

## Über die künstliche Herstellung der Radioelemente.

Nobelvorträge<sup>1)</sup>

von Prof. Dr. IRENE JOLIOT-CURIE und Prof. Dr. FRÉDÉRIC JOLIOT,  
Institut du Radium, Paris.

(Eingeg. 20. März 1936.)

I.<sup>2)</sup>

Es ist eine große Ehre und eine große Freude für uns, daß die Schwedische Akademie der Wissenschaften uns den Nobelpreis für unsere Arbeiten über die künstliche Herstellung der Radioelemente zuerteilt, nachdem sie ihn 1903 *Pierre* und *Marie Curie*, und 1911 *Marie Curie* für die Entdeckung der Radioelemente verliehen hat.

Ich möchte hier an die außergewöhnliche Entwicklung der Radioaktivität erinnern, dieser neuen Wissenschaft, die vor weniger als 40 Jahren ihren Ursprung in den Arbeiten von *Henri Becquerel* und *Pierre und Marie Curie* hatte.

Bekanntlich ist durch die Arbeiten der Chemiker des letzten Jahrhunderts als grundlegende Tatsache die außerordentliche Festigkeit des Atomgefüges der zweidneunzig bekannten chemischen Elemente festgestellt worden. Mit der Entdeckung der Radioelemente standen die Physiker zum erstenmal merkwürdigen Substanzen gegenüber, winzigen Generatoren von Strahlungen ungeheurer Energiedichte: die  $\alpha$ -Strahlen, positiv geladene Heliumatome, die  $\beta$ -Strahlen, negativ geladene Elektronen, beide mit einer kinetischen Energie ausgestattet, die ihnen mit menschlichen Mitteln unmöglich übertragen werden könnte; endlich die  $\gamma$ -Strahlen, ähnlich den sehr durchdringenden Röntgenstrahlen. Die Chemiker erlebten keine geringere Überraschung, als sie in den radioaktiven Körpern Elemente erkannten, die Änderungen des Atombaus erleiden, den man unwandelbar glaubte.

Jede Aussendung eines  $\alpha$ -Strahls oder eines  $\beta$ -Strahls ist begleitet von der Umwandlung eines Atoms; die diesen Strahlen mitgeteilte Energie stammt aus dem Atominnern. Solange die Radioelemente nicht zerfallen sind, besitzen sie wie die gewöhnlichen Elemente wohldefinierte chemische Eigenschaften. Diese instabilen Atome zerfallen von selbst, die einen sehr schnell, die andern sehr langsam, aber nach unwandelbaren Gesetzmäßigkeiten, die man niemals hat beeinflussen können. Die für den Zerfall der Hälfte der Atome notwendige Zeit, die Halbwertszeit, ist eine charakteristische Konstante jedes Radioelements: je nach dem Körper bewegen sich die Werte der Halbwertszeiten zwischen einem Bruchteil einer Sekunde und Millionen von Jahren.

Die Entdeckung der Radioelemente hat ungeheure Folgen für die Kenntnis der Struktur der Materie gehabt; das Studium dieser Körper selbst sowie der starken Wirkungen, welche die von ihnen ausgesandten Strahlen in den Atomen hervorbringen, beschäftigt die Forscher mehrerer großer Forschungsinstitute in allen Ländern.

Jedoch blieb die Radioaktivität eine Eigenschaft, die ausschließlich an etwa dreißig in der Natur vorkommende Körper gebunden war. Die künstliche Erzeugung von Radioelementen eröffnet der Wissenschaft der Radioaktivität ein neues Gebiet und stellt somit die Fortsetzung des Werkes von *Pierre und Marie Curie* dar.

<sup>1)</sup> Das liebenswürdige Entgegenkommen der Autoren und des Nobelkomitees für Chemie, Stockholm, haben es uns ermöglicht, den Nobelpreis, der erst später in den Veröffentlichungen des Nobelkomitees herauskommen wird, schon jetzt zu bringen. — Aus dem Französischen übersetzt von Dr. O. Erbacher, Berlin.

<sup>2)</sup> Vorgetragen von Frau Joliot-Curie.

Nach der Entdeckung der freiwilligen Umwandlungen der Radioelemente verdanken wir *Lord Rutherford* die Verwirklichung der ersten künstlichen Umwandlungen. Vor etwa 15 Jahren hat *Lord Rutherford* leichte Atome, wie Stickstoff und Aluminium, mit  $\alpha$ -Strahlen beschossen und die Abspaltung von Protonen oder positiv geladenen Wasserstoffkernen nachgewiesen; dieser Wasserstoff rührte von den beschossenen Atomen selbst her: er war das Produkt einer Umwandlung. Man konnte die Art der Kernumwandlung mit Sicherheit feststellen: das Aluminiumatom z. B. fängt das  $\alpha$ -Teilchen ein und wandelt sich nach Ausstoßung eines Protons in ein Siliciumatom um. Die Menge der umgewandelten Materie ist unwägbar, und einzig das Studium der Strahlungen hat zu diesen Schlußfolgerungen geführt.

Im Laufe der letzten Jahre wurden künstliche Umwandlungen verschiedener Art entdeckt; die einen werden durch die  $\alpha$ -Strahlen hervorgerufen, die anderen durch die Protonen oder die Deuteronen, Wasserstoffkerne mit der Masse 1 oder der Masse 2; wieder andere durch die Neutronen, die neutralen Teilchen mit der Masse 1, von denen eben Prof. *Chadwick*<sup>3)</sup> gesprochen hat. Die bei der Explosion des Atoms ausgestoßenen Teilchen sind Protonen,  $\alpha$ -Strahlen oder Neutronen.

Diese Umwandlungen stellen wirkliche chemische Reaktionen dar, die die Innenstruktur des Atoms, den Kern, betreffen. Man kann sie durch einfache Formeln ausdrücken, wie es Herr *Joliot* Ihnen sogleich zeigen wird.

Ich möchte jetzt zu Ihnen über die Versuche sprechen, die uns dazu geführt haben, **neue radioaktive Elemente durch Umwandlung** zu erhalten. Diese Versuche wurden gemeinsam von Herrn *Joliot* und mir durchgeführt, und die Art, in der wir uns in diesen Vortrag geteilt haben, ist allein durch die Zweckmäßigkeit der Darstellung bedingt.

Beim Studium der Umwandlungen, die in den leichten Elementen durch Bestrahlung mit  $\alpha$ -Strahlen hervorgerufen werden und unter Aussendung von Neutronen vor sich gehen, stießen wir auf gewisse Schwierigkeiten bei der Erklärung für die Aussendung von Neutronen beim Fluor, beim Natrium und beim Aluminium. Aluminium kann sich durch Einfangen eines  $\alpha$ -Teilchens und Abspaltung eines Protons in stabiles Silicium verwandeln. Wird dagegen ein Neutron abgespalten, so ist das Reaktionsprodukt kein bekanntes Atom.

Weiter beobachteten wir, daß Aluminium und Bor bei der Bestrahlung mit  $\alpha$ -Strahlen nicht nur Protonen und Neutronen aussenden, sondern auch positive Elektronen. Wir nahmen daher damals an, daß an die Stelle eines emittierten Protons die gleichzeitige Aussendung eines Neutrons und eines positiven Elektrons treten kann; das zurückbleibende Atom mußte in beiden Fällen dasselbe sein.

Anfang 1934 kamen wir beim Studium der Bedingungen der Aussendung dieser positiven Elektronen darauf, daß zwischen dieser Umwandlung und allen solchen bis dahin beobachteten ein grundsätzlicher Unterschied besteht; alle künstlich hervorgerufenen Reaktionen der Kernchemie waren Augenblicksvorgänge, Expl-

<sup>3)</sup> Anm. der Redaktion: Vgl. hierzu diese Ztschr. 45, 499 [1934].

sionen. Im Gegensatz hierzu werden die bei Einwirkung einer  $\alpha$ -Strahlenquelle von Aluminium ausgesandten positiven Elektronen noch einige Zeit nach Wegnahme der Quelle weiterhin ausgesandt; ihre Zahl nimmt in 3 min um die Hälfte ab.

Es handelt sich also hier um eine wirkliche Radioaktivität, die sich durch Aussendung positiver Elektronen offenbart.

Wir haben gezeigt, daß man beim Bor oder beim Magnesium durch Beschießen mit  $\alpha$ -Strahlen in gleicher Weise eine Radioaktivität unter Aussendung positiver oder negativer Elektronen erzielen kann. Diese künstlichen Radioelemente verhalten sich in jeder Beziehung wie die natürlichen.

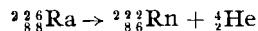
Unsere Ansicht über die Umwandlung des Aluminiumkerns in einen Siliciumkern ist also folgende: es gibt zwei zeitlich verschieden verlaufende Prozesse; zuerst erfolgt Einfangen des  $\alpha$ -Teilchens und augenblickliche Aussendung des Neutrons unter Bildung eines radioaktiven Atoms, das ein Isotop des Phosphors mit der Masse 30 ist, während das stabile Phosphoratom die Masse 31 besitzt. Dann zerfällt dieses instabile Atom, das neue Radioelement, das wir „Radiophosphor“ genannt haben, nach einem Exponentialgesetz mit einer Halbwertszeit von 3 min.

In ähnlicher Weise deuteten wir die Bildung radioaktiver Elemente beim Bor und Magnesium; im ersten Fall erfolgt Bildung eines instabilen Stickstoffs mit einer Halbwertszeit von 11 min, im zweiten Fall Bildung instabiler Isotope des Siliciums und Aluminiums.

#### II.4)

Nachdem die Deutung der ersten Ergebnisse durch Schlüsse rein physikalischer Art erhalten war, haben wir uns gesagt, daß es mit Hilfe der radiochemischen Methoden möglich sein müßte, unsere Hypothesen zu stützen und so einen chemischen Beweis von der Wirklichkeit der hervorgerufenen Umwandlungen zu geben.

Die ersten sicheren Beweise für die Umwandlung von Elementen in chemisch verschiedene sind durch das Studium der radioaktiven Erscheinungen geliefert worden. Daß sich Radium von selbst in ein aktives Gas, das Radon, umwandelt und dabei  $\alpha$ -Teilchen (Heliumkerne) aussendet, steht zweifellos fest. Mit Sicherheit können wir die entsprechende Kernreaktion schreiben:



denn die an dieser Reaktion beteiligten verschiedenen Radioelemente können in so hinreichender Menge zur Verfügung stehen, daß man mit Erfolg an die chemische und spektroskopische Identifizierung herantreten konnte.

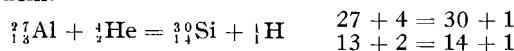
Die Folge der radioaktiven Umwandlungen liefert aber zahlreiche Beispiele, wo die Mengen der Radioelemente äußerst gering und unwägbar sind; trotzdem kann man mit den Methoden der Radiochemie ihre chemischen Eigenschaften genau studieren und einige von ihnen als Isotope von aktiven oder inaktiven Elementen identifizieren, die in großer Menge zur Verfügung stehen.

Diese eigenartige Chemie, in der man mitunter Mengen von der Größenordnung  $10^{-16}$  g verarbeitet, ist dadurch möglich gemacht, daß man durch die Messung der ausgesandten Strahlung die kleinsten in anderen Substanzen verstreuten Spuren radioaktiver Substanz quantitativ bestimmen und verfolgen kann. Während wir bei den meisten freiwilligen Umwandlungen die entsprechende Kernreaktion mit Sicherheit schreiben können, verhält es sich bei den erzwungenen Umwandlungen anders.

Die Ausbeuten dieser Umwandlungen sind sehr gering, und die Elementmengen, die mit den stärksten zurzeit

herstellbaren Strahlenquellen gebildet werden, sind geringer als  $10^{-16}$  g, entsprechend höchstens einigen Millionen Atomen. Man kann indessen mit ziemlich großer Wahrscheinlichkeit die Natur der gebildeten Atome folgern, wenn man bei der Aufstellung der entsprechenden Kernreaktion von der Annahme ausgeht, daß die Summe der Massenzahlen, genauer der Energien, und der Kernladungszahlen zwischen den reagierenden und den gebildeten Elementen erhalten bleibt.

Der Aluminiumkern muß sich also bei Aufnahme eines Heliumkerns, wenn ein Proton emittiert wird, in Silicium umwandeln.



Daß das entstehende Atom Silicium ist, ist sehr wahrscheinlich; da es aber in winzig kleiner Menge vorliegt, ist es nicht möglich, es chemisch zu identifizieren. Wenn dagegen das entstandene Atom radioaktiv ist, wie es z. B. bei Aufnahme eines  $\alpha$ -Teilchens durch das Aluminiumatom und bei Aussendung eines Neutrons nach der Reaktion:



der Fall ist, so ist es uns durch Verwendung der radiochemischen Methoden möglich, festzustellen, daß das entstandene Atom wirklich die chemischen Eigenschaften des Phosphors besitzt.

Eine dünne Aluminiumfolie wird nach vorausgehender Bestrahlung mit  $\alpha$ -Strahlen in einer Lösung von Salzsäure aufgelöst. Die chemische Reaktion erzeugt Wasserstoff, der das radioaktive Element mitreißt, so daß man es in einer dünnwandigen Röhre unter einer Glocke mit Wasser auffangen kann. Dieses Verfahren zeigt mit Sicherheit, daß ein vom Aluminium verschiedenes chemisches Element gebildet worden ist, da man es ja von dem Ausgangsmaterial abtrennen und demzufolge einen unwiderlegbaren Beweis für die hervorgerufenen Umwandlungen liefern kann; in genau der gleichen Weise würde gewöhnlicher Phosphor vom Aluminium abgetrennt werden.

Schließlich kann das aktivierte Aluminium in einer oxydierenden Säure gelöst werden. Zu dieser Lösung fügt man eine kleine Menge eines Phosphats und eines Zirkonsalzes und stellt fest, daß das Zirkonphosphat das radioaktive Element mitreißt. Die Versuchsergebnisse stimmen mit den Vermutungen über die chemische Natur der gebildeten Radioelemente überein. Im Falle des Aluminiums sind die Versuche schwierig, denn sie müssen in etwa 6 min durchgeführt werden, weil die mittlere Lebensdauer der gebildeten radioaktiven Atome kleiner ist als 5 min. Das im Fall des Bors unter der Einwirkung der  $\alpha$ -Strahlen gebildete radioaktive Element ist, wie entsprechende Versuche gezeigt haben, ein Isotop des Stickstoffs.

Wir haben vorgeschlagen, diese neuen Radioelemente — Isotope von bekannten Elementen, die es in der Natur nicht gibt — Radiostickstoff, Radiophosphor und Radioaluminium (im Falle des mit  $\alpha$ -Strahlen bestrahlten Magnesiums) zu nennen und sie durch die Symbole  $\text{RN}^{13}$ ,  $\text{RP}^{30}$  und  $\text{RAI}^{28}$  zu bezeichnen.

Gleich nach diesen ersten Untersuchungen haben wir von der Möglichkeit gesprochen, daß die gleiche Erscheinung bei Umwandlungsvorgängen auftreten könnte, die durch den Zusammenstoß mit anderen Teilchen als  $\alpha$ -Strahlen hervorgerufen werden; z. B. durch Protonen, Deuteronen und Neutronen.

Diese Versuche wurden in mehreren Ländern in Angriff genommen und entwickelt. In England und in den Vereinigten Staaten, wo die Physiker über starke Hochspannungsanlagen verfügen, wurden verschiedene neue Elemente

<sup>4)</sup> Vorgetragen von Herrn Joliot.

durch Beschießen mit Protonen und Deuteronen hergestellt. Auf diese Weise wurde ein interessantes Element, das Radionatrium  $RNa^{24}$ , gewonnen. Dieses Radioelement sendet  $\beta$ -Strahlen aus und besitzt eine Halbwertszeit von 15 h.

Zuerst in Italien und dann in anderen Ländern benutzten die Forscher, vor allem *Fermi* und seine Mitarbeiter, Neutronen, besonders günstige Geschosse, um die Umwandlungen hervorzurufen. Eine große Anzahl neuer Elemente wurde so erzeugt, darunter der Radiophosphor  $RP^{32}$  und das Radiohafnium mit Halbwertszeiten von 17,5 Tagen bzw. einigen Monaten. Man kann jetzt die Synthese, oft nach mehreren Verfahren (das Radioaluminium  $RAI^{28}$  kann durch Umwandlungen 5 verschiedener Arten gebildet werden), von mehr als fünfzig neuen Radioelementen durchführen; diese Zahl übertrifft bereits die der natürlichen Radioelemente, die man in der Erdrinde findet. Es war sicher eine große Genugtuung für unsere betrauerte Meisterin *Marie Curie*, zu erleben, wie sich auf diese Weise die Liste der Radioelemente vergrößerte, die sie gemeinsam mit *Pierre Curie* so ruhmvoll eröffnet hat.

Die Mannigfaltigkeit der chemischen Stoffe über das ganze System von *Mendelejeff* hin und die Verschiedenheit der mittleren Lebensdauern dieser künstlichen Radioelemente erlauben sicherlich neue Untersuchungen in der Biologie und in der physikalischen Chemie. Jedoch muß man zur erfolgreichen Durchführung dieser Arbeiten über verhältnismäßig beträchtliche Mengen dieser Radioelemente verfügen können. Durch Anwendung künstlich beschleunigter Geschosse wird man dieses Ziel erreichen. Entsprechende Vorrichtungen gibt es bereits in mehreren Ländern. In Frankreich haben wir zwei Anlagen errichtet, mit deren Hilfe wir kürzlich Radioelemente in hundertfach größerer Menge erhalten konnten als in unseren ersten Versuchen. Dieser Ertrag wird in naher Zukunft noch weit übertroffen werden. Die Methode der radioaktiven Indicatoren, die bis jetzt auf die Elemente mit hoher Atommasse beschränkt war, kann auf zahlreiche andere ausgedehnt werden, die im ganzen Bereich des Periodischen Systems liegen. In der Biologie z. B. wird man mit Hilfe der Indicatorenmethode bei Verwendung der künstlichen Radioelemente das Problem der Lokalisierung und der Ausscheidung verschiedener in den lebenden Organismus eingeführter Elemente leichter studieren können. In diesem Fall dient die Radioaktivität lediglich zur Bestimmung der Anwesenheit eines Elements an dieser oder jener Stelle des Organismus. Große Mengen des radioaktiven Indicators hierfür anzuwenden, wäre nicht vorteilhaft; die

Mengen sind gegeben durch die Empfindlichkeit des Meßgerätes und die Größe des pflanzlichen oder tierischen Organismus. An den Stellen aber, an denen die Radioelemente niedergeschlagen werden und die man so besser wird kennen lernen können, wird die von ihnen ausgesandte Strahlung auf die benachbarten Zellen einwirken. Für diese zweite Anwendungsart, die wahrscheinlich in der Medizin für die Behandlung gewisser Krankheiten in Frage kommen wird, muß man die Radioelemente in stärkeren Mengen anwenden als für das Studium nach der Indicatormethode.

Aus alledem sehen wir, daß die einzigen Hundert verschiedenen Atomarten, die unseren Planeten ausmachen, nicht ein für allemal und für ewige Zeiten geschaffen sind. Wir nehmen sie wahr, weil sie noch vorhanden sind. Andere, weniger stabile, sind verschwunden. Von diesen werden wahrscheinlich einige in den Laboratorien wieder erzeugt. Bis jetzt konnten nur Elemente von verhältnismäßig kurzer Lebensdauer, vom Bruchteil einer Sekunde bis zu einigen Monaten, erhalten werden. Um eine nennenswerte Menge eines Elements von viel längerer Lebensdauer zu bilden, müßte man über eine sehr starke Strahlungsquelle verfügen können. Besteht wohl Aussicht auf Verwirklichung dieses neuen Traumes?

Wenn wir uns der Vergangenheit zuwenden und einen Blick auf die durch die Wissenschaft in stets steigendem Tempo erzielten Fortschritte werfen, haben wir wohl das Recht zu der Annahme, daß die Forscher, die nach Belieben Elemente aufbauen oder zertrümmern, lernen werden, auch Umwandlungen explosiven Charakters zu verwirklichen, eine echte chemische Kettenreaktion, eine Umwandlung, die mehrere andere nach sich zieht.

Wenn es dahin kommt, daß solche Reaktionen sich in der Materie fortpflanzen, kann man sich vorstellen, wie gewaltig die frei werdende nutzbare Energie sein wird. Greifen sie aber auf alle Elemente unseres Planeten über, so müssen wir mit Besorgnis auf die Folgen der Auslösung einer derartigen Katastrophe im voraus Bedacht nehmen. Die Astronomen beobachten mitunter, daß ein Stern von mittlerer Leuchtkraft plötzlich an Größe zunimmt; ein mit bloßem Auge nicht sichtbarer Stern kann stark leuchtend und ohne Instrument sichtbar werden, das ist das Auftreten einer Nova. Ein solches plötzliches Aufleuchten des Sternes ist vielleicht hervorgerufen durch solche Transmutationen explosiven Charakters, wie unsere schweifende Einbildungskraft sie erschaut, ein Vorgang, den die Forscher wahrscheinlich zu verwirklichen versuchen werden, wobei sie, wie wir hoffen, die nötigen Vorsichtsmaßregeln ergreifen werden. [A. 37/38.]

## Zur Kenntnis des Schellacks. VIII.<sup>1)</sup> Über Schellackfilme.

Von Dr. W. NAGEL und E. BAUMANN.

Organisches Laboratorium der Abteilung für Elektrochemie, Siemens & Halske, Berlin.

(Eingeg. 7. Mai 1936.)

In einer früheren Veröffentlichung<sup>2)</sup> über Schellackfilme wurde auf die merkwürdige Biegefestigkeit nach leichter Erwärmung hingewiesen und die Vermutung ausgesprochen, daß diese durch geringe Spuren Alkohol, die in dem Film verblieben seien, bedingt würde. Es gelang damals aber nicht, den Nachweis für diese Vernutzung zu erbringen, da es sich um Alkoholmengen handelte, die gewichtsmäßig nicht erfassbar waren. Der Alkohol wurde langsam abgegeben, denn die Biegefestigkeit der Filme sank, jedoch spielte sich dieser Vorgang in sehr langen Zeiträumen ab. Durch Erwärmung der Schellackfilme konnte er zwar beschleunigt werden, jedoch härtet sich bei er-

höhter Temperatur der Schellack schnell, d. h., er spaltet Wasser ab, und die ermittelte Gewichtsdifferenz ist also nicht dem allmählich verdampfenden Alkohol zuzuschreiben, sondern dem sich abspaltenden Wasser. In letzter Zeit gelang es nun, trotzdem das Festhalten von Alkohol nachzuweisen durch Bestimmung der Äthoxylzahl in Schellackfilmen nach der Methode von *Zeisel*.

Wachsfreier Schellack des Handels, der also nicht mit Alkohol in Berührung gekommen ist, hat keine Äthoxylzahl, während Filme, die durch Verdunsten einer alkoholischen Lösung aus demselben Schellack hergestellt sind und etwa drei Wochen bei gewöhnlicher Temperatur im freien Raum gestanden haben, eine solche von etwa 3,0 (% Äthoxyl) besitzen. Der Träger dieses Alkohols ist

<sup>1)</sup> VII: Wiss. Veröff. Siemens-Konz. 1932. S. 99.

<sup>2)</sup> Siemens-Z. 7, 107 [1927].