mo = 96 | W = 186 |
| | | | Mn = 55 | Rh = 104,4 | Pt = 197,4 |
| | | | Fe = 56 | Ru = 104,4 | Ir = 198 |
| | | | Ni = Co = 59 | Pd = 106,6 | Os = 199 |
| H = 1 | | | Cu = 63,4 | Ag = 108 | Hg = 200 |
| | Be = 9,4 | Mg = 24 | Zn = 65,4 | Cd = 112 | |
| | B = 11 | Al = 27,4 | ? = 68 | Ur = 116 | Au = 197? |
| | C = 12 | Si = 28 | ? = 70 | Sn = 118 | |
| | N = 14 | P = 31 | As = 75 | Sb = 122 | Bi = 210 |
| | O = 16 | S = 32 | Se = 79,4 | Te = 128? | |
| | F = 19 | Cl = 35,5 | Br = 80 | J = 127 | |
| Li = 7 | Na = 23 | K = 39 | Rb = 85,4 | Cs = 133 | Tl = 204 |
| | | | Sr = 87,6 | Ba = 137 | Pb = 207 |
| | | | Ce = 92 | | |
| | | | La = 94 | | |
| | | | Di = 95 | | |
| | | | Th = 118? | | |

Taula de Mendeleiev de 1869

| | Gruppe I - R ² O | Gruppe II - RO | Gruppe III - R ² O ³ | Gruppe IV RH ⁴ RO ² | Gruppe V RH ³ R ² O ⁵ | Gruppe VI RH ² RO ³ | Gruppe VII RH R ² O ⁷ | Gruppe VIII - RO ⁴ |
|----|-----------------------------------|----------------------|--|---|--|---|---|-------------------------------------|
| 1 | H=1 | | | | | | | |
| 2 | Li=7 | Be=9,4 | B=11 | C=12 | N=14 | O=16 | F=19 | |
| 3 | Na=23 | Mg=24 | Al=27,3 | Si=28 | P=31 | S=32 | Cl=35,5 | |
| 4 | K=39 | Ca=40 | --44 | Tl=48 | V=51 | Cr=52 | Mn=55 | Fe=56, Co=59 Ni=59, Cu=63 |
| 5 | (Cu=63) | Zn=65 | --68 | --72 | As=75 | Se=78 | Br=80 | |
| 6 | Rb=85 | Sr=87 | ?Yt=88 | Zr=90 | Nb=94 | Mo=96 | --100 | Ru=104, Rb=104 Pd=108, Ag=108 |
| 7 | (Ag=108) | Cd=112 | In=113 | Sn=118 | Sb=122 | Te=125 | J=127 | |
| 8 | Cs=133 | Ba=137 | ?Di=138 | ?Ce=140 | - | - | - | ---- |
| 9 | (-) | - | - | - | - | - | - | |
| 10 | - | - | ?Er=178 | ?La=180 | Ta=182 | W=184 | - | Os=195, Ir=197 Pt=198, Au=199 |
| 11 | (Au=199) | Hg=200 | Tl=204 | Pb=207 | Bi=298 | - | - | |
| 12 | - | - | - | Th=231 | - | U=240 | - | ---- |

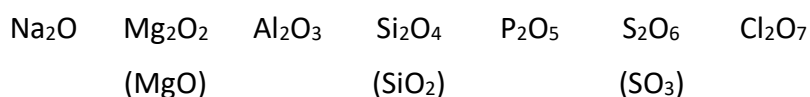
Taula de Mendeleiev de 1871

Per tal de justificar l'agrupament, Mendeleiev comença per centrar-se en els catorze elements més lleugers, llevat de l'hidrogen, ordenats segons el pes atòmic.

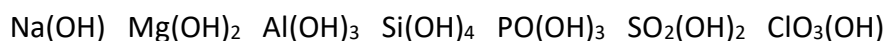
| | | | | | | |
|---------|----------|-----------|---------|--------|--------|-----------|
| Li = 7 | Be = 9,4 | B = 11 | C = 12 | N = 14 | O = 16 | F = 19 |
| Na = 23 | Mg = 24 | Al = 27,3 | Si = 28 | P = 31 | S = 32 | Cl = 35,5 |

“Com es pot veure, el caràcter dels elements canvia de manera regular i gradual quan varia la magnitud dels pesos atòmics i, certament de manera periòdica: és a dir, en les dues línies de la mateixa manera; per tant, els membres corresponents de cadascuna són anàlegs: Li i Na, Be i Mg, C i Si, O i S, etc. Així doncs, els corresponents membres de les dues línies produeixen les mateixes formes de combinacions; posseeixen, com s’acostuma a dir, la mateixa valència. La cosa més important és el fet que les transicions d’un element al següent ofereixen les mateixes regularitats en les formes compostes, com es pot veure en la comparació de les combinacions dels elements esmentats amb l’hidrogen i amb l’oxigen.”

A diferència d’ordenacions fetes per científics anteriors, que només paraven atenció als grups d’elements anàlegs, Mendeleiev es fixà també en la variació dels compostos formats en transitar al llarg d’una fila. En considerar els òxids més alts formats pels elements de la fila del sodi, s’adonà de l’existència d’una sèrie tancada, una sèrie on no caben més elements:

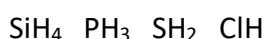


Quan considerà la combinació dels òxids amb l’aigua, descobrí en les fórmules dels *hidrats* una altra regularitat: el nombre de grups hidroxil passa d’un a quatre, per a disminuir després a un.



Assenyalava Mendeleiev que, en aquesta sèrie, notem una gradació progressiva en les propietats a mesura que avancem: l’hidrat del Na és més bàsic que el del Mg, i aquest més que el del Al, que ja presenta propietats àcides; el caràcter àcid augmenta des de l’hidrat del Si al del Cl.

Una variació en les fórmules mostren també les combinacions dels últims quatre elements amb l’hidrogen:



Ací també descobrí una variació en les propietats: el caràcter àcid de les dissolucions aquoses augmenta gradualment conforme avancem. *Així el ClH és un àcid fort, de gran estabilitat; el SH₂ és un àcid feble, inestable a la calor; al PH₃ el caràcter àcid ha desaparegut completament i la inestabilitat ha crescut, fet que es manifesta encara més clarament al SiH₄.* La capacitat per a reaccionar amb metalls d’aquests compostos també varia gradualment.

Mendeleiev assenyalà variacions en altres propietats. El caràcter metàl·lic disminueix al llarg de la fila: mentre Na, Mg i Al presenten propietats metàl·liques, el Cl presenta propietats típicament no metàl·liques; Si, P i S presenten un comportament ambivalent. El volum atòmic (mesurat com el quocient entre pes atòmic i densitat) sol disminuir d’esquerra a dreta. Les combinacions entre metalls originen materials amb propietats metàl·liques (aliatges), mentre que la majoria dels compostos dels metalls amb halògens, fòsfor i sofre solen ser cristal·lins. La volatilitat decreix en passar del Na al Si, i augmenta des del P al Cl.

D'una manera semblant, Mendeleiev agrupava la resta d'elements. Per a Mendeleiev, el fet que puguem agrupar els elements en files i columnes evidencia l'existència d'una llei periòdica: en ordenar els elements segons els pesos atòmics creixents, les propietats fonamentalment químiques dels elements es repeteixen a intervals regulars encara que variables. És a dir, les propietats (físiques) dels elements d'una fila canvien en augmentar el pes atòmic, però (en canvi) es repeteixen (les químiques) en la següent fila amb la mateixa regularitat que en la fila precedent. La taula és així l'expressió d'una llei, la periòdica.

Amb açò, Mendeleiev anà més enllà de l'ordenació dels elements inicialment desitjada: *“La sistematització dels elements posseeix no només una significació purament pedagògica, com a mitjà per aprendre fàcilment fets variats, ordenats sistemàticament i relacionats entre sí, sinó també una significació científica, amb la qual cosa descobreix noves analogies i inicia nous camins per a la recerca dels elements.”*

Paga la pena assenyalar algunes de les observacions fetes per Mendeleiev a la taula de 1871. Per exemple, la posició aïllada i independent de l'hidrogen, encara que en el grup dels alcalins, ve determinada per la fórmula de l'òxid (H_2O) i per la combinació amb els halògens (HX). Cu, Ag i Au estan en dos grups i és que per les combinacions amb la valència menor haurien d'estar en el primer grup, però per la semblança de propietats haurien d'estar en el grup VIII.

En algun cas, Mendeleiev invertí l'ordenació segons els pesos atòmics per tal de preservar l'analogia química (per exemple, Co i Ni; Te i I). Mendeleiev justificà la inversió a la incertesa en els valors dels pesos atòmics. Així, pel que fa a la parella iode-tel·luri, segons els pesos atòmics acceptats l'ordre havia de ser I (126,8) i Te (127,6), però era tan evident que el iode pertanyia als halògens que *“en el cas del Te, en concordança amb la llei acceptada, s'indica 125? i no 128, com diuen Berzelius i altres”*. És a dir, Mendeleiev no sols no acceptava el valor del pes atòmic mesurat per al Te (127,6), sinó que utilitzava la llei periòdica per a suggerir un valor més adequat (125): *“... d'acord amb la llei periòdica, el pes atòmic del Te ha de ser més gran que el del Sb=122 i menor que el del I=127; en altres paraules, ha de ser, aproximadament, Te=125, perquè en totes les relacions ocupa la posició mitjana d'analogia química, entre Sb i I. Tenint en compte que Ag-Cu=45 [diferència entre pesos atòmics de Ag i Cu], Cd-Zn=47, Sb-As=47, I-Br=47, Cs-Rb=48 i Ba-Sr=50, pot acceptar-se que també sigui Te-Se=47 ... i atés que el Se, amb pes atòmic 78, està més perfectament investigat ... el pes atòmic del Te haurà de ser, aproximadament, 78+47=125”*.

Una última observació està relacionada amb els espais buits que hi ha en la taula presentada i que corresponen a elements per descobrir. A les taules següents presentem les propietats predites per Mendeleiev, a partir de la llei periòdica, per als dos elements que han de situar-se per sota del bor i de l'alumini, i que anomenà *eka-bor* i *eka-alumini*, respectivament. També presentem les propietats dels elements escandi i gal·li descoberts posteriorment. Podem advertir la proximitat de les prediccions.

| | Eka-bor (1871) | Escandi (1879) |
|------------|--------------------------|---------------------------|
| Pes atòmic | 44 | 43,79 |
| Òxid | Eb_2O_3 (densitat=3,5) | Sc_2O_3 (densitat=3,86) |

| | | |
|--------|------------------------------|------------------------------|
| Sulfat | $\text{Eb}_2(\text{SO}_4)_3$ | $\text{Sc}_2(\text{SO}_4)_3$ |
|--------|------------------------------|------------------------------|

| | Eka-alumini (1871) | Gal·li (1875) |
|--------------|---------------------------|----------------------|
| Pes atòmic | 68 | 69,9 |
| Densitat | 6,0 | 5,96 |
| Volum atòmic | 11,5 | 11,7 |

Encara que foren bastants els elements predits erròniament per Mendeleiev, cosa que només es constatà amb el pas del temps, el descobriment en la dècada de 1870 de l'escandi i del gal·li, jugà a favor de l'acceptació de la taula i de la llei periòdica.

Resumidament, la taula de Mendeleiev en disposar tots els elements en una relació fonamental reflectia un ordre en la natura. Com assenyala Oliver Sacks en el *Tio tungsteno*:

“Me pareció un logro increíble haber conseguido [con la tabla periódica] imponer sobre todo el vasto y aparentemente caótico universo un orden del que nada escapaba... Haber intuido una organización global, un principio que abarcará, uniera y relacionara todos los elementos, era algo milagroso, la obra de un genio. Y eso, por primera vez, me hizo ver el poder transcendente de la mente humana, y el hecho de que podía estar preparada para descubrir o descifrar los más profundos secretos de la naturaleza, para leer la mente de Dios.”

Però, la validesa d'una llei no ve donada sols per la capacitat de donar compte dels fets coneguts, ha d'explicar també els nous descobriments, i ha de permetre fer prediccions. Tot seguit, presentem algunes de les dificultats que posaren a prova la llei periòdica.

2. Problemes a què s'encarà la taula

2.1 Descobriments dels gasos inerts

El 1894, William Ramsay i John W. Strutt, més conegut com a lord Rayleigh, anunciaren el descobriment d'un nou element. Era un gas present a l'aire i que anomenaren argó, que en grec significa <inactiu>, pels fracassos en intentar combinar-lo amb les substàncies més reactives. La comunitat rebé amb escepticisme la descoberta i això per ser un element sense parents en la taula periòdica, per no conèixer-li elements anàlegs. Si bé inicialment alguns apuntaren que el gas podia consistir en una molècula triatòmica de nitrogen (per quan poc reactiu era el nitrogen), l'anàlisi espectral³ mostrava que es tractava d'un element nou.

Ramsay pensà en la taula i usà la llei periòdica per a estimar la densitat del gas (relativa a l'hidrogen). En una carta a Rayleigh de maig de 1894 Ramsay escrivia:

³ Els gasos i vapors emeten llum quan els excitem. La descomposició de la llum mostra un conjunt de ratlles característiques, l'espectre electromagnètic. Cada element químic emet un espectre característic. Les línies que apareixien en l'espectre del gas aïllat no les presentava cap element conegut així que no hi havia dubtes sobre que l'argó era un element nou.

“¿No se li ha ocorregut pensar que hi ha espai per a elements gasosos al final de la primera fila de la taula periòdica? Tindriem, per tant, la seqüència Li, Be, B, C, N, O, F, X, X, X, etcètera. Aquests elements tindrien una densitat de 20, o d'un valor molt pròxim a 20, ...”

La densitat mesurada a l'argó (en relació a l'hidrogen), 19,7, era pròxima a 20. Mendeleiev no havia previst l'existència d'un element com aquest, però si l'argó era diatòmic, com ho eren tots els gasos elementals coneguts (en les condicions habituals), el pes atòmic seria 19,7 (en relació a l'hidrogen), de manera que en la taula periòdica s'ubicaria entre el F i el Na. Això suposava incorporar una columna al costat de la dels halògens. Tanmateix, la diferència entre les calors específiques a pressió i a volum constant de l'argó indicava que no es tractava d'un gas diatòmic, sinó monoatòmic. Si això era així, el pes atòmic del Ar era el doble, 39,4, i no hi havia forat en la taula on col·locar-lo.

El problema començà a solucionar-se a partir de 1895, quan Ramsay mostrà que l'espectre d'un gas emanat per un mineral d'urani coincidia amb el d'un element, l'heli, que havia estat identificat en el Sol en 1868. Les proves químiques a que se sotmeté l'heli mostraren que era inert. El fet que el pes atòmic determinat per a l'heli, 4, el situava entre l'hidrogen i el liti, mostrava que no era descabellat pensar que heli i argó foren membres d'una família que estaria a continuació de la dels halògens. Amb les propietats predites a partir de la llei periòdica, els científics es dedicaren a la recerca d'elements que completaren la família. El descobriment del neó, criptó i xenó, confirmà l'existència d'un grup de gasos inerts, amb valència zero, i situats en la taula periòdica entre els halògens i els alcalins.

La taula periòdica havia sigut capaç d'incorporar els nous elements. La posició del Ar per davant del K, violant l'ordre segons els pesos atòmics, igual que passava amb la parella Te-I, quedà com un problema a resoldre.

2.2. Descobriments de la radioactivitat

El 1898, el descobriment dels raigs <urànics>, radiació emesa per compostos d'urani, per Henry Becquerel, plantejà nous problemes a la taula periòdica. Becquerel s'adonà que la radiació emesa per l'urani era independent del compost d'urani que s'estudia. A principis de 1900, Ernst Rutherford i Frederick Soddy s'adonaren que les substàncies radioactives emeten, a més de radiació α i β , partícules radioactives (emanacions, foren anomenades). Prompte s'esbrinà que aquestes emanacions eren substàncies originades a partir de la substància progenitora.

L'anàlisi de les emanacions portà al descobriment de nous elements. El fet que els pesos atòmics d'aquests elements foren tots inferiors al del U plantejà el problema d'on situar-los en la taula i és que el nombre de caselles buides disponibles era insuficient com per a acomodar-los a tots.

La solució al problema vingué de la mà de Soddy. L'existència de grups de substàncies amb propietats químiques idèntiques, però pesos atòmics diferents (encara que pròxims) portà a Soddy, en 1911, a anomenar isòtops als elements de pesos atòmics distints encara que amb un comportament químic idèntic. Amb açò un element és una

mescla d'isòtops⁴, i se l'ha de col·locar en una única casella de la taula. Amb la reducció que això suposà respecte del nombre de nous elements, la taula podia acomodar-los a tots.

Tot i que Mendeleiev, per a qui els elements eren indestructibles, no acceptà la descoberta de Rutherford i Soddy, el concepte d'isòtop permeté que la taula, una taula que ordenava elements, i no substàncies simples, continuara sent vàlida. Tanmateix, si un element està constituït per més d'un tipus d'àtoms, no podem associar l'element a l'àtom, i per tant, el pes atòmic deixa de ser una magnitud que caracteritza l'element, com havia fet Mendeleiev.

2.3. Descobrimet de les terres rares

La col·locació de les terres rares⁵ suposà un mal de cap per a Mendeleiev (i també per a posteriors estudiosos de la taula periòdica). La confusió existent sobre aquests elements era gran pel fet de presentar-se a la natura en forma de barreges d'òxids, i ser difícils de separar a causa de la homogeneïtat de propietats que presentaven. Tan és així que algunes mesclades foren identificades com a elementals. Pel que fa a la taula, el problema era que en presentar pesos atòmics pròxims, semblaven acumular-se en uns pocs punts de la taula. De nou no hi havia caselles buides on situar aquests elements.

La sort de Mendeleiev fou que a principis de la dècada de 1870, quan presentà les primeres taules, sols se'n coneixien uns pocs, de manera que aconseguí col·locar-los. El fet que en taules posteriors els canviara de posició o modificara els pesos atòmics són senyals de la dificultat de la tasca. Conforme es descobriren noves terres, les dificultats es feren de tal magnitud que alguns químics optaren per ignorar-les en la tasca d'elaborar la taula.

El 1902, el químic txec Bohuslav Brauner proposà una taula en què situava les terres rares entre el La i el Ta, tot i violant la llei periòdica i deixant un grapat de caselles buides.

| | 0 R | 1 R ₂ O | 2 RO | 3 R ₂ O ₃ | 4 RO ₂ | 5 R ₂ O ₅ | 6 RO ₃ | 7 R ₂ O ₇ | 8 RO ₄ |
|---|------------------|-----------------------|------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------------------|---|
| 1 | | H 1 | | | | | | | |
| 2 | He 4 | Li 7 | Be 9 | B 11 | C 12 | N 14 | O 16 | F 19 | |
| 3 | Ne 20 | Na 23 | Mg 24 | Al 27 | Si 28 | P 31 | S 32 | Cl 35,5 | |
| 4 | Ar 40 | K 39 | Ca 40 | Sc 44 | Ti 48 | V 51 | Cr 52 | Mn 55 | Fe 56 Co 59 Ni 59 |
| 5 | | Cu 63 | Zn 65 | Ga 70 | Ge 72 | As 75 | Se 78 | Br 80 | |
| 6 | Kr 82 | Rb 85 | Sr 87 | Y 89 | Zr 90 | Nb 94 | Mo 96 | 100 | Ru 102 Rh 103 Pd 106 |
| 7 | | Ag 108 | Cd 112 | In 114 | Sn 119 | Sb 120 | Te 128 | I 127 | |
| 8 | Xe 128 | Cs 133 | Ba 137 | La 139 | Ce 140 | Pr 141 | Nd 144 | 145 | |

⁴ El valor que s'utilitzava com a pes atòmic d'un element era realment la mitjana ponderada dels pesos atòmics dels diferents isòtops.

⁵ El nom pot resultar enganyós, terra fa referència a l'aspecte terrós que presenten, i rar significa que és difícil trobar-los en estat pur (no hi ha cap connotació d'abundància).

| | | | | | | | | | |
|----|-----|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----|--------------------------------|
| | | | | | 147 | Sm 148 | Eu 63 | 152 | |
| | | | | | 155 | Gd 156 | 159 | 160 | |
| | | | | | Tb 163 | Ho 165 | Er 166 | 167 | |
| | | | | | Tm 171 | Yb 173 | 176 | | |
| | | | | | 178 | Ta 182 | W 184 | 190 | Os Ir Pt 191 193 195 |
| 9 | | Au 197 | Hg 200 | Tl 204 | Pb 207 | Bi 209 | 212 | 214 | |
| 10 | 218 | 220 | Ra 225 | 230 | Th 233 | 235 | U 239 | | |

Taula periòdica proposada per Brauner en 1902 (els gasos inerts formen el grup 0)

3. El nombre atòmic: allò que caracteritza l'element químic

A principis de la dècada de 1910, els estudis sobre dispersió de radiació α per làmines metàl·liques portà a Rutherford a afirmar que l'àtom està constituït per un nucli extraordinàriament petit on està concentrada quasi tota la massa de l'àtom. El nucli presenta càrrega elèctrica positiva, i al seu voltant estan els electrons (la càrrega elèctrica dels àtoms és considerada nul·la)

En una sèrie d'experiments amb RX en què, per qüestions d'espai, no podem entrar, però que il·lustren la importància de la creativitat en ciència, Henry Moseley mostrà en 1913 que els elements es poden ordenar segons el nombre d'unitats elèctriques del nucli, el nombre de protons, el què se'n diu nombre atòmic. Com que els isòtops d'un element presenten tots el mateix nombre atòmic, resulta que l'element ve caracteritzat pel nombre atòmic⁶.

En ordenar els elements pel nombre atòmic, alguns dels problemes que assetjaven la taula periòdica desaparegueren. Així mb el nombre atòmic, Ar, K, Te i I se situen en les columnes on estan els seus anàlegs. També, la ubicació de les terres rares que havia suposat un problema quedà ben establerta.

A més, l'ordenació segons el nombre atòmic quedava es resolva el problema dels elements que quedaven per descobrir. El fet que la separació entre dos elements consecutius de la taula periòdica siga d'exactament una unitat en el nombre atòmic permet precisar els elements per descobrir, almenys els de l'interior de la taula.

El canvi des de caracteritzar l'element pel pes atòmic com feia Mendeleiev a caracteritzar-lo, a partir de Moseley, pel nombre atòmic, obliga a revisar l'enunciat de la llei periòdica. Ara direm que, segons la llei periòdica, les propietats dels elements d'una fila de la taula periòdica canvien en augmentar el nombre atòmic, però es repeteixen en una altra fila amb la mateixa regularitat que en la fila precedent.

4. Evolució de la taula periòdica

⁶ Per qüestions d'espai, no podem entrar en aquest aspecte, però la distribució dels electrons en els àtoms permeten explicar les semblances de comportament entre els elements anàlegs.

A finals de la dècada de 1930 la taula majoritàriament acceptada era la presentada a continuació, on les terres rares estan fora del cos principal.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| H 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | He 2 |
| Li 3 | Be 4 | | | | | | | | | | | B 5 | C 6 | N 7 | O 8 | F 9 | Ne 10 |
| Na 11 | Mg 12 | | | | | | | | | | | Al 13 | Si 14 | P 15 | S 16 | Cl 17 | Ar 18 |
| K 19 | Ca 20 | Sc 21 | Ti 22 | V 23 | Cr 24 | Mn 25 | Fe 26 | Co 27 | Ni 28 | Cu 29 | Zn 30 | Ga 31 | Ge 32 | As 33 | Se 34 | Br 35 | Kr 36 |
| Rb 37 | Sr 38 | Y 39 | Zr 40 | Nb 41 | Mo 42 | Tc 43 | Ru 44 | Rh 45 | Pd 46 | Ag 47 | Cd 48 | In 49 | Sn 50 | Sb 51 | Te 52 | I 53 | Xe 54 |
| Cs 55 | Ba 56 | La* 57 | Hf 72 | Ta 73 | W 74 | Re 75 | Os 76 | Ir 77 | Pt 78 | Au 79 | Hg 80 | Tl 81 | Pb 82 | Bi 83 | Po 84 | At 85 | Rn 86 |
| Fr 87 | Ra 88 | Ac 89 | Th 90 | Pa 91 | U 92 | Np 93 | Pu 94 | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Terres rars | Ce 58 | Pr 59 | Nd 60 | Pm 61 | Sm 62 | Eu 63 | Gd 64 | Tb 65 | Dy 66 | Ho 67 | Er 68 | Tm 69 | Yb 70 | Lu 71 |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|

El descobriment de nous elements portaria a una correcció d'aquesta ordenació. Així, dintre del projecte Manhattan, un projecte d'investigació destinat al desenvolupament de la primera bomba atòmica, el químic nord-americà Glen Seaborg, després de descobrir el plutoni (nombre atòmic, Z=94), es dedicà a intentar obtenir els elements de nombres atòmics Z=95 i Z=96. La tècnica utilitzada per Seaborg consistia en bombardejar àtoms de U amb partícules lleugeres amb l'esperança que l'àtom de U n'atrapara alguna. El fracàs en trobar elements amb propietats semblants al Ir o al Pt com es dedueix de la ubicació en la taula periòdica, portà a Seaborg a suposar que els elements posteriors al Ac no estaven en els llocs assignats en la taula, sinó que, de la mateixa manera que passava amb les terres rares, els elements a partir del Ac formarien part d'una sèrie separada. Amb aquesta hipòtesi com a guia, Seaborg aconseguí sintetitzar i identificar el Am i el Cm.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| H 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | He 2 |
| Li 3 | Be 4 | | | | | | | | | | | B 5 | C 6 | N 7 | O 8 | F 9 | Ne 10 |
| Na 11 | Mg 12 | | | | | | | | | | | Al 13 | Si 14 | P 15 | S 16 | Cl 17 | Ar 18 |
| K 19 | Ca 20 | Sc 21 | Ti 22 | V 23 | Cr 24 | Mn 25 | Fe 26 | Co 27 | Ni 28 | Cu 29 | Zn 30 | Ga 31 | Ge 32 | As 33 | Se 34 | Br 35 | Kr 36 |
| Rb 37 | Sr 38 | Y 39 | Zr 40 | Nb 41 | Mo 42 | Tc 43 | Ru 44 | Rh 45 | Pd 46 | Ag 47 | Cd 48 | In 49 | Sn 50 | Sb 51 | Te 52 | I 53 | Xe 54 |
| Cs 55 | Ba 56 | La¹ 57 | Hf 72 | Ta 73 | W 74 | Re 75 | Os 76 | Ir 77 | Pt 78 | Au 79 | Hg 80 | Tl 81 | Pb 82 | Bi 83 | Po 84 | At 85 | Rn 86 |
| Fr 87 | Ra 88 | Ac² 89 | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ¹ Lantà- nids | Ce 58 | Pr 59 | Nd 60 | Pm 61 | Sm 62 | Eu 63 | Gd 64 | Tb 65 | Dy 66 | Ho 67 | Er 68 | Tm 69 | Yb 70 | Lu 71 |
| ² Actí- nids | Th 90 | Pa 91 | U 92 | Np 93 | Pu 94 | Am 95 | Cm 96 | Bk 97 | Cf 98 | | | | | |

Encara que s'han proposat altres taules, la ideada per Seaborg és la representació més universalment acceptada. La taula següent ordena els 118 elements coneguts actualment.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| H 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | He 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Li 3 | Be 4 | | | | | | | | | | | B 5 | C 6 | N 7 | O 8 | F 9 | Ne 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Na 11 | Mg 12 | | | | | | | | | | | Al 13 | Si 14 | P 15 | S 16 | Cl 17 | Ar 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K 19 | Ca 20 | Sc 21 | Ti 22 | V 23 | Cr 24 | Mn 25 | Fe 26 | Co 27 | Ni 28 | Cu 29 | Zn 30 | Ga 31 | Ge 32 | As 33 | Se 34 | Br 35 | Kr 36 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rb 37 | Sr 38 | Y 39 | Zr 40 | Nb 41 | Mo 42 | Tc 43 | Ru 44 | Rh 45 | Pd 46 | Ag 47 | Cd 48 | In 49 | Sn 50 | Sb 51 | Te 52 | I 53 | Xe 54 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cs 55 | Ba 56 | Lant. 57- 71 | Hf 72 | Ta 73 | W 74 | Re 75 | Os 76 | Ir 77 | Pt 78 | Au 79 | Hg 80 | Tl 81 | Pb 82 | Bi 83 | Po 84 | At 85 | Rn 86 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fr 87 | Ra 88 | Actin 89- 103 | Rf 104 | Db 105 | Sg 106 | Bh 107 | Hs 108 | Mt 109 | Ds 110 | Rg 111 | Cn 112 | Nh 113 | Fl 114 | Mc 115 | Lv 116 | Ts 117 | Og 118 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <tbody> <tr> <td>La 57</td> <td>Ce 58</td> <td>Pr 59</td> <td>Nd 60</td> <td>Pm 61</td> <td>Sm 62</td> <td>Eu 63</td> <td>Gd 64</td> <td>Tb 65</td> <td>Dy 66</td> <td>Ho 67</td> <td>Er 68</td> <td>Tm 69</td> <td>Yb 70</td> <td>Lu 71</td> </tr> <tr> <td>Ac 89</td> <td>Th 90</td> <td>Pa 91</td> <td>U 92</td> <td>Np 93</td> <td>Pu 94</td> <td>Am 95</td> <td>Cm 96</td> <td>Bk 97</td> <td>Cf 98</td> <td>Es 99</td> <td>Fm 100</td> <td>Md 101</td> <td>No 102</td> <td>Lr 103</td> </tr> </tbody> </table> | | | | | | | | | | | | | | | | | | La 57 | Ce 58 | Pr 59 | Nd 60 | Pm 61 | Sm 62 | Eu 63 | Gd 64 | Tb 65 | Dy 66 | Ho 67 | Er 68 | Tm 69 | Yb 70 | Lu 71 | Ac 89 | Th 90 | Pa 91 | U 92 | Np 93 | Pu 94 | Am 95 | Cm 96 | Bk 97 | Cf 98 | Es 99 | Fm 100 | Md 101 | No 102 | Lr 103 |
| La 57 | Ce 58 | Pr 59 | Nd 60 | Pm 61 | Sm 62 | Eu 63 | Gd 64 | Tb 65 | Dy 66 | Ho 67 | Er 68 | Tm 69 | Yb 70 | Lu 71 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ac 89 | Th 90 | Pa 91 | U 92 | Np 93 | Pu 94 | Am 95 | Cm 96 | Bk 97 | Cf 98 | Es 99 | Fm 100 | Md 101 | No 102 | Lr 103 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

5. La taula periòdica com a guia del coneixement

La taula periòdica no és només un coneixement històric, un coneixement que ha donat fruit en el passat. Actualment la taula és utilitzada pels investigadors com a eina per a l'obtenció de compostos amb propietats desitjades. Així, per exemple, ha servit de guia en l'obtenció de materials superconductors (en aquests materials el corrent circula amb resistència nul·la, de manera que no hi ha pèrdues d'energia). El 1911, es descobrí que alguns metalls presenten una resistència zero a temperatura molt baixa, pròxima a 0 K, i pressió elevada. Des de llavors, ha hagut interès per trobar un material que presentara superconductivitat a temperatura ambient. El 1986, els científics descobriren que un compost format per LaSrCuO mostrava superconductivitat a 36 K. L'ús de la taula periòdica portà a obtenir un any després un compost, YBaCuO⁷, que es comportava com a superconductor a la temperatura a 93 K.

Recentment es descobrí que un compost LaFePO presentava superconductivitat a 5 K. Quan se substituï el P per As, la superconductivitat es presentà a 26 K. Amb la substitució parcial de l'ió O²⁻ per l'ió fluorur, F⁻, la superconductivitat es presentà a 50 K. La substitució del La³⁺ per Y³⁺ o altres terres rares permet que la superconductivitat es presente a 54 K. Tots aquests canvis han estat guiats per la taula periòdica.

Les semblances en el comportament d'elements del mateix grup han estat utilitzades en medicina. Així, en el tractament quimioteràpic, i per tal de reduir els efectes

⁷ Hem d'advertir que tots aquestes substàncies no són compostos estequiomètrics. Per exemple, el YBaCuO és fonamentalment la substància sòlida CuO en la que s'han substituït alguns ions Cu²⁺ per ions Ba²⁺ i Y²⁺ en la xarxa cristal·lina.

secundaris provocats per compostos que contenen Pt s'està intentant sintetitzar productes en què el Au substituesca el Pt.

També, la taula periòdica permet explicar la substitució d'alguns elements per altres en alguns compostos. Així, la toxicitat de l'ió beril·li és un problema per a la seguretat industrial i per al medi ambient. La toxicitat és deguda a que l'ió beril·li substitueix a l'ió magnesi inhibint diferents activitats enzimàtiques. També, s'ha vist que l'ió rubidi es capaç de substituir a l'ió potassi en la nutrició de les plantes, impeding el seu creixement.

6. L'expressió d'una llei

Un aspecte que ha generat debat és la pertinència d'utilitzar el concepte de llei científica per a donar compte de la periodicitat reflectida per la taula periòdica.

Les lleis científiques per antonomàsia són les de la física, la llei de gravitació universal o la llei d'Ohm, per exemple. Se'ns dubte, allò més cridaner, i més conegut, de les lleis físiques és que relacionen algebraicament magnituds, de manera que permeten fer prediccions quantitatives. Per descomptat, l'aspecte quantitatiu no està present en la llei periòdica, però en un sentit feble una llei és una generalització de regularitats que permet fer prediccions qualitatives capaces de ser confirmades experimentalment, i aquest requisit sí que el satisfà la llei periòdica.

El fet que la taula periòdica haja permès predir l'existència, i propietats, d'elements desconeguts, i també la capacitat que ha mostrat per acomodar els gasos inerts, i els isòtops dels elements, o el que haja servit de guia per a la recerca materials amb propietats desitjades mostren la capacitat predictiva de la taula, i és per això que podem dir que la llei que hi ha al darrere la taula és una llei científica.

7. La taula periòdica: la sistematització del coneixement químic

L'afirmació que la taula periòdica proporciona informació química necessita ser precisada: conèixer la taula no és sinònim de saber química, és a dir, de saber les propietats i transformacions de les substàncies.

La taula palesa la variació de propietats entre elements: els elements pròxims presenten un comportament semblant, però res diu la taula sobre aquest comportament. Una ullada a la taula no permet fer-nos una idea sobre què és un metall, però sí per a prendre consciència que més de les tres quartes parts dels elements coneguts són metalls (els elements més electropositius). A la part dreta estan els no metalls (els més electronegatius). La taula evidencia com el caràcter metàl·lic disminueix a mesura que avancem per un període. Els elements que estan pròxims a una escala imaginària que ens porte del B al At presenten propietats metàl·liques i no metàl·liques, són els semimetalls.

Els òxids dels metalls originen dissolucions aquoses bàsiques, mentre que les dissolucions dels òxids dels no metalls són àcides, però no diu què caracteritza una dissolució àcida, o bàsica. La taula palesa com a mesura que avancem per un període va disminuint el caràcter bàsic d'aquestes dissolucions i augmentant el caràcter àcid.

Resumidament, la utilitat de la taula és proporcional al coneixement químic que hom disposa: la taula permet resumir informació i fer prediccions sobre el comportament dels elements (substàncies simples i compostos que se'n deriven).

Oliver Sacks en *El tio tungsteno* afirma que *“La tabla periódica era increíblemente hermosa, lo más hermoso que yo había visto. Jamás pude analizar de manera adecuada lo que yo quería dar a entender por belleza en este caso: ¿simplicidad?, ¿coherencia?, ¿ritmo?, ¿inevitabilidad? O quizá se trataba de la simetría, del hecho de que cada elemento quedara firmemente encerrado en su lugar, sin huecos ni excepciones, de que todo implicara la existencia de todo.”*