

Enrico Fermi

Trasmutazione artificiale degli elementi¹

Artificial Transmutation of Elements¹

Riassunto. La trasmutazione artificiale degli elementi, la produzione artificiale di corpi radioattivi, la loro possibile utilizzazione in medicina, la probabile scoperta di nuovi elementi chimici in più dei novantadue finora conosciuti, sono l'oggetto di questo scritto di Enrico Fermi che per i suoi lavori in corso nell'Istituto fisico dell'Università di Roma, coi contributi di valentissimi collaboratori, va richiamando l'attenzione di tutto il mondo sull'attività scientifica italiana in questo campo eccezionalmente importante sotto ogni aspetto.

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. E 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

Abstract. The artificial transmutation of elements, the artificial production of radioactive bodies, their possible use in medicine, the probable discovery of new chemical elements in addition to the ninety-two elements already known are the subjects of this article written by Enrico Fermi. Thanks to studies which he is currently conducting at the Physics Institute of the University of Rome and to contributions from his highly talented collaborators, Fermi is attracting worldwide attention to Italian scientific research on this topic, which has proved to be exceptionally important from every point of view.

The problem of discovering methods aiming to transmute one chemical element into another has been the object of investigation for many generations of scientific researchers.

As is known, in the Middle Ages most of the work of alchemists (from whom modern chemistry originated) focused closely on the attempt to transform mercury into gold. Only quite recently, however, has our knowledge of the structure and properties of the atom developed to





Figura 1. La copertina e l'indice del numero di Sapere da cui è tratto questo articolo di Fermi.

Figure 1. The cover and table of contents of the issue of Sapere from which this article by Fermi is taken.

a level that allows us to deal with this issue on a scientific basis and to obtain the real transmutation of a certain number of chemical elements. And whereas it is true that many alchemists were motivated by the hope of gaining well-being and riches, I very much doubt that the same can be said of any scientist working in the same field today. The quantity of matter that we are now able to transform by more suitable means is so minimal as to escape detection using even the most accurate chemical analysis. In recent years, the only direct means that allow us to definitively prove successful transmutations are very precise radioactive measurements, which can often reveal the presence of even a small number of atoms.

The English physicist Lord Rutherford, at the *Cavendish Laboratory* in Cambridge, was the first scientist to transmute elements. In 1919, he proved that certain light elements, such as aluminium and nitrogen, when bombarded with alpha particles emitted by radioactive bodies, could sometimes absorb one of these particles and simultaneously emit a lighter particle: a "proton."

In order to clarify the importance of this discovery, it is necessary to remember that, according to modern theories, an atom is made up of charged particles. A relatively heavy particle called the "nucleus" occupies the centre of the atom. The nucleus is positively charged and is surrounded by negatively charged particles, exactly identical in all atoms, called "electrons". What differentiates the various types of atoms is the different types of nuclei. Nuclei can differ from each other depending either on their mass or on their electric charge. The electric charge is measured in atomic units and is always expressed by a whole number (the "atomic number"): 1 for hydrogen, 2 for helium, 3 for lithium and so on, until 92 for uranium, which

nello stesso campo. La quantità di materia che si riesce a trasformare coi mezzi più adatti è tanto esigua da sfuggire anche ai più delicati processi di analisi chimica e soltanto le sensibilissime misure radioattive, consentendo di rivelare in molteplici casi la presenza di un numero anche piccolo di atomi, han fornito direttamente, negli ultimi anni, la prova sicura delle trasmutazioni compiute.

Il primo trasmutatore di elementi è stato il fisico inglese Lord Rutherford, del *Cavendish Laboratory* di Cambridge. Di fatto, nel 1919 egli dimostrava che alcuni elementi leggeri, ad esempio l'alluminio e l'azoto, quando venivano colpiti con particelle alfa emesse da corpi radioattivi, potevano qualche volta assorbire una di queste particelle ed emettere invece, corrispondentemente, un corpuscolo più leggero: un "protone".

Allo scopo di chiarire il significato di questa scoperta sarà opportuno ricordare che, secondo le moderne teorie, l'atomo si ritiene costituito da corpuscoli carichi. Il centro dell'atomo è occupato da una particella relativamente pesante: il così detto "nucleo". Questo è carico positivamente ed ha intorno a sé corpuscoli negativi, gli "elettroni", perfettamente identici in tutti gli atomi. Ciò che differenzia tra di loro le varie specie atomiche è la diversa specie di nuclei, i quali possono differire o per massa o per carica elettrica: quest'ultima, misurata in unità atomiche, è sempre espressa da un numero intero (il "numero atomico"): 1 per l'elemento idrogeno, 2 per l'elio, 3 per il litio e così via, sino a 92 per l'uranio, che è il più pesante di tutti gli atomi conosciuti. Le particelle alfa, che il Rutherford impiegava nelle sue esperienze, sono nuclei di elio proiettati spontaneamente da corpi radioattivi; invece i protoni, emessi dai corpi che venivano colpiti dalle particelle alfa, sono nuclei d'idrogeno.

is the heaviest of all known atoms. The alpha particles used by Rutherford in his experiments are helium nuclei spontaneously projected by radioactive bodies. Protons, on the other hand, are hydrogen nuclei and are emitted by bodies which are bombarded with alpha particles.

Based on what we have said so far, any attempt to transform one atom into another is impossible unless we act on the nucleus. It is further recognised that the only efficient way to do this is to bombard the nuclei with accelerated particles which have the energy needed to reach the nucleus and modify its structure. In Rutherford's classic experiments of 1919, when alpha particles (with an electric charge of 2) penetrated the nucleus, they increased its electric charge by two units. However, because this process was immediately followed by the emission of a proton (with an electric charge of 1), the net gain in electric charge of the original nucleus was only one unit. In other words, the bombarded element was transformed into another element whose atomic number was one higher than that of the first. In this way, it is possible to go from nitrogen (atomic number 7) to oxygen (atomic number 8).

After these first experiments of Rutherford's, other transmutations were conducted by bombarding elements using different kinds of particles. Noteworthy in this regard are the transmutations carried out with ionized hydrogen atoms accelerated in fields with very high potential differences, on the order of one million Volts: such experiments were performed by I.D. Cockroft and E.T. Walton at Cambridge and later by Lawrence, Livingstone and other scientists in America.

Almost until last year, it was generally believed that artificial decay obtained by the impact of high-speed particles on nuclei would always produce stable atoms. But then the French physi-

Da quanto si è detto risulta la impossibilità di ogni tentativo di trasformare un atomo in un altro se il tentativo stesso non si traduce in un'azione sul nucleo: e si è riconosciuto che l'unico mezzo efficace a tale scopo è quello di colpire i nuclei con un bombardamento di particelle molto veloci e provviste dell'energia necessaria per raggiungere il nucleo e modificarne la struttura.

Nelle classiche esperienze di Rutherford del 1919, particelle alfa (carica elettrica 2) penetrando nel nucleo, ne accrescevano la carica di due unità: ma siccome seguiva la immediata emissione di un protone (carica elettrica 1), la carica del nucleo primitivo veniva, in ultima analisi, ad accrescersi di una sola unità; cioè l'elemento bombardato si trasformava in un altro, con numero atomico maggiore di 1 rispetto al precedente. Così, dall'elemento azoto (numero atomico 7) è possibile passare all'elemento ossigeno (numero atomico 8).

Dopo queste prime esperienze di Rutherford, nuovi esempi di trasmutazioni sono stati raccolti bombardando gli elementi con varie altre particelle, e speciale rilievo meritano qui le trasmutazioni prodotte mediante atomi di idrogeno ionizzato, accelerate in campi con potenziali altissimi, dell'ordine del milione di volt, sperimentati da I.D. Cockroft e E.T. Walton a Cambridge, e poi da Lawrence, Livingstone ed altri scienziati in America.

Fin quasi all'anno scorso, si credeva generalmente che dalle disintegrazioni artificiali ottenute mediante l'urto di particelle veloci contro i nuclei, si ottenessero sempre atomi stabili. Ma ecco che i fisici francesi F. Joliot e la moglie Irene Curie, figlia della compianta Maria Curie cui si deve la scoperta del radio, annunciavano – e il risultato era davvero ragguardevolissimo – d'essere riusciti a produrre



Figura 2. S.E. Fermi, W. Heisenberg, W. Pauli, i tre giovanissimi fisici di fama mondiale, sul lago di Como nel 1927, in occasione delle onoranze alla memoria di Alessandro Volta.

Figure 2. The three young world famous physicists S.E. Fermi, W. Heisenberg and W. Pauli at Lake Como in 1927 during the tribute to the memory of Alessandro Volta.

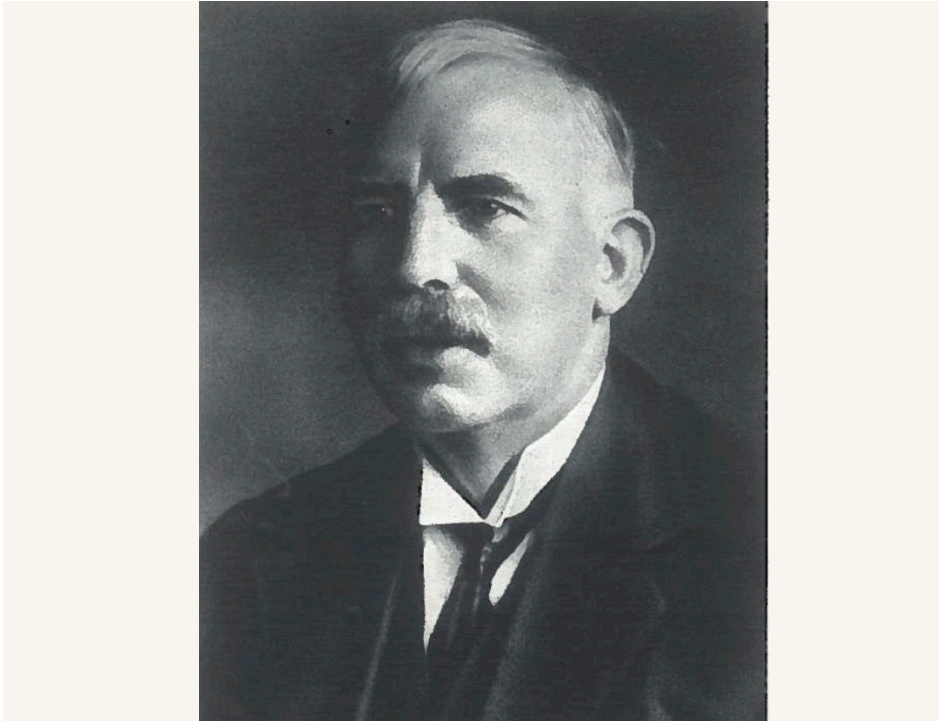


Figura 3. Lord Ernest Rutherford of Nelson.

Figure 3. Lord Ernest Rutherford of Nelson.

cists F. Joliot and his wife Irene Curie, daughter of the late Maria Curie to whom we owe the discovery of radium, made the most remarkable announcement that they had been able to produce three new isotopes which did not immediately attain a stable form. These isotopes spent on average several minutes in a labile state, analogous to that of natural radioactive substances. Later, with the emission of an electron, these elements would transform into normal stable elements.

The method adopted by the Joliotis to produce these radioactive bodies was the same one used in Rutherford's classic experiments, namely, bombardment with alpha particles. However, alpha particles cannot be considered a very effective means of obtaining artificial nuclear decay: because alpha particles and the nuclei are both positively charged, the former are strongly repelled by the latter. Both this and other causes place limits on the possibility of decay by means of alpha particles. In fact, their effectiveness is for the most part limited to cases involving very light elements, since electric repulsion of the nuclei of heavy elements is so great that it prevents their collision with the atomic nucleus. This limitation gave rise to the need to understand the effects of a neutral particle: the neutron.

The neutron is a particle of nuclear dimensions, with a mass roughly equivalent to that of the hydrogen atom but without electric charge. Although the useable sources of neutrons are far fewer than those of alpha particles or protons, it was hoped *a priori* that these disadvantages would be offset by the fact that neutrons are indeed electrically neutral. Experiments conducted in Rome to this end fully justified this approach, demonstrating that about two thirds of the sixty atoms tested by bombardment with neutrons gave rise to new radioactive bodies. This phenomenon occurs not

tre nuovi isotopi che non raggiungevano immediatamente una forma stabile; ma che si mantenevano per un tempo medio di qualche minuto in uno stato labile, analogo a quello delle sostanze radioattive naturali; emettendo poi un elettrone, questi elementi si trasformavano in comuni elementi stabili.

Il metodo seguito dai coniugi Joliot per la produzione di questi corpi radioattivi era il medesimo delle classiche esperienze di Rutherford: bombardamento cioè, con particelle alfa. Queste non possono tuttavia considerarsi come agenti molto efficaci per produrre la disintegrazione artificiale dei nuclei, pel fatto che essendo le particelle alfa cariche positivamente come i nuclei esse vengono da questi fortemente respinti. Questa ed altre cause limitano le possibilità di disintegrazione mediante le particelle alfa: anzi le circoscrivono praticamente ai casi di elementi molto leggeri, giacché la repulsione elettrica da parte dei nuclei di elementi pesanti assume tale valore da rendere impossibile la collisione del proiettile contro il nucleo atomico. Da ciò si comprende la opportunità di ricercare gli effetti di una particella neutra, cioè del neutrone che è un corpuscolo di dimensioni nucleari, con massa all'incirca equivalente a quella dell'atomo di idrogeno, ma privo di carica elettrica. Sebbene le sorgenti utilizzabili di neutroni siano di gran lunga meno ricche delle sorgenti di particelle alfa o di protoni, si poteva sperare *a priori* di trovare un compenso a questi elementi di svantaggio nel fatto che i neutroni sono appunto elettricamente neutri. Le esperienze all'uopo compiute a Roma hanno confermato appieno la legittimità di questo tentativo, dimostrando che all'incirca due terzi dei sessanta atomi cimentati al bombardamento di neutroni davano origine a nuovi corpi radioattivi. Il fenomeno si presenta non solo operando su

only with light elements, on which bombardment with charged particles is also effective, but with heavy elements as well. To be sure, uranium, the heaviest element known, also produces radioactive elements different from all other known radioactive bodies when subject to neutron bombardment.

In many cases, the radioactive element produced by neutron bombardment of a certain element is chemically different from the original one. Using methods of chemical analysis suitable to this type of separation, it is thus possible to distinguish the produced radioactive element from the original, thereby directly proving that the transmutation was successful. It has been shown, for example, that when iron is bombarded with neutrons it is transformed into the radioactive isotope manganese, that chloride becomes radioactive phosphorous and so on. A case of particular interest in this regard is uranium, in that some of the products into which it is transformed upon bombardment apparently have properties different from those of all known chemical elements. If these results are confirmed, it will also be found that the bombardment of uranium produces the formation of an element which is unstable and until now unknown, probably with the atomic number of 93, greater, that is, than that of all the known elements.

Earlier I noted that even though the transformation of elements was successful in many cases, the quantity of matter that we are able to transform using all known methods is extraordinarily small.

For this reason, any possibility of obtaining a useful production of rare elements is to be excluded until substantially new transformation processes are developed. The same naturally holds true for the possibility of utilizing the enormous quantities of energy contained within nuclei which are freed during some nuclear reactions.

elementi leggeri, sui quali è efficace anche il bombardamento con particelle cariche, ma anche lavorando su elementi pesanti. Invero anche l'uramio, l'elemento più pesante che si conosca, sottoposto al bombardamento di neutroni, dà luogo a prodotti radioattivi, diversi da tutti gli altri corpi radioattivi noti.

In molti casi, l'elemento radioattivo che si produce bombardando con neutroni un dato elemento è chimicamente diverso da quello originario e quindi è possibile, con metodi di analisi chimica adatti a questo tipo di separazione, discernere il corpo radioattivo dalla sostanza madre e con ciò provare direttamente la trasmutazione ottenuta. Si è così dimostrato, ad esempio, che bombardando il ferro con neutroni lo si trasforma in un isotopo radioattivo del manganese; che il cloro diventa fosforo radioattivo e così via. Un caso che presenta speciale interesse per tal riguardo è quello dell'uranio, giacché sembra che qualcheduno dei prodotti, nei quali esso si trasforma in conseguenza del bombardamento, abbia proprietà diverse da quelle di tutti gli elementi chimici conosciuti. Se questi risultati troveranno conferma sarà altresì provato che, per effetto del bombardamento dell'uranio, si forma un elemento instabile, finora ignorato, probabilmente con numero atomico 93, superiore cioè a quello di tutti gli elementi noti.

Osservavo dapprincipio come, pur essendosi ottenuta la trasformazione degli elementi in un gran numero di casi, la quantità di materia che si riesce a trasformare con tutti i metodi attuali sia tuttavia straordinariamente piccola.

Questo fatto esclude per ora ogni possibilità di ottenere una conveniente produzione di elementi rari, finché non si escogitino processi di trasformazione sostanzialmente nuovi. Naturalmente altrettanto deve dirsi circa le possibilità di

One application that may be concretely realized in the not too distant future consists in the production of artificial radioactive bodies for medical use. In this regard, one particular recent development may be of interest: as has been demonstrated by the Physics Institute of Rome, the intensity of production of radioactive bodies can under some circumstances increase a hundred-fold as long as the source of the neutrons and the irradiated substance are surrounded by great quantities of water. This is perhaps due to a slowing of the neutrons caused by their impact with the atoms of hydrogen contained in the water. In fact, it seems that slow neutrons have the property of easily bonding with some nuclei, thereby transforming them into new radioactive nuclei. Nevertheless, even with this method it is not possible to produce a quantity of radioactive bodies which would be sufficient for medical use. To achieve the necessary quantities, it would apparently be necessary to increase even further the intensity of the useable sources of neutrons.

In conclusion, even though the hopes for the practical application of the discoveries discussed in this article still face many difficulties, we can claim that many properties of the mysterious center of the atom have been unveiled. However, we are still in the dark with regard to many facts, and bringing them to light will require much work, which will serve to advance our understanding of the mysteries of the composition of matter.

Notes

¹ This article is taken from the journal *SAPERE*, Vol. 1, No. 2, 31 January 1935, Ulrico Hoepli, Editor.

utilizzazione delle enormi quantità di energie racchiuse nell'interno dei nuclei che si liberano in alcune reazioni nucleari.

Una applicazione che forse potrà in un tempo non lontanissimo entrare in una fase concreta potrebbe consistere nella produzione di corpi radioattivi artificiali per uso medico. Al riguardo può interessare la notizia che, come è stato provato nell'Istituto fisico di Roma, la intensità di produzione dei corpi radioattivi può in determinate circostanze arrivare a centuplicarsi solo se la sorgente dei neutroni e la sostanza irradiata vengano circondate da una grande massa d'acqua. Ciò è forse dovuto ad un rallentamento dei neutroni provocato dal loro urto cogli atomi d'idrogeno contenuto nell'acqua; sembra infatti che i neutroni lenti abbiano la proprietà di legarsi facilmente a qualche nucleo e quindi di trasformarlo in un nuovo nucleo radioattivo. Tuttavia, neppure così è possibile produrre dei corpi radioattivi in quantità sufficiente alle applicazioni mediche: per questo parrebbe necessario poter accrescere ancora l'intensità delle sorgenti neutroniche utilizzabili.

In conclusione, sebbene la speranza d'applicare industrialmente i risultati su riferiti presenti oggi ancora molte difficoltà, possiamo affermare che molte proprietà del misterioso centro dell'atomo sono oramai venute in luce ma che molti fatti sono ancora oscuri e che occorrerà lavorare ancora parecchio prima di poterli chiarire, spingendo così più avanti la nostra comprensione dei misteri della costituzione della materia.

Note

¹ Questo articolo è tratto dalla rivista SAPERE, vol. 1, N. 2, del 31 gennaio 1935, editore Ulrico Hoepli.



Figura 4. F. Joliot e Irène Curie all'Istituto del Radium di Parigi. [Fot. New York Times].

Figure 4. F. Joliot and Irène Curie at the Institute of Radium in Paris. [Photo: New York Times].