

NADIA ROBOTTI^A, MATTEO LEONE^B^ADIPARTIMENTO DI FISICA, UNIVERSITÀ DI GENOVA;
MUSEO STORICO DELLA FISICA E CENTRO STUDI E RICERCHE “ENRICO FERMI”;
INFN, SEZIONE DI GENOVA^BDIPARTIMENTO DI FILOSOFIA E SCIENZE DELL'EDUCAZIONE, UNIVERSITÀ DI TORINO;
MUSEO STORICO DELLA FISICA E CENTRO STUDI E RICERCHE “ENRICO FERMI”; INFN, SEZIONE DI TORINO
ROBOTTI@FISICA.UNIGE.IT

LA TRASMUTAZIONE DEGLI ELEMENTI

Si ripercorrono le tappe principali delle ricerche sulle trasmutazioni degli elementi, a partire dall'elaborazione della tavola periodica da parte di Dimitrij Ivanovič Mendeleev, passando attraverso la scoperta della radioattività naturale, la realizzazione della prima trasmutazione artificiale e la connessa scoperta del protone, per arrivare fino alla scoperta della radioattività artificiale indotta da particelle α e da neutroni.

“ Il problema della scoperta di metodi intesi a trasmutare un elemento chimico in un altro è stato variamente studiato da parecchie generazioni di ricercatori scientifici. Com'è risaputo, nel medio evo il più dei lavori degli alchimisti, dai quali ha origine appunto la chimica moderna, è intensamente rivolto ai tentativi di trasformare il mercurio in oro; ma solo in tempi molto recenti le nostre cognizioni sulla struttura e sulle proprietà dell'atomo hanno progredito a tal punto da poterci consentire di trattare il problema su basi scientifiche e di ottenere l'effettiva trasmutazione di un certo numero di elementi chimici. Se è vero che a molti alchimisti arrise la speranza di conquistare il benessere e la ricchezza, non credo davvero che altrettanto possa dirsi per alcuno degli scienziati che oggi lavorano nello stesso campo” [1].

Con queste parole Enrico Fermi (1901-1954) celebrava nel 1935, con un pizzico di amarezza, ma, come ha dimostrato la storia, sbagliando in parte, le recenti conquiste scientifiche che lo avevano visto protagonista. Solo l'anno prima Fermi aveva, infatti, scoperto la radioattività indotta da neutroni, assieme all'effetto del loro rallentamento, aggiudicandosi, nel 1938, il premio Nobel per la Fisica. Nel seguito ripercorreremo rapidamente la strada che, dall'individuazione delle prime forme di trasmutazione degli elementi, portò a questa scoperta di Fermi, che, nel bene e nel male, cambiò la storia dell'Umanità. Punto di partenza, naturalmente, fu la tavola periodica, la cornice dentro la quale queste ricerche si svolsero e che compie quest'anno 150 anni.

La prima tavola periodica

La costruzione della prima tavola periodica degli elementi da parte di Dmitrij Ivanovič Mendeleev (1834-1907), avvenuta nel 1869, fu un processo complicato, fatto di prove, aggiustamenti, spostamenti, incastri, che durò alcuni anni [2]. Per superare la classificazione a quei tempi adottata che divideva, senza regole interne, gli elementi in due grandi gruppi, i *metalli* e i *metalloidi*, Mendeleev ebbe la grande idea di considerare il *peso atomico* di un elemento chimico (pochi anni prima determinato con estrema precisione dal chimico palermitano Stanislao Cannizzaro, 1826-1910) il parametro caratterizzante i vari elementi e di costruire, su questo parametro, una “sistemazione ordinata” dei 62 elementi fino ad allora noti, che riflettesse le loro proprietà chimiche. In particolare Mendeleev si accorse che se disponeva gli elementi in righe orizzontali, in ordine di peso atomico crescente, in modo che gli elementi chimicamente simili fossero disposti in colonne verticali uno sotto l'altro, ne emergeva un quadro sistematico e le proprietà si ripetevano periodicamente, secondo schemi ricorrenti.

Mendeleev aveva scoperto la legge della periodicità, il preciso criterio di classificazione su cui si fonda la tavola periodica degli elementi che porta il suo nome. L'intuizione geniale di Mendeleev fu quella, per poter mantenere gli elementi con le stesse proprietà nel medesimo gruppo, di lasciare *posti vuoti* nella tabella, prevedendo l'esi-

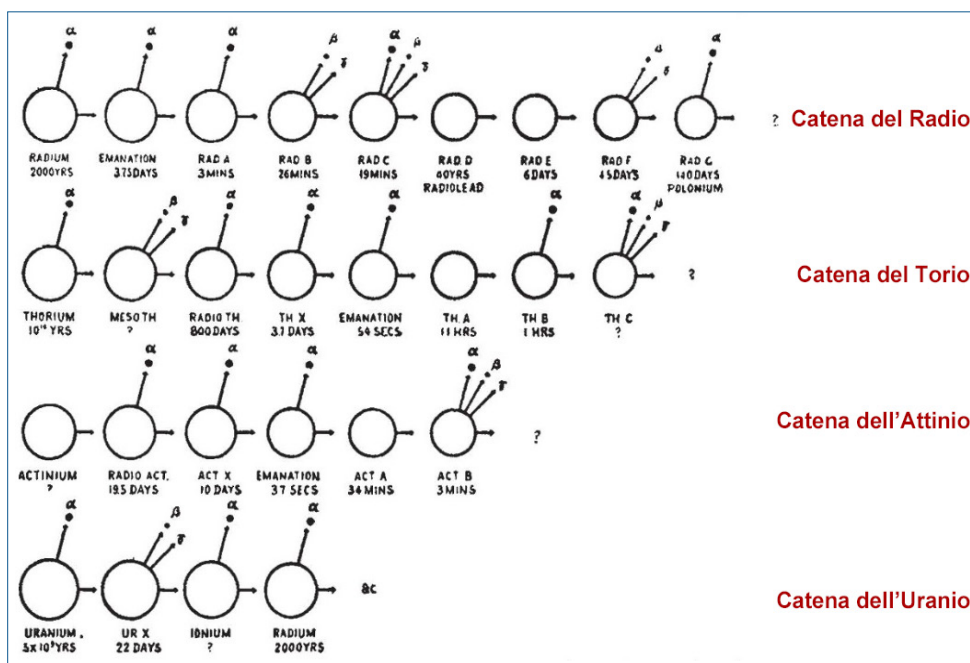


Fig. 1 - Successione degli "elementi" prodotti rispettivamente nella trasformazione del radio, del torio, dell'attinio e dell'uranio, così come rappresentata da Rutherford nel 1904. Sotto ogni elemento è riportato il suo tempo di decadimento

stenza di elementi non ancora noti. Così, quando furono isolati il gallio (1875) e lo scandio (1879), si vide che andavano a collocarsi proprio nei posti lasciati liberi per gli elementi di quelle caratteristiche. E la scoperta del germanio (1886) fu la prova definitiva della validità del sistema periodico di Mendeleev.

Le trasmutazioni naturali

Alcuni anni dopo questi successi, fu scoperto un fenomeno che creò non pochi problemi alla tavola periodica degli elementi, portando alla fine a un suo nuovo assetto, tuttora valido.

Tutto cominciò con la scoperta, nel 1896, di Henry Becquerel (1852-1908) che l'elemento uranio aveva la proprietà di emettere spontaneamente radiazioni elettromagnetiche molto penetranti, simili ai raggi X, scoperti l'anno prima da Wilhelm Conrad Roentgen [3]. Immediatamente i coniugi Pierre e Marie Curie (che si erano sposati solo l'anno prima) si dedicarono, in un laboratorio di fortuna e con strumenti rudimentali, allo studio di questa proprietà, chiamata poi da Marie Curie "radioattività". All'epoca, Pierre Curie (1859-1906) era professore di Fisica alla Scuola Superiore di Fisica e Chimica Industriale di Parigi, mentre Marie Skłod-

owska Curie (1867-1934) stava conducendo, sotto la supervisione del marito, una tesi di dottorato in Fisica. Nel giro di un anno i coniugi Curie non solo scoprirono che altri elementi noti da tempo, come il torio, erano radioattivi, ma scoprirono anche due nuovi elementi che avevano questa proprietà. Questi *due nuovi elementi* furono chiamati rispettivamente polonio (in onore del Paese di origine di Marie Curie) e radio (dal latino "raggio") [5]. Becquerel e i coniugi Curie ricevettero nel 1903 il premio Nobel per la Fisica, il terzo attribuito nella

storia. Il premio fu diviso in due parti: una metà fu attribuita a Becquerel "per i servizi straordinari resi dalla sua scoperta della radioattività spontanea"; l'altra metà, congiuntamente, a Pierre Curie e Marie Curie "per i servizi straordinari resi grazie alle loro ricerche congiunte sui fenomeni di radiazione scoperti dal professor Henri Becquerel". Nel 1911, "per i suoi servizi al progresso della chimica dovuti alla scoperta degli elementi radio e polonio, all'isolamento del radio e allo studio della natura e dei composti di questo notevole elemento", a Marie Curie (ormai vedova dal 1907) venne assegnato un secondo premio Nobel, questa volta per la Chimica.

Nell'immediato, l'esistenza di elementi radioattivi non creò problemi alla tavola periodica di Mendeleev, in quanto per essi si riusciva a trovare al suo interno una giusta collocazione. I problemi nacquero, invece, quando Ernest Rutherford (1871-1937), nel 1902, scoprì la *legge del decadimento radioattivo* (per la quale ottenne il Premio Nobel per la Chimica nel 1908) [6]. Secondo questa legge, gli elementi radioattivi, nell'emettere radiazioni (raggi γ o particelle α o β), si trasformavano ("decadevano"), secondo leggi ben precise, in nuovi elementi chimici, chiamati da Rutherford

“their daughters” (loro figlie). Fu così che sorse un problema scottante: dove si sarebbero dovuti collocare nella tabella di Mendeleev i nuovi elementi appena scoperti (“le sostanze figlie”), e indicati simbolicamente, a seconda della catena di appartenenza, radio A, radio B, torio A, torio B, attinio A, attinio B, uranio A, e così via? (Fig. 1) Nella tavola di Mendeleev, così come era stata costruita, ovvero *ogni casella, un solo peso atomico e quindi un solo elemento*, non c’era posto! La soluzione si ebbe, nel 1913, a partire dall’idea del chimico inglese Frederick Soddy (1877-1956), secondo cui in una stessa casella della tavola di Mendeleev potevano coesistere più elementi, chimicamente e fisicamente quasi identici tra di loro, ma con pesi atomici diversi, che chiamò “*elementi isotopi*” [7]. Con questa idea, i nuovi “elementi” radioattivi trovavano immediatamente posto, andando ad “occupare caselle già occupate”. A distanza di meno di un anno, la correttezza dell’idea di Soddy venne provata sperimentalmente dalla chimica polacca Stephanie Horovitz (1877-1942). Studiando la catena di decadimento dell’uranio e quella del torio, la Horovitz riuscì, infatti, a dimostrare che il piombo proveniente dal decadimento dell’uranio aveva peso atomico diverso dal piombo proveniente dal torio e che entrambi avevano peso atomico diverso da quello del piombo tipico. Questa era la prima prova sperimentale che un elemento chimico poteva avere peso atomico diverso a seconda della sua origine e che quindi il peso atomico, non poteva più essere considerato il parametro che caratterizzava l’elemento.

La provata esistenza degli “isotopi” portò immediatamente all’abbandono del peso atomico, inteso come parametro ordinatore della tavola periodica e alla sua sostituzione con il numero del posto che l’elemento, in base alle sue proprietà chimiche e fisiche, occupava all’interno della tavola periodica di Mendeleev. Questo numero fu chiamato “*numero atomico*” (Z) e subito identificato con la carica del nucleo (siamo ormai nel 1913 e il concetto di *nucleo atomico* si era già affermato).

Rutherford: “Il primo trasmutatore di elementi”

Come si è detto, il fatto che alcuni elementi (i cosiddetti “elementi radioattivi”) non fossero immutabili nel tempo, ma che si trasformassero spontaneamente in altri elementi, emettendo “radiazioni” era già stato stabilito da Rutherford a inizio Novecento. Tuttavia, un conto è guardare, studiare e spiegare un fenomeno apparentemente miracoloso, che accade spontaneamente in Natura, quale la radioattività, un altro conto è riuscire a trasformare un elemento in un altro elemento o in un suo isotopo con mezzi di laboratorio: è come trovare la pietra filosofale degli alchimisti che consente di trasformare il mercurio in oro. E questo verrà realizzato per la prima volta nel 1919, ancora una volta da Rutherford, significativamente chiamato da Fermi “il primo trasmutatore di elementi” [1].

Come è noto Rutherford, sulla base di alcuni esperimenti sullo *scattering* delle particelle α attraverso materiali pesanti, compiuti a Manchester, sotto la sua guida, da H.W. Geiger (1882-1945) e da E. Marsden (1889-1970), nel 1911 scoprì il nucleo atomico e sviluppò, per spiegare questi esperimenti, la teoria dello scattering singolo, nell’approssimazione (legittima per gli atomi pesanti) che il moto del nucleo bersaglio si potesse trascurare. Successivamente incaricò un suo giovane collaboratore, C.G. Darwin, di generalizzare questa teoria al caso di scattering di α attraverso materiali leggeri, in cui si doveva tener conto anche del moto del nucleo urtato. La teoria di Darwin (1912) venne sottoposta nel 1914 a una prima verifica

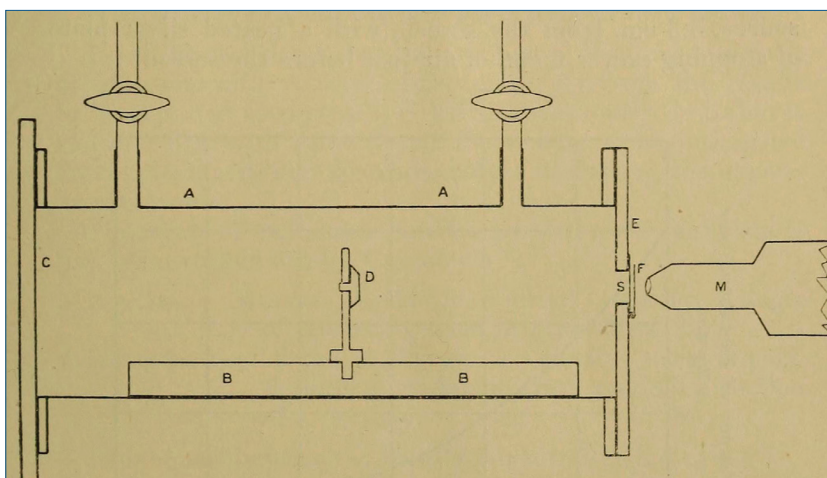
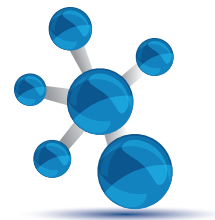


Fig. 2 - Schema dell'apparato di Rutherford che portò alla realizzazione della prima trasmutazione artificiale e, nello stesso tempo, alla scoperta del protone



sperimentale da parte di Marsden nel caso dell'idrogeno. La tecnica per rilevare le particelle diffuse era quella della scintillazione, già sperimentata a Manchester, e basata sulla proprietà delle α di produrre delle piccolissime macchie luminose nell'impatto con uno schermo di solfuro di zinco. Questi esperimenti, mentre da un lato portarono a una prima conferma della teoria di Darwin per quanto riguardava sia il *range* degli "atomi H" urtati (circa 4 volte quello delle α), sia l'intensità degli spot luminosi prodotti (molto più deboli di quelli delle α), dall'altro lato sembravano mostrare la presenza di "scintillazioni naturali", così le chiamò Marsden, prodotte da "atomi di idrogeno" emessi dalla stessa sorgente radioattiva. Questi esperimenti, comunque, furono presto interrotti, a causa della partenza di Marsden per la Nuova Zelanda e ripresi personalmente da Rutherford, a intervalli irregolari tra il 1915 e il 1919 a causa del suo coinvolgimento nella Grande Guerra.

L'apparato sperimentale messo a punto da Rutherford (Fig. 2), che era una versione un po' più sofisticata di quello usato da Marsden, consisteva in un tubo di bronzo lungo 18 cm, che, tramite due rubinetti, veniva riempito con il gas da studiare. La sorgente di α , (D), era posta su un supporto mobile lungo la sbarra (B). Un estremo del tubo era chiuso da una sottile lamina metallica (S), di fronte alla quale, a una distanza di 2 mm, all'esterno del tubo, era posto lo schermo di solfuro di zinco (F) su cui venivano rilevate le particelle α e i nuclei diffusi. Il tutto era posto in un forte campo magnetico, per deviare i raggi β emessi dalla sorgente.

Con questo apparato, dopo aver confermato, variando la distanza tra la sorgente e lo schermo, le previsioni della teoria di Darwin riguardo alla legge di scattering delle α , sia nel caso dell'idrogeno, sia in quello di altri gas leggeri, Rutherford si impegnò in uno studio delle "scintillazioni naturali" viste da Marsden, e da questi attribuite ad "atomi di idrogeno provenienti dalla sorgente". A tal fine pose la sorgente (D) in una posizione fissa, al fondo dell'apparato, a circa 3 cm dallo schermo S e variò il tipo di gas di riempimento. Come segnalava Rutherford, in queste condizioni, facendo il vuoto, erano sempre visibili sullo schermo (F) scintillazioni "naturali tipo particelle H", le quali, come prevedibile, diminuivano in numero interponendo

tra la lastra S e lo schermo F spessori crescenti di alluminio. Introducendo ossigeno secco o biossido di carbonio, il numero di "scintillazioni H" diminuiva ulteriormente, rispetto al caso del vuoto, di una quantità circa uguale a quanto ci si aspettava in base al potere assorbente della colonna di gas attraversato (tra D e S). Invece, quando veniva introdotta "aria secca", accadeva un "effetto sorprendente": il numero di "scintillazioni H", invece di diminuire, *aumentava considerevolmente*, diventando più del doppio di quello osservato nel vuoto. Ciò significava che le α , nel passaggio attraverso l'aria avevano dato origine a "ulteriori" nuove "scintillazioni H", rispetto a quelle attribuibili alla sorgente. Rutherford cercò allora di stabilire da quale componente dell'aria (che si sapeva non contenere idrogeno) provenissero queste "scintillazioni H". Dopo un'accuratissima indagine sistematica su tutti i componenti dell'aria, Rutherford riuscì a stabilire in modo inequivocabile che esse *provenivano dall'azoto*.

A questo punto la sua conclusione era chiara: alcuni nuclei di azoto erano stati *disintegrati* dall'impatto con una particella α veloce, ed erano state espulse "particelle H", ovvero "nuclei di idrogeno", il che equivaleva a dire che il nucleo di idrogeno era "uno dei componenti con cui è fatto il nucleo di azoto" [9]. A questo nuovo componente nucleare, Rutherford nel 1920 diede il nome di "protoni". Successivi esperimenti di Rutherford, condotti negli anni seguenti assieme a James Chadwick (1891-1974), confermarono che le particelle α erano in grado di espellere i protoni anche dai nuclei di molti altri elementi leggeri, "disintegrando la struttura di atomi stabili".

Il *metodo della scintillazione* non era però in grado di dare informazioni dirette sulle disintegrazioni nucleari avvenute e neppure sul "meccanismo della collisione". Rutherford suggerì quindi di studiare i fenomeni di scattering delle α con gas leggeri, utilizzando una *camera di Wilson* (o *camera a nebbia*), che consentiva di visualizzare le tracce di particelle cariche o di raggi ionizzanti all'interno di un gas. Dopo una serie di tentativi falliti (1921) da parte di un suo collaboratore, Takeo Shimizu, il successo venne raggiunto nel 1924 da un suo altro collaboratore, P.M.S. Blackett (1897-1974), che modificò una sua precedente macchina di

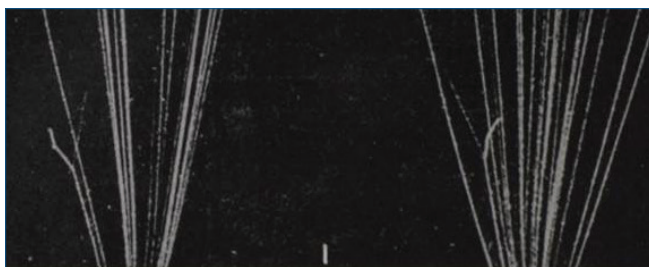


Fig. 3 - Una delle prime fotografie del protone ottenute da Blackett con la camera a nebbia

Wilson e studiò le α emesse da una sorgente α in azoto. Blackett scattò circa 23.000 fotografie e individuò le tracce di circa 270.000 α . In molte di queste erano presenti delle “forks” (forcelle), in cui la traccia della α si divideva in due tracce: una dovuta alla α originaria, l'altra, più corta e più larga, dovuta al nucleo di azoto urtato, a testimonianza dell'avvenuta collisione elastica tra α e azoto. Però, oltre a queste “forks normali”, Blackett trovò otto eventi di “un tipo diverso” (Fig. 3): in essi la traccia dovuta alla α spariva e si trasformava in due tracce, una molto sottile e attribuibile al protone (p), l'altra molto simile a quella lasciata dal nucleo di azoto in una “fork normale”.

Richiamandosi a quanto già previsto da Rutherford, Blackett concludeva, dunque, che la α ($Z=2$), nell'urto con il nucleo bersaglio, veniva da questo assorbita e veniva espulso un protone ($Z=1$). Quindi, tenendo conto dei numeri atomici, si poteva affermare che il nucleo originario, a seguito della collisione con una α , si era trasformato in un nuovo nucleo, di una specie chimica diversa: in questo caso l'azoto ($Z=7$) era stato trasformato in ossigeno ($Z=8$) secondo una reazione nucleare che ora noi indichiamo come (α,p) [10], realizzando, così, in un certo senso, il vecchio sogno degli alchimisti.

La radioattività artificiale

Dunque, sempre sotto l'indicazione e la supervisione di Rutherford, non solo veniva provata la possibilità di disintegrare artificialmente gli elementi chimici con le particelle α , ma veniva indicato anche il modo in cui queste disintegrazioni avvenivano. Comunque si trattava sempre di trasformazioni, fatte dall'uomo, di atomi stabili in altri atomi stabili.

Il passo successivo sarà la realizzazione, da parte dell'uomo, della trasformazione di un elemento

stabile in un elemento radioattivo, non presente in Natura, che a sua volta decade in un elemento stabile, cioè la realizzazione della “radioattività artificiale”.

Ciò avverrà nel 1934, a distanza di due anni dalla scoperta di un nuovo costituente del nucleo atomico, il neutrone (Chadwick, 1932), e dalla scoperta dell'elettrone positivo, o positrone (Anderson, 1932). Il 15 gennaio 1934, infatti, Frédéric Joliot e Irène Curie (rispettivamente genero e figlia di Marie Curie), dopo una serie di esperimenti sulle trasmutazioni nucleari prodotte da particelle α comunicarono all'Accademia delle Scienze di Parigi che *bombardando con queste particelle alcuni elementi leggeri* (alluminio, boro e magnesio), erano riusciti a produrre isotopi radioattivi di elementi noti, che non esistevano in natura e che decadevano emettendo positroni [11]. Per questa scoperta verrà loro assegnato nel 1935 il Premio Nobel per la Chimica.

A distanza di meno di un mese vennero scoperti altri modi per provocare la radioattività indotta con emissione di positroni, in particolare attraverso il bombardamento con *protoni* (J.D. Cockroft, C.W. Gilbert ed E.T.S. Walton) e con *deutoni*, (M.C. Henderson, M.S. Livingston ed E.O. Lawrence; H.R. Crane e C.C. Lauritsen).

La radioattività artificiale prodotta fino a quel momento, cioè con bombardamento di particelle positive, aveva però un grosso limite. A causa della repulsione coulombiana dovuta alla carica positiva del nucleo, questo tipo di particelle riuscivano a penetrare solo all'interno degli atomi più leggeri e quindi veniva creato un numero piccolissimo di nuovi elementi radioattivi.

La svolta si ebbe a distanza di due mesi, con la scoperta da parte di Enrico Fermi della radioattività indotta da neutroni. Infatti il 25 marzo 1934, guidato dalla sua teoria del decadimento beta, Fermi si impegnò in un esperimento difficilissimo, mai tentato da nessuno a causa della debolezza delle sorgenti allora disponibili, e, cioè, indurre la radioattività con i neutroni [12]. Usando una piccola sorgente di neutroni “fatta in casa”, riusciva a trasformare due elementi, l'alluminio e il fluoro, producendo due nuovi isotopi che decadevano con emissione di elettroni, come gli elementi radioattivi naturali. Questo fu solo il primo di una



Fig. 4 - Particolare dei tubi di vetro contenenti alcune delle sorgenti di neutroni, radon-berillio, utilizzate da Fermi (Fondazione Domus Galilaeana, Pisa)

serie di grandi successi. Infatti, poiché i neutroni, non avendo carica, riuscivano a penetrare con facilità attraverso tutti gli elementi (anche i più pesanti), nel giro di pochi mesi Fermi, aiutato da alcuni collaboratori (i cosiddetti “Ragazzi di via Panisperna”), riuscì ad attivare più di 40 elementi chimici. Successivamente, con la scoperta (ottobre 1934), dell’effetto del rallentamento dei neutroni nell’aumentare la radioattività, Fermi riuscì ad attivare quasi tutta la tavola periodica [13].

Per “la scoperta di nuove sostanze radioattive appartenenti all’intero campo degli elementi e per la scoperta del potere selettivo dei neutroni lenti”, il 12 dicembre 1938 a Fermi veniva conferito il premio Nobel per la Fisica. Si trattava di un premio Nobel tutto italiano, che coronava un incredibile ciclo di ricerche che in alcuni aspetti avevano quasi del miracoloso.

Tutto avvenne nel giro di meno due anni e, oltretutto, avendo a disposizione mezzi molto limitati, quali una modesta sorgente di neutroni radon-berillio tanto piccola “che può sparire in una mano” (Fig. 4).

Con questi mezzi modesti, Fermi riuscì a realizzare ciò che nei più grandi laboratori del mondo nessuno aveva mai osato cercare di fare. Tutto ciò che avvenne in seguito (la scoperta della fissione nel 1938, la prima pila atomica nel 1942, la bomba atomica, la produzione di energia nucleare a fini industriali, la produzione massiccia di nuclidi radioattivi, da usare come traccianti o per cure mediche), è una diretta conseguenza di questo primo sorprendente risultato!

E così, attraverso ricerche che hanno visto negli ultimi 150 anni la cooperazione dei chimici e dei fisici, l’originale tavola periodica di Mendeleev si

è via via riorganizzata e completata, attraverso la sintesi di nuovi elementi non esistenti in Natura. E trova così conferma la formidabile intuizione di Leonardo che, più di 500 anni fa, così scrisse nel Codice Windsor: “*In effetti l’omo [...] si dimostra essere cosa divina, perché dove la natura finisce il produrre le sue spezie, l’omo quivi comincia, colle cose naturali, a fare, coll’auto-ria d’essa natura, infinite spezie*”.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Fermi, *Sapere*, 1935, **1**, 55.
- [2] D. Mendeleev, *Zeitschrift für Chemie*, 1869, **12**, 405.
- [3] H. Becquerel, *Compt. Rend. Hebd. Seances Acad. Sci.*, 1896, **122**, 420.
- [4] P. Curie, M. Skłodowska-Curie, *Compt. Rend. Hebd. Seances Acad. Sci.*, 1898, **127**, 175.
- [5] P. Curie et al, *Compt. Rend. Hebd. Seances Acad. Sci.*, 1898, **127**, 1215.
- [6] E. Rutherford, F. Soddy, *Phil. Mag.*, 1902, **4**, 370, 569
- [7] F. Soddy, *Nature*, 1913, **92**, 399.
- [8] H.G.J. Moseley, *Phil. Mag.*, 1914, **27**, 703.
- [9] E. Rutherford, *Phil. Mag.*, 1919, **37**, 581.
- [10] P.M.S. Blackett, *Proc. Roy. Soc. London, Series A*, 1925, **107**, 349.
- [11] F. Joliot, I. Curie, *Compt. Rend. Hebd. Seances Acad. Sci.*, 1934, **198**, 254.
- [12] E. Fermi, *La Ricerca Scientifica*, 1934, **5**, 283.
- [13] F. Guerra, N. Robotti, *The lost notebook of Enrico Fermi. The true story of the discovery of neutron-induced radioactivity*, Springer, Cham (Switzerland), 2018.

The Elements Transmutation

The main steps of the research on the transmutations of the elements are here discussed, starting from the elaboration of the periodic table, passing through the discovery of natural radioactivity, the accomplishment of the first artificial transmutation and the related discovery of the proton, up to the discovery of the artificial radioactivity induced by alpha particles and by neutrons.