



SCOPERTA ED AFFERMAZIONE DEL SISTEMA PERIODICO: UNA STORIA SENZA FINE?

Il sistema periodico, la cui scoperta fu annunciata nel 1869 riscosse nell'immediato un modesto interesse da parte della comunità chimica. Solo nella prima metà del Novecento trovò una piena valutazione in seguito alla scoperta delle trasmutazioni nucleari e della meccanica quantistica. Successivamente l'interesse sulla distribuzione degli elementi nell'Universo fece nascere l'attenzione sulla nucleosintesi, la cui interpretazione ha avuto una profonda ricaduta sui problemi connessi, e per certi aspetti non risolti, riguardanti l'evoluzione ed origine della materia.

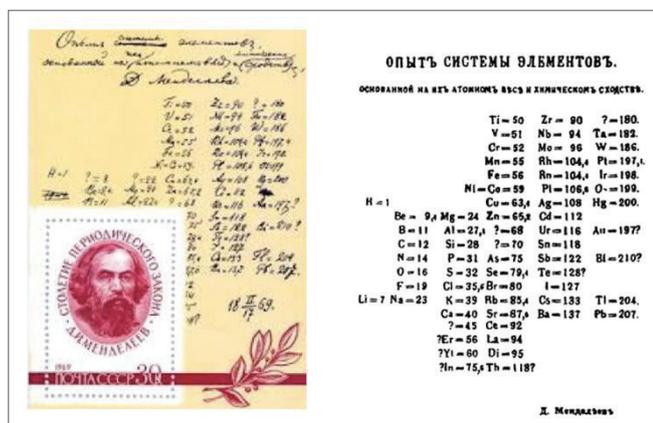


Fig. 1 - Versione autografa, con fotografia di Mendeleev, del sistema periodico e versione stampata in caratteri cirillici

Il fascino irresistibile della periodicità

Nel marzo del 1869 Dmitrij Ivanovic Mendeleev, professore di chimica presso l'Università di San Pietroburgo, informò il mondo scientifico di aver scoperto che le caratteristiche chimiche degli elementi variano periodicamente all'aumentare del loro peso atomico. Lo fece in modo sommo, quasi anonimo, mediante una comunicazione inviata alla riunione della Società Chimica Russa che venne letta in sua assenza dal segretario N.A. Menshutkin, perché era impegnato nei dintorni della città per la visita di alcune fabbriche di formaggio. I presenti decisero di rimandare ogni discussione in proposito senza rendersi conto che tale comunicazione conteneva una delle più importanti scoperte scientifiche del diciannovesimo secolo. Anticipando così il modesto interesse che nell'immediato la comunità dei chimici gli avrebbe riservato.

Karl Suebert nel 1895 ha laconicamente commentato il fatto scrivendo: "Sembra incomprensibile che la consapevolezza dell'importanza del sistema periodico venisse ritardata per diversi anni senza che ci si rendesse conto dei benefici che offriva ai teorici, agli sperimentali ed ai docenti."

In realtà Mendeleev in una precedente pubblicazione dello stesso anno aveva già anticipato la sua scoperta, formalizzata in una tipica tabella (Fig. 1), indicando inoltre la seguente serie di problemi su cui orientare le ricerche:

- la determinazione della posizione nella tabella di alcuni elementi;
- altre forme possibili della legge periodica;
- le relazioni fra le proprietà chimiche di elementi appartenenti allo stesso gruppo;
- la correzione dei pesi atomici di alcuni elementi;
- la ricerca di elementi non ancora scoperti.

Si trattava di una visione prospettica che suggerisce un'analogia a quanto si sarebbe verificato a Parigi nel 1900 nel primo Congresso internazionale di matematica, dove David Hilbert evidenziò 9 problemi, che successivamente divennero 23, che celavano lo sviluppo di tutta la matematica. Analogamente Mendeleev individuava un programma di ricerca che riguardava non solo le basi della chimica, ma anche la natura e l'evoluzione dell'Universo, come appare nella rappresentazione che nel 1886 William Crookes diede delle relazioni esistenti fra gli elementi mediante la spirale di Fig. 2, che indica anche l'ordine della evoluzione degli elementi a partire da una materia primordiale.

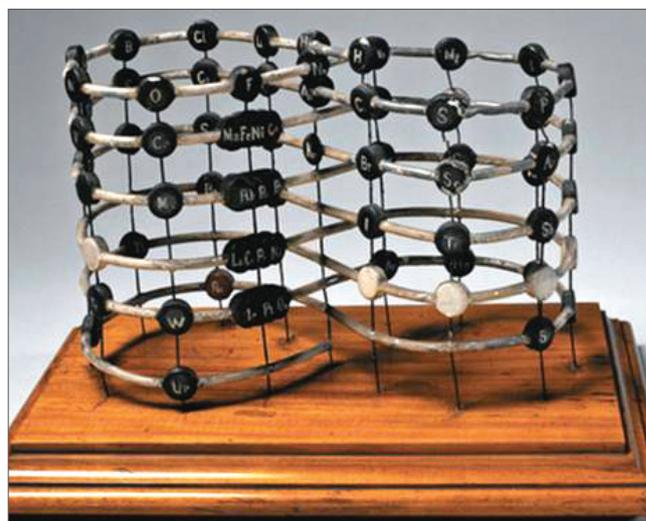


Fig. 2 - Rappresentazione di William Crookes delle connessioni fra gli elementi mediante un modello a spirale che indica l'ordine della loro evoluzione a partire da una materia primordiale

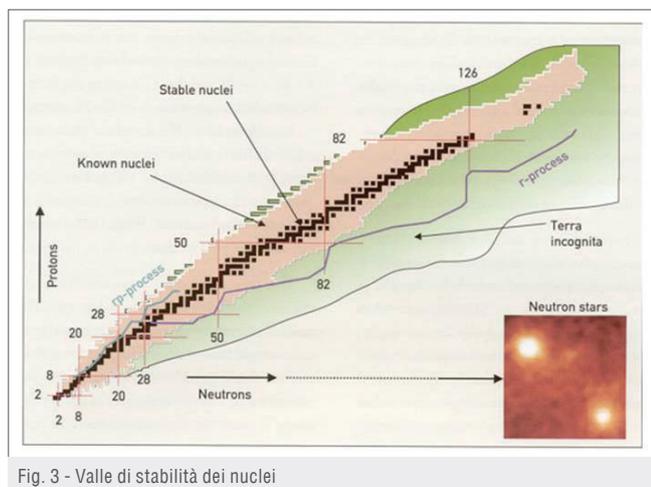


Fig. 3 - Valle di stabilità dei nuclei

In realtà anche se l'Ottocento è stato definito il secolo della chimica, prima dell'inizio del Novecento i tempi non erano del tutto maturi per recepire concetti connaturati con la struttura della materia da parte di una comunità scientifica che, pur accettando gli atomi quali strumenti per effettuare calcoli sulle trasformazioni della materia, dava anche credito alla dottrina dell'"energismo", che ne negava l'esistenza ed aveva come assertori grandi calibri, quali Ernest Mach, professore di fisica e filosofia a Vienna e Wilhelm Ostwald, premio Nobel nel 1911 per i contributi all'«esordiente Chimica Fisica».

Il secolo comunque si chiudeva con rinfrescanti speculazioni provenienti dalla Danimarca da parte di Julien Thomsen, noto per i suoi lavori nella termochimica, che, ipotizzando una evoluzione degli elementi dall'idrogeno, quale sostanza basilare, nel 1894 presentò una struttura piramidale della tavola periodica.

Nel cuore dell'atomo

La scoperta della radioattività da parte di Henry Becquerel nel 1896, seguita dall'isolamento del radio da parte dei coniugi Curie, apriva una nuova era per le scienze atomiche perché la trasformazione di alcuni nuclei in altri, stava rinverdendo l'alchimia. Inoltre offriva ai fisici l'opportunità di usurpare il ruolo dei chimici poiché le esperienze sulla collisione di fasci di particelle con i nuclei atomici aprivano un vaso di Pandora dal quale usciva una moltitudine di nuovi elementi, battezzando così il decollo di quella che sarebbe diventata l'epopea della fisica degli acceleratori di particelle. In tale ambito fu possibile completare e modificare la tavola periodica grazie al contributo di Frederick Soddy e Henry Moseley, che introdussero rispettivamente la definizione di isotopo e l'impiego del numero atomico Z , esprime la somma dei suoi protoni e neutroni, invece del numero di massa A , chiarificando quindi definitivamente il concetto di elemento.

Ci si chiede quindi se la tavola periodica si dovesse considerare un'opera incompleta come la torre di Babele e se l'ingegno umano potesse sfidare Dio nella creazione di nuovi elementi, colmandone le lacune. Infatti, dei 92 elementi preconizzati, ne mancavano alcuni che furono ottenuti per irradiazione, in particolare con deuterio, di nuclei di elementi già esistenti. In prima approssimazione la stabilità dei nuclei è stata indagata assimilando alla goccia di un liquido soggetta a forze superficiali, di origine nucleare e forze elettrostatiche di repulsione fra i protoni, dimostrando che

un nucleo è stabile alle perturbazioni se: $(Z^2/A) < 49$, con $(1 - (Z/A)) = 1,5$. I nuclei che non soddisfano le precedenti relazioni si dividono in due parti, per cui quelli pesanti non vengono osservati in natura. Ne consegue che i nuclei con lunga vita si possono rappresentare nella valle detta di stabilità illustrata nella (Fig. 3), che prevede che al di là dell'uranio, avente numero atomico 92, inizi un mare di instabilità, pur essendo presente una sottile striscia formata da alcuni elementi stabili transuranici che successivamente sono stati ottenuti artificialmente.

Nel quadro precedente il ruolo dei chimici era diventato marginale, anche se la reazione di fissione dei nuclei dell'uranio 235 bombardati da neutroni venne scoperta dal chimico Otto Han, sia pure operando sulla scia dei lavori di Fermi. Le conseguenze di questa scoperta in tutti i suoi risvolti, buoni e cattivi, sono ben note.

La spiegazione della periodicità del comportamento chimico degli elementi sarebbe stata conseguita solo dopo il 1925, quando, applicando la meccanica quantistica, si dimostrò che trae origine dall'estrema stabilità della distribuzione simmetrica che gli elettroni gravitanti attorno al nucleo atomico assumono nei gas nobili. Gli elettroni si distribuiscono, al massimo in coppie in diversi stati quantici. Quelli spaiati, presenti negli stati con l'energia più elevata, determinano il comportamento chimico di ciascun elemento inclusa la morfologia delle molecole in cui viene coinvolto. Questo comportamento è dovuto al principio di esclusione di Pauli, in base al quale ciascun stato quantico può essere occupato da uno o al massimo due elettroni a spin antiparallelo, come se ciascuno di essi avesse uno spazio privato. In termini diversi in un sistema di N elettroni di massa m contenuti in un volume V , è presente una pressione che esercita un effetto repulsivo, uguale a $(h^2/m)(N/V)^{5/3}$ essendo h la costante di Planck; per piccoli oggetti aventi dimensioni dell'ordine di $0,6 N^{1/3} \cdot 10^{-8}$ cm viene bilanciato dall'attrazione elettrostatica con i nuclei. Questo risultato permette di dare una risposta al quesito: perché la materia, costituita da nuclei positivi ed elettroni negativi e quindi soggetta ad attrazione coulombiana, non collassa? Quesito apparentemente facile, ma in realtà problema molto difficile, riguardante la stabilità della materia, ha avuto una soluzione soddisfacente solo grazie all'impegno di fisici matematici di prim'ordine, fra cui Freeman Dyson ed E.H. Lieb. In tale ambito si dimostra che gli atomi hanno le dimensioni opportune perché si creino le strutture a strati che caratterizzano il sistema periodico, in grado di generare le diversificate molecole che popolano il nostro mondo. Giustificando quindi l'esistenza della chimica, della biologia e degli addetti ai lavori (scienziati in genere).

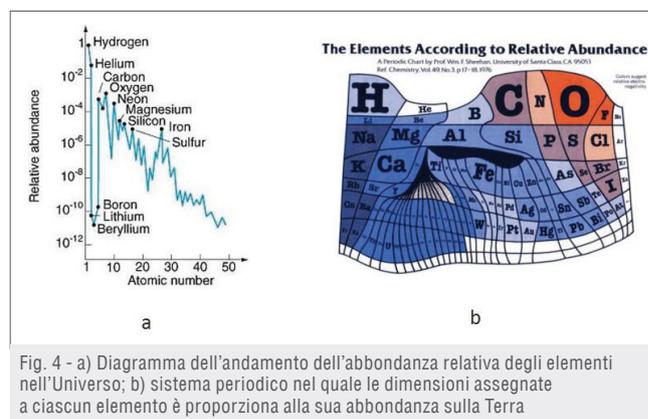


Fig. 4 - a) Diagramma dell'andamento dell'abbondanza relativa degli elementi nell'Universo; b) sistema periodico nel quale le dimensioni assegnate a ciascun elemento è proporzionale alla sua abbondanza sulla Terra

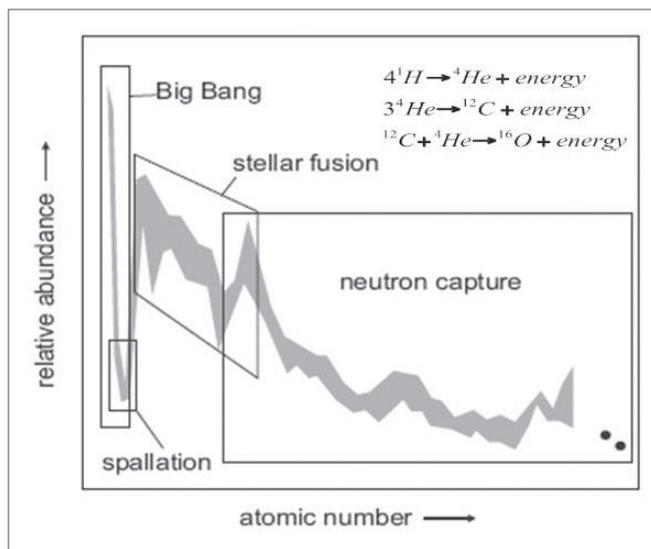


Fig. 5 - Distribuzione degli elementi in accordo alla chimica nucleare. Spallation indica la formazione di Li e Be attraverso la collisione dei nuclei di C ed O con protoni di alta energia presenti nei raggi cosmici

La creazione dell'Universo

Già dalla prima metà del Novecento risultava evidente che Mendeleev dovesse essere considerato una figura di primo piano nella storia della chimica, simile a quella di Linneo per la biologia per aver proposto criteri di classificazione degli organismi viventi che hanno aperto la strada alla formulazione dell'ipotesi evolutiva darwiniana. Un ruolo simile per il sistema periodico emerse dalla geochimica, grazie al contributo di uno scienziato norvegese, Victor Goldschmidt, che, attraverso un'estesa e minuziosa indagine sulla composizione chimica della terra, dei meteoriti e delle nubi galattiche, ottenuta quest'ultima da misure spettroscopiche, pubblicò nel 1937 i valori dell'abbondanza relativa degli elementi chimici presenti nell'Universo (Fig. 4). Il sistema periodico veniva così arricchito da importanti informazioni che mettevano in evidenza che più del 75% della massa dell'Universo è costituita da idrogeno e più del 99% da idrogeno più elio.

L'importanza di questi risultati venne colta dal fisico George Gamow e dal suo allievo Ralph Alpher, che nel 1948 offrirono una interpretazione della creazione del nostro Universo, fotografata dalla evoluzione nel tempo della distribuzione degli elementi a partire da una materia primordiale chiamata *Ylem*, formata da una miscela di neutroni, elettroni e protoni. Attraverso una successione di reazioni nella quale si alternavano l'assorbimento di un neutrone da parte di un nucleo in evoluzione e l'emissione di un elettrone (decadimento beta) con sua trasformazione in un protone e quindi nel nucleo avente numero atomico superiore, è possibile costruire tutti gli elementi esistenti. Tutto ciò nell'ambito della teoria del Big Bang che, a partire dall'istante iniziale della creazione dell'Universo, prevede che la sua espansione sia associata ad una rapida diminuzione della temperatura.

Gamow e Alpher, speculando sulle vicissitudini dell'Universo primordiale, sostennero, nello scetticismo generale, che nell'Universo attuale debba essere presente una radiazione fossile di fondo di pochi gradi assoluti. Cosa confermata da Arno Penzias e Woodrow Wilson vent'anni dopo. Furono quindi in grado di prevedere, mediante un modello matematico co-

stituito da equazioni differenziali ordinarie, simili a quelle che descrivono la cinetica di reazioni chimiche successive, la formazione ed evoluzione dell'idrogeno e dell'elio, ovvero della quasi totalità della massa dell'Universo. Incespicando però nella formazione del carbonio a partire dal berillio poiché, avendo una breve vita media, è presente in piccola concentrazione, come appare dalla Fig. 5. La difficoltà venne superata grazie ad una penetrante osservazione di Fred Hoyle, astrofisico inglese, in base alla quale la velocità di formazione del carbonio potrebbe aumentare di diversi ordini di grandezza se esistesse un suo stato eccitato con un'energia uguale a quella del sistema combinato di un nucleo di elio ed uno di berillio. La rapida conferma sperimentale da parte di William Fowler di tale intuizione metteva in evidenza, per la prima volta, il valore euristico dell'intrigante principio antropico, in base al quale se stiamo osservando l'Universo ne consegue che le sue leggi devono essere compatibili con la nostra stessa esistenza.

Poiché la formazione degli elementi pesanti richiede temperature più elevate di quelle medie dell'Universo contemplate dal Big Bang, essendo invece presenti nell'interno delle stelle risultarono le adeguate fornaci per cucinare gli elementi pesanti, attraverso un processo di nucleosintesi articolato in una catena di reazioni nucleari che deriva da quello proposto originariamente da Hoyle.

L'approfondimento delle trasformazioni in gioco ha richiesto il contributo di diversi ricercatori; in particolare Al Cameron ha identificato le reazioni nucleari responsabili della produzione degli elementi più pesanti dell'ossigeno. Dopo il ferro gli elementi vengono fabbricati per addizione di neutroni, rapida (processi r) e lenta (processi s).

Il successo ottenuto ha suggerito di riscrivere la Genesi nella cornice del Big Bang (Fig. 6), anche se paradossalmente Hoyle lo negava, perché autore della teoria rivale dello stato stazionario, nel cui ambito la materia si forma dal nulla grazie alla presenza di un "campo di creazione" (creation field). Proposta poco ortodossa per la nostra educazione chimico-fisica, ma che evidenziava un problema incombente, ed inquietante, per chiunque si chieda che cosa sia la materia.

In sostanza la teoria attuale sull'origine del sistema periodico è nata dalla convergenza di due modelli in parte sbagliati, grazie a due scienziati che non avevano timori a far uso di ipotesi inconsuete, dimostrando che il mondo necessita di eretici in grado di sfidare le prevalenti e soffocanti ortodossie. A nessuno dei due è stato attribuito il premio Nobel, ma Hoyle è stato gratificato del premio Balzan.

Nuova Genesi

All'inizio Dio ha creato la radiazione e l'Ylem in cui erano presenti casualità e moti caotici.

Quindi disse: siano le masse 2,3,4 ... sino all'elemento 92.

Ma quando si voltò indietro si accorse di aver dimenticato l'elemento di massa 5, per cui non poteva formarsi alcun elemento più pesante.

Allora disse: che venga Hoyle e gli impose di fabbricare gli elementi pesanti, comunque gli piacesse.

Ed Hoyle decise di fabbricarli nelle stelle e di disperderli nell'intorno attraverso le esplosioni delle supernove.

Fig. 6 - Nuova Genesi, da una presentazione di Barbara Gamow

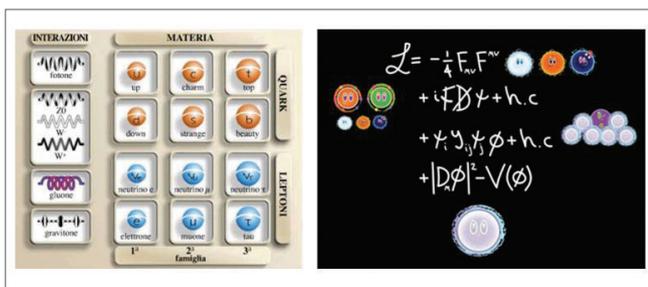


Fig. 7 - a) Particelle fondamentali secondo il modello standard; b) lagrangiana che descrive le loro interazioni

I risultati menzionati hanno ispirato i fisici impegnati nell'esplorazione del mondo subnucleare dove dai grandi acceleratori è emerso uno zoo di particelle la cui classificazione avrebbe infastidito Ernest Rutherford, il pioniere di tale settore di ricerca, che assimilava ogni attività estranea alla fisica alla raccolta dei francobolli.

Tuttavia nell'ambito di un modello definito standard è stato possibile individuare un gruppo limitato di particelle fondamentali, classificate nello schema riportato nella Fig. 7, dalla cui combinazione si ottengono le altre particelle, inclusi i nuclei del sistema periodico. Metaforicamente le particelle fondamentali giocano il ruolo degli atomi mentre quelle più complesse delle molecole. Nella colonna destra sono elencate tre famiglie aventi masse diverse, inclusi due quark e due particelle leggere quali l'elettrone e il neutrino (chiamati leptoni). Solo la prima famiglia è coinvolta nella formazione degli atomi che formano il nostro mondo. Nella colonna a sinistra si trovano le particelle che si comportano da mediatrici delle forze, quali il fotone, i gluoni ed i bosoni Z e W. Quest'ultimo, chiamato di Higgs, è l'ultimo rampollo snidato grazie all'impiego del più grande acceleratore esistente: il Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra.

Alla base del modello domina il principio di simmetria il quale impone che se si effettuano particolari operazioni su un sistema, ad esempio una rotazione o uno spostamento nello spazio, le sue caratteristiche devono rimanere inalterate. Nel caso in esame tali invarianze richiedono l'insorgenza di forze di interazione fra le particelle, la cui energia si valuta mediante l'equazione riportata nella stessa Fig. 7. \mathcal{L} indica la lagrangiana esprimente la differenza fra le energie potenziale e cinetica del sistema. Equazione semplice e pittoresca, all'apparenza, ma che in realtà nasconde calcoli impegnativi che forniscono eccellenti risultati. In tale quadro trova una giustificazione anche la creazione della massa dell'Universo che viene associata ad un meccanismo, chiamato di rottura spontanea della simmetria, che ha avuto luogo subito dopo il Big Bang. Infatti la menzionata lagrangiana, originariamente simmetrica, è compatibile con una massa nulla delle particelle per cui non riflette il mondo in cui viviamo. La rottura di simmetria dalla quale emerge la massa, è simile a quanto si verifica se raffreddiamo un liquido nel quale le molecole si muovono simmetricamente in tutte le direzioni, sino alla solidificazione in corrispondenza della quale vengono congelate in determinate posizioni con definite orientazioni.

Un epilogo inquietante

"Why does the World exist?", perché esiste il mondo? si chiede il giornalista filosofo Jim Holt memore del principio di ragion sufficiente di Leibnitz, girando la domanda a Steven Weinberg, premio Nobel e

pioniere del modello standard. Sul dialogo pesa l'inquietudine di dare un senso ad un intruso avente un nome conturbante "Dark Matter". Si tratta di materia individuata sino ad ora solo per via indiretta da anomalie presenti nella dinamica delle galassie, che sta però acquistando un ruolo incombente nel panorama cosmologico poiché costituisce più del 70% della massa totale dell'Universo pur non essendo note sia la sua natura che la sua provenienza. Ovvero le condizioni al contorno del problema nel quale ci siamo cimentati.

Weinberg esprime scetticismo sul fatto che i fisici riusciranno a spiegare tali condizioni al contorno. Probabilmente ha ragione. Se Holt avesse però posto la domanda al grande Alan Turing gli avrebbe risposto che l'Universo è una equazione differenziale la cui condizione al contorno è la religione.

Gamow, invece, a chi gli chiedeva che cosa facesse Dio prima di creare il cielo e la terra, si rifaceva a Sant'Agostino affermando che preparava l'inferno per chi scruta i misteri profondi della natura.

BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

- [1] K. Masanori, H. Kragh, G. Pall, *Early Responses to the Periodic System*, Oxford University Press, 2015.
- [2] E. Persico, *Gli atomi e la loro energia*, Zanichelli, Bologna.
- [3] J.J. Brehm, W.J. Mullin, *The Introduction to the Structure of Matter*, John Wiley, 1989.
- [4] J.D. Barrow, F.J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, 1986.
- [5] H. Kragh, *Cosmology and Controversy*, Princeton University Press, 1996.
- [6] E.H. Lieb, *Rev. Mod. Phys.*, 1976, **48**, 553.
- [7] R.A. Alpher, H. Bethe, G. Gamow, *Physical Review*, 1948, **73**, 803.
- [8] E.M. Burbidge, G.R. Burbidge, W.A. Fowler, F. Hoyle, *Rev. Modern Physycs*, 1957, **29**, 547.
- [9] S. Weinberg, *I primi tre minuti*, Mondadori, Milano, 1977.
- [10] S.E. Woosley, *Nature Physics*, 2007, **3**, 833.
- [11] G. Kane, *Modern Elementary Particle Physics*, Addison Wesley, 1993.
- [12] W. Peter Higgs, *Phys. Rev.*, 1966, **145**, 1156.
- [13] H. Genz, *Nothingness*, Perseus Books, 1999.
- [14] M. Krauss, CERN, *How We Found the Higgs Boson*, World Scientific, 2014.
- [15] S. Weinberg, *Quantum Theory of Fields*, Cambridge University Press, 1995.
- [16] J. Holt, *Why does the world exist?*, Profile Books, 2012.

Discovery and Achievement of the Periodic System: a Never-ending Story?

The Periodic Table, whose discovery was announced in 1869, received in the immediate modest interest from the chemical community. In the first half of the Twentieth century it got a full evaluation after the discovery of the nuclear transmutations and of quantum mechanics. Afterwards the interest on the distribution of elements in the Universe aroused the attention on nucleosynthesis, whose interpretation has had a profound fallout on problems related to some unresolved issues concerning the evolution and origin of matter.