

Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft

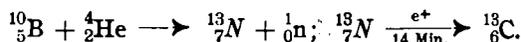
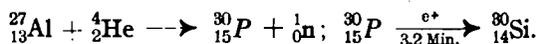
1936, Nr. 12/13. — Abteilung A (Vereinsnachrichten) —

2. Dezember.

Otto Hahn: Künstliche Radio-Elemente durch Neutronen-Bestrahlung; Elemente jenseits Uran.

[Zusammenfassender Vortrag, gehalten auf der auswärtigen Tagung der Deutschen Chemischen Gesellschaft am 20. September 1936 anlässlich der 94. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte in Dresden; eingegangen am 28. Oktober 1936.]

Die erste Herstellung künstlicher radioaktiver Atomarten geschah durch das Ehepaar Curie-Joliot im Jahre 1934. Diese Forscher beobachteten bei der Bestrahlung des Aluminiums mit α -Strahlen eine Emission positiver Elektronen, die auch nach Entfernung des α -strahlenden Präparats noch eine Zeitlang weiterging. Die genauere Untersuchung ergab eine Abnahme der Strahlenintensität nach einem Exponentialgesetz, die Halbwertszeit der zerfallenden Substanz betrug etwas mehr als 3 Min. Entsprechende Beobachtungen wie beim Aluminium machten Curie und Joliot beim Bor. Die Vorgänge verlaufen nach folgenden Reaktionsgleichungen¹⁾.



Curie und Joliot konnten auch durch chemische Methoden im ersteren Falle den radioaktiven Phosphor, in letzterem den radioaktiven Stickstoff von dem bestrahlten Ausgangspräparat abtrennen und damit den Reaktionsmechanismus sicherstellen.

In schneller Folge wurden nun von den verschiedensten Seiten weitere derartige Prozesse aufgefunden, auch solche, bei denen das künstliche Radioelement keine positiven, sondern negative Elektronen, also β -Strahlen ausendet, sich also in ein Element höherer Ordnungszahl umwandelt.

Aber diese als Curie-Joliot-Prozesse bezeichneten Umwandlungsvorgänge, bei denen primär ein Heliumkern eingefangen und ein Neutron abgespalten wird, gehen nur mit leichteren Elementen, also solchen, bei denen das α -Teilchen abstoßende positive Kernfeld nicht zu groß ist. Die schwersten Elemente, bei denen noch solche Umwandlungen sicher nachgewiesen wurden, sind das Kalium und Calcium.

¹⁾ Die künstlichen aktiven Atomarten sind kursiv gedruckt.

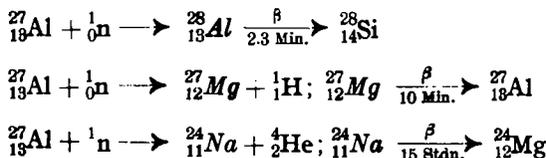
Außer durch die positiv geladenen Heliumkerne natürlicher radioaktiver Substanzen wurden künstliche radioaktive Elemente auch durch künstlich gewonnene positive Strahlen, nämlich schnell bewegte Protonen und Deuteronen, also Wasserstoffkerne der Masse eins und zwei, gewonnen. Aber auch hier gelingt das Einfangen der geladenen Teilchen nur bei den leichteren Elementen; die abstoßenden Coulombschen Kräfte der schweren Kerne verhindern ein Eindringen der positiv geladenen Strahlenteilchen.

Es ist das große Verdienst des italienischen Physikers Fermi und seiner Mitarbeiter, an Stelle geladener Teilchen die ungeladenen Neutronen für Kernreaktionen herangezogen zu haben; und mit Hilfe dieser Neutronen gelang es den italienischen und anderen Forschern in kurzer Zeit, radioaktive Atomarten fast aller chemischen Elemente bis hinauf zum Uran zu gewinnen.

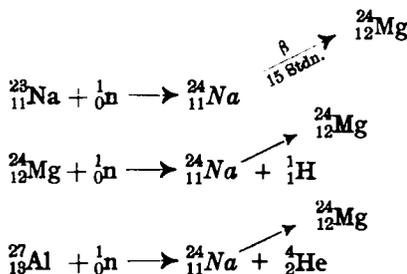
Die von Chadwick im Jahre 1932 als solche erkannten Neutronen sind Atomkerne mit der Masse 1 und der Kernladung Null; im Gegensatz zum natürlichen Wasserstoffatom haben sie also kein Hüllenelektron, im Gegensatz zum Wasserstoffkern haben sie keine Kernladung. Verwendet man also Neutronen zum Beschießen von Atomkernen, so fallen für sie die abstoßenden Kernkräfte fort und die Neutronen können auch in die schwersten Atomkerne eindringen.

Die für die Herstellung künstlicher Radioelemente im Laboratorium geeignetste Neutronenquelle ist ein in ein Glasröhrchen eingeschmolzenes Gemisch einer stark α -strahlenden Substanz, Emanation oder Radium, mit feingepulvertem Beryllium. Die Neutronen entstehen nach der Reaktion ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$; sie gehen praktisch ungehindert durch das Glas hindurch und können dann außerhalb des Glases Verwendung finden.

Die durch Neutronen auslösbaren Kernreaktionen sind dreierlei Art. Entweder wird das Neutron an den getroffenen Kern angelagert ohne gleichzeitige Abspaltung eines geladenen Teilchens, oder es wird ein Proton oder es wird ein α -Strahl emittiert. Die dabei auftretenden Reaktionen sind aus den beiden nächsten Abbildungen zu erkennen.



Schema 1.



Schema 2.

In Schema 1 entstehen aus einem und demselben Element (Al) drei verschiedene Elemente. In Schema 2 entsteht aus drei verschiedenen Elementen ein und dasselbe Element (Mg). Alle die auf der rechten Seite der Gleichungen stehenden Atome sind instabil und wandeln sich unter Ausstrahlung negativer Elektronen, also β -Strahlen, in das stabile, nächst höhere Element um.

Die Wahrscheinlichkeit für den einen oder anderen Reaktionsverlauf hängt einerseits von der Geschwindigkeit der verwendeten Neutronen, andererseits von dem bestrahlten Element ab. Die Prozesse 2 und 3 treten nur mit schnellen, also energiereichen Neutronen und bei relativ leichten Elementen ein, denn die abgespaltenen Korpuskularstrahlen können sonst nicht das Kernfeld ihres Mutteratoms verlassen. Der Prozeß 1, die direkte Anlagerung des Neutrons an den Kern geht bei leichteren Elementen nur mit verlangsamten Neutronen, bei schwereren wird er durch langsame Neutronen erheblich verstärkt. Die langsamen Neutronen bleiben, wenn man so sagen will, leichter an dem Kern hängen als die mit großer kinetischer Energie vorbeifliegenden Teilchen.

Ein einfaches Mittel, die Neutronen zu verlangsamen, verdanken wir ebenfalls schon Fermi und seinen Mitarbeitern. Die Verlangsamung wird dadurch erzielt, daß man die Neutronen durch wasserstoffhaltige Substanzen, wie Paraffin oder Wasser hindurchgehen läßt. Da das Neutron praktisch die gleiche Masse hat wie der Wasserstoffkern, gibt es beim Zusammenstoß mit Wasserstoffkernen erhebliche Teile seiner Energie an den Wasserstoff ab und wird dabei langsamer.

Die Halbwertszeiten der zahlreichen bisher gefundenen künstlichen Radioelemente sind zwar im allgemeinen recht klein, so daß sie kurz nach ihrer Herstellung schon wieder zerfallen sind. Es sind aber immerhin schon jetzt eine Anzahl gefunden worden, deren Halbwertszeit mehrere Tage und Wochen, ja auch Monate beträgt; und gerade von den stabileren werden sicher noch mehr gefunden werden. Bisher sind allerdings die Mengen, um die es sich bei diesen künstlichen radioaktiven Atomarten handelt, für den Begriffskreis des Chemikers fast unvorstellbar klein. Nur in besonders günstigen Fällen gelingt ihr Nachweis in den gewöhnlichen Elektroskopen, meist muß man sich Methoden bedienen, bei denen die einzelnen Strahlenteilchen in Zählrohren oder Wilsonsche Nebelkammern registriert werden. Aber sicher wird die Zeit kommen, wo man viele künstliche Radio-Elemente in Intensitäten gewinnen kann, die auch dem normalen Chemiker ein Arbeiten mit ihnen erlauben.

Nun wird man vielleicht fragen, worin liegt denn die praktische Bedeutung dieser instabilen radioaktiven Substanzen, welche Bereicherung unserer Kenntnisse können wir von ihnen erwarten? Ich sehe dabei ganz ab von ihrer großen Bedeutung für die physikalische Atomforschung. Für die Chemie liegt die Bedeutung in der außerordentlich vergrößerten Empfindlichkeit des Nachweises chemischer Elemente.

Die Grenzen mikrochemischer Empfindlichkeit liegen etwa bei Zehnteln oder Hundertmillionteln Grammen. 10^{-8} g Blei z. B. sind aber immer noch 30 Billionen Atome. Mit radioaktivem Blei gelingt aber mit Leichtigkeit der Blei-Nachweis noch mit $1/10,000$ oder weniger dieser Menge; und mit den physikalischen Zählmethoden gelingt der Nachweis bis zu den einzelnen Atomen herunter. Nehmen wir an, wir können die künstlichen radioaktiven Elemente

in praktisch gewichtsloser Menge isolieren, dann können wir sie mit ihren inaktiven Isotopen in beliebigem Verhältnis mischen; die Strahlung des aktiven Isotops dient dann als Indicator zum Nachweis des Elements. In dieser zuerst von Hevesy und Paneth eingeführten Indicatorenmethode der natürlichen Radio-Elemente liegt ja schon ein großes Material darüber vor, was sich mit diesen Methoden in der analytischen, der präparativen Chemie, der Geochemie und der physikalischen Chemie machen läßt. Dabei waren die bisher für solche Untersuchungen im wesentlichen zugänglichen Elemente, vor allem das Blei und das Wismut, daneben noch das Thorium, das Radium und das Thallium, nicht gerade die für die Chemie wichtigsten Grundstoffe. Heute kennen wir Radio-Natrium und -Kalium, Radio-Stickstoff-Phosphor-Arsen, Radio-Chlor-Brom-Jod, Radio-Silber, Radio-Gold und noch viele mehr. Mit ihnen ist ein Arbeiten schon möglich, oder es wird möglich sein, wenn stärkere, vermutlich künstliche Neutronenquellen verfügbar sind.

Einen besonderen Nutzen wird auch die Biologie und die Heilkunde von den künstlichen Radio-Elementen haben. Versuche über den Kreislauf lebenswichtiger Elemente wie Natrium, Phosphor, Calcium im pflanzlichen und tierischen Organismus oder über die Ablagerung fremder, u. U. medizinisch wirksamer Schwermetalle in gesundem und krankem Gewebe lassen sich durchführen und sind schon teilweise durchgeführt worden.

Erwähnen möchte ich hier aus dem Gebiet der analytischen Chemie eine aus besonderen Gründen vorgenommene Untersuchung der HHrn. Dr. Erbacher und Dr. Philipp aus unserem Institut mit einem Gold-Platin-Iridium-Gemisch. Durch zugegebenes radioaktives Gold als Indicator für die Verteilung des Goldes in den einzelnen Niederschlägen wurde festgestellt, daß die bisherigen in der Literatur angegebenen Trennungsmethoden nicht genau sind.

Im Gegensatz zum Radio-Gold, das eine Halbwertszeit von etwa 65 Stdn. hat, sind die Halbwertszeiten der beiden radioaktiven Silber-Isotopen nur 22 Sek. und 2.3 Min. Bei einer nur wenige Minuten dauernden Bestrahlung eines Silberbleches mit verlangsamt Neutronen erhält man deshalb schon die Hauptmenge des mit der angewandten Neutronenquelle überhaupt gewinnbaren Radio-Silbers. Beim Radio-Gold mit seiner großen Halbwertszeit bekommt man nach ein paar Minuten noch fast nichts. In einer Gold-Silber-Legierung erhält man deshalb bei kurzer Bestrahlung praktisch nur die schnell abnehmende Silber-Aktivität, bei langer Bestrahlung die Aktivität von Ag und Au, welche letztere sich noch tagelang nachweisen läßt, während die Silber-Aktivität nach ~ 20 Min. praktisch verschwunden ist. Es kann danach keinerlei Schwierigkeiten machen, etwa in einem Gegenstand aus Gold festzustellen, ob es sich dabei um reines Gold handelt oder ob es mit Silber legiert ist. Die Arbeit besteht darin, den Gegenstand einige Minuten an die Neutronenquelle zu geben und dann die Ausschläge in der Zählapparatur zu registrieren. Eine schnelle Abnahme der Zahl der Ausschläge ist ein Beweis für die Anwesenheit von Silber.

In den genannten Fällen war es nicht nötig, die radioaktive Atomart von dem inaktiven isotonen Element abzutrennen. Aber in manchen Fällen wird es notwendig sein, das Radio-Element in möglichst gewichtsreicher Menge möglichst stark aktiv zu verwenden, etwa für medizinische Untersuchungen im tierischen oder menschlichen Körper. Nun haben wir aber gesehen, daß bei der Anlagerung eines Neutrons an ein inaktives Element ein aktives Isotop dieses Elements entsteht. Will man nun erhebliche Aktivitäten erhalten,

dann muß man große Mengen inaktiver Substanz bestrahlen. Das radioaktive Isotop ist dann aber mit sehr viel inaktiver Substanz als unerwünschtem Ballast vermischt. Es war daher wichtig, zu wissen, ob überhaupt eine Möglichkeit besteht, in diesen Fällen zu starken, praktisch gewichtslosen Präparaten zu kommen, mit anderen Worten, ob sich das radioaktive Isotop von dem bestrahlten inaktiven Element abtrennen läßt.

Szilard und Chalmers haben bei bestrahltem Äthyljodid zum ersten Male einen solchen Weg angegeben. Das von dem Neutron getroffene Atom, in diesem Falle Jod, wird im allgemeinen aus dem Molekülverband herausgeschlagen und liegt im vorliegenden Falle als freies künstliches Jodatom oder Jod-Ion vor, im Gegensatz zu dem organisch gebundenen Jod des Trägermaterials Jodäthyl. Szilard und Chalmers gaben nun vor der Bestrahlung ihrem Jodäthyl eine kleine Menge freies Jod zu. Nach der Bestrahlung wurde dieses freie Jod mit dem radioaktiven Jod zu Jodwasserstoff reduziert und das Jod-Ion mit Silbernitrat als AgJ gefällt. Die aktive Substanz ist dann bei der kleinen Menge Jodsilber, von der sehr viel größeren Menge inaktiven Jodäthyls getrennt. Eine paarhundertfache Anreicherung wurde damit erzielt. Im Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie haben dann Erbacher und Philipp einen anderen Weg eingeschlagen. Sie befreiten das Halogenalkyl soweit wie irgend möglich von freiem Halogen, das ja immer darin enthalten ist, schüttelten das bestrahlte Halogenalkyl mit Wasser, trennten das Wasser ab und schüttelten mittels Benzol die geringen im Wasser gelösten Alkylmengen heraus. Die wenigen aktiven Jodatome blieben übrig. Aus 20 g bestrahltem Äthylbromid konnten sie auf diese Weise mit guter Ausbeute das radioaktive Brom in absolut unwägbarer Menge abscheiden. Erbacher und Philipp haben ihre Versuche auch schon auf einige andere künstliche Radio-Elemente mit Erfolg ausgedehnt, und es scheint somit prinzipiell die Möglichkeit zu bestehen, die durch einfache Neutronen-Anlagerung entstandenen Radio-Elemente von ihren inaktiven isotopen Trägerverbindungen abzutrennen; nämlich immer dann, wenn die bestrahlte Verbindung in keine direkte Wechselwirkung mit den aus dem Molekülverband herausgeschlagenen freien radioaktiven Atomen oder Ionen tritt.

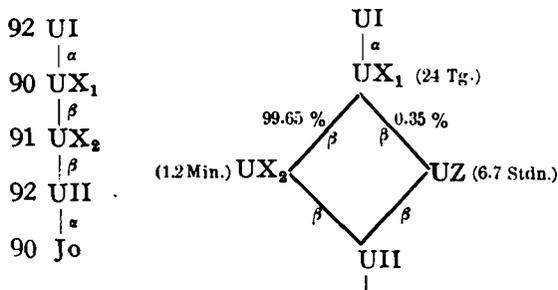
Bei all den bisher genannten künstlichen Radio-Elementen, die durch Neutronenbestrahlung entstehen, ist ihr Atomgewicht im Vergleich zu der Ordnungszahl etwas zu hoch. Deshalb emittieren alle diese Substanzen β -Strahlen und erhöhen dadurch ihre positive Kernladung um eine Einheit. Das dann entstehende Atom ist stabil und wandelt sich nicht weiter um. Aus dem Radio-Natrium entsteht das stabile Magnesium, aus dem Radio-Magnesium entsteht das gewöhnliche Aluminium u. s. f.; aus dem Radio-Gold entsteht das stabile Quecksilber (nicht aber aus dem Quecksilber das Gold).

Anders und verwickelter werden die Verhältnisse, wenn wir an das Ende des Periodischen Systems kommen, wenn Thorium oder Uran mit Neutronen bestrahlt werden. Wir sind ja hier in dem Bereich der schon von Natur aus instabilen Substanzen.

Beim Thorium haben Lise Meitner und ich erstmalig Glieder der bisher fehlenden radioaktiven Reihe mit den Atomgewichten $4n + 1$ festgestellt (n ist eine ganze Zahl), nachdem in der Thorium-Reihe (beginnend von 232) die Reihe $4n$, in der Uran-Reihe $4n + 2$, in der Aktinium-Reihe (235) $4n + 3$ schon lange bekannt waren. Bei den gewöhnlichen Elementen gibt es ja viele

Glieder dieser $4n + 1$ -Reihe, z. B. das Cl 37, K 41, Rb 81, Ag 109 usw. Unsere Ergebnisse wurden von Curie, Halban und Preiswerk bestätigt und erweitert, und in neuester Zeit wurde von Rona und Neuninger im Wiener Radium-Institut noch ein weiteres verhältnismäßig langlebiges Produkt nachgewiesen. Diese neuen Substanzen sind Isotope des Thoriums, Pa, Ra und Ac. Ganz klar liegen die Verhältnisse noch nicht; es wird aber nicht schwer sein, hier Aufklärung zu bringen, da es sich um Isotope bekannter radioaktiver Substanzen handelt.

Wesentlich komplizierter steht es mit den Umwandlungsprodukten des Urans. Zunächst muß man auch beim Uran berücksichtigen, daß es selbst radioaktiv ist und dauernd radioaktive Umwandlungsprodukte bildet, die einerseits zur Radium-Reihe, andererseits zur Protactinium-Reihe führen. Ich zeige Ihnen hier die zum Radium führenden Produkte; die Actinium-Reihe lasse ich, weil sie nur eine untergeordnete Rolle spielt, der Einfachheit halber hier fort.



Wir wollen uns hier für später das Protactinium-Isotop Uran Z merken, das in einer Nebenreaktion aus dem Uran X_1 entsteht und eine Halbwertszeit von 6.7 Std. hat.

Fermi und Mitarbeiter haben bei ihren Versuchen zeigen können, daß bei der Bestrahlung des Urans mit Neutronen vier neue radioaktive Substanzen entstehen. Als Halbwertszeiten gaben sie etwa 10 Sek., 40 Sek., 13 Min. und ungefähr 100 Min. an. Von besonderer Wichtigkeit unter diesen sind die beiden längerlebigen Stoffe, denn Fermi und Mitarbeiter konnten durch chemische Trennungen mit großer Wahrscheinlichkeit zeigen, daß der 13- und 100-Min.-Körper nicht mit Uran oder einem Element niedrigerer Ordnungszahl identisch seien. Sie schlossen, daß der 13- und 100-Min.-Körper Elementen jenseits Uran zugehören müßten, ließen es dabei aber offen, ob diese beiden Substanzen isotop seien oder verschiedene Elemente darstellten.

Gegen diese Ergebnisse wurden von anderer Seite Bedenken erhoben, und v. Grosse und Agruss gaben an, der Fermische 13-Min.-Körper sei ein Isotop des Protactiniums, also kein Element jenseits Uran; über den 100-Min.-Körper wußte man noch weniger und ließ ihn aus der Debatte.

Diese ungeklärten Fragen veranlaßten Lise Meitner und mich, uns ebenfalls mit dem Uran zu beschäftigen. Vor allem sollte die Frage entschieden werden, bilden sich Elemente jenseits Uran oder nicht. Uns interessierte also zunächst der 13-Min.-Körper. Von diesem konnten wir feststellen, daß er aus stark salzsaurer Lösung mit Rhenium oder Platin oder

anderen Schwermetallen als Träger mittels H_2S gefällt wird, während die Vertreter der Elemente 92 (Uran), 91 (Protactinium) und 90 (Thorium) quantitativ im Filtrat bleiben. Dies machte es schon sehr wahrscheinlich, daß der 13-Min.-Körper einem Element jenseits Uran angehört, denn die noch unterhalb des Thoriums stehenden Elemente 89 bis 85 kamen nach dem beschriebenen Verhalten erst recht nicht in Frage. Um aber ganz einwandfrei die chemische Verschiedenheit des 13-Min.-Körpers vom Protactinium zu beweisen, wurden direkte Indicatorversuche derart durchgeführt, daß das oben erwähnte Protactinium-Isotop Uran Z aus einer größeren Menge nicht bestrahlten Urans abgetrennt und in salzsaurer Lösung mit der ebenfalls salzsauren Lösung des aus bestrahltem Uran gewonnenen 13-Min.-Körpers vermischt wurde. Dann wurde mittels einer typischen Protactinium-Reaktion (Zirkonphosphatfällung) das Uran Z gefällt; der 13-Min.-Körper blieb dabei im Filtrat. Damit war die chemische Verschiedenheit des 13-Min.-Körpers vom Element 91 bewiesen; und da die anderen Elemente 92, 90 usw. nicht in Frage kamen, war zugleich bewiesen, daß der 13-Min.-Körper ein Vertreter eines Elements jenseits 92, also ein „Trans-Uran“ ist.

Ähnliche Versuche wurden dann mit dem sogen. 100-Min.-Körper Fermis durchgeführt; sie zeigten, daß diese Substanz sich ebenfalls vom Protactinium und den anderen Elementen vom Uran abwärts trennen läßt, also ein Elementvertreter jenseits Uran ist. Außerdem aber konnte gezeigt werden, daß der 13-Min.-Körper und der sogen. 100-Min.-Körper nicht isotop sind, sondern sich voneinander trennen lassen. Wir haben also zwei chemisch verschiedene, künstlich radioaktive Atomarten, die Vertreter zweier chemischer Elemente jenseits Uran vorstellen müssen.

Bis dahin sehen die Dinge verhältnismäßig einfach aus. In Wirklichkeit sind die Vorgänge aber viel verwickelter; und mit der ausgezeichneten Mitarbeit von Hrn. Dr. F. Strassmann haben Lise Meitner und ich uns seitdem bemüht, Klarheit über die Vorgänge zu erhalten. Ich kann Ihnen nun bei der Kürze der Zeit nur recht summarisch und ohne auf die zeitliche Entwicklung unserer Versuche einzugehen, die Ergebnisse, wie sie sich uns heute darstellen, mitteilen.

1) Außer den von Fermi und Mitarbeitern festgestellten zwei kurzlebigen Uran-Isotopen entsteht unter gewissen Bestrahlungsbedingungen ein drittes Uran-Isotop von 23 Min. Halbwertszeit.

2) Der Fermische 13-Min.-Körper ist ein Homolog des Rheniums, stellt also ein Eka-Rhenium vor. Seine Halbwertszeit ist etwas größer als 13 Min., sie beträgt 16 ± 1 Min. Außerdem entsteht bei der Bestrahlung noch ein zweites Eka-Rhenium-Isotop von 2.2 Min. Halbwertszeit.

3) Der sogen. 100-Min.-Körper von Fermi ist komplex. Er besteht aus einer kürzerlebigen Substanz von 59 Min. Halbwertszeit und längerlebigen Komponenten. Außer dem 59-Min.-Körper haben wir unmittelbar nachgewiesen einen 6-Stdn.-Körper²⁾ und einen 3-Tage-Körper; diese Substanzen sind zweifellos höhere Homologe der Platinmetalle.

²⁾ Bis vor kurzem glaubten wir, dieser Substanz eine Halbwertszeit von etwa 10 Stdn. zuschreiben zu sollen; ungefähr 6 Stdn. ist aber nach neueren Versuchen sehr viel wahrscheinlicher. Der Nachweis dieser Atomart ist durch die Anwesenheit des 59-Min.- und des komplexen 3-Tage-Körpers nicht ganz leicht. Zudem scheinen die β -Strahlen nur wenig durchdringend zu sein.

4) Der 3-Tage-Körper seinerseits bildet noch eine kürzerlebige Substanz von etwa 2.5 Stdn. Halbwertszeit.

Außer den 4 Fermischen Körpern haben wir also noch 5 weitere künstliche β -strahlende Atomarten festgestellt.

Wie ließen sich diese nebeneinander erkennen, und was kann man Näheres über sie aussagen?

Der allgemeine Gang der Versuche war etwa folgender. Das zu bestrahlende Uran wird in allen Fällen durch chemische Abtrennung möglichst uran-X-frei gemacht. Das weitere Verfahren erfolgt dann in verschiedener Weise:

a) Die Bestrahlung wird min.-, stdn.- oder tage-lang durchgeführt. Man erreicht dadurch, daß man praktisch nur die kurzlebigen Substanzen, dann in steigender Ausbeute auch die stabileren Substanzen erhält.

b) Die Bestrahlung geschieht mit schnellen oder mit durch Paraffin verlangsamten Neutronen. Man kommt dadurch zu ungefähren Aussagen über die wirksamen Neutronen-Geschwindigkeiten.

c) Die zur Bestrahlung verwendeten Neutronen läßt man noch durch absorbierende Metalle wie Cadmium, Silber, Gold, Wolfram hindurchgehen, bevor sie das Uran treffen. Von diesen Metallen weiß man, daß sie Neutronen bestimmter Geschwindigkeit selektiv absorbieren, andere Geschwindigkeiten dagegen durchlassen. Hierdurch ergeben sich genauere Aussagen über die Geschwindigkeit der die einzelnen Prozesse auslösenden Neutronen.

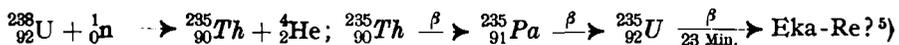
d) Es werden — nach Zugabe von verschiedenen Trägersubstanzen — chemische und elektrochemische Trennungsversuche durchgeführt. Hierdurch gelangen wir zu Aussagen über die chemische Natur der entstandenen Körper.

Gemessen wurde in sogen. Geiger-Müller-Zählrohren mit 100 μ Al Wandstärke und der üblichen Verstärkeranordnung. α -Strahlen kamen dadurch nicht zur Messung. Alle Präparate wurden mit einem sehr dünnen Cellophan-Klebestreifen zugedeckt, um elektrische Störungen in der Zählapparatur zu vermeiden³⁾.

Durch Anwendung der verschiedenen physikalischen und chemischen Prüfungsmethoden konnten wir feststellen, daß die zahlreichen künstlichen Radio-Elemente durch drei verschiedene Umwandlungsprozesse ausgelöst werden, von denen zwei sehr ähnlich, der dritte ganz anders als die beiden ersten, verlaufen.

Von diesem letzteren haben wir bisher nur eine einzige Substanz, das neue Uran-Isotop von 23 Min. Halbwertszeit nachgewiesen. Diese Substanz bildet sich nur mit verlangsamten Neutronen, nicht mit schnellen.

In unserer in den Berichten erschienenen ausführlichen Mitteilung⁴⁾ formulierten wir diesen Prozeß folgendermaßen:



³⁾ Auch an dieser Stelle möchten wir der Firma Kalle und Co., Biebrich a. Rh., für die eigens für diese Zwecke hergestellten besonders dünnen Cellophan-Streifen herzlich danken. ⁴⁾ B. 69, 905 [1936].

⁵⁾ Die künstlichen Umwandlungsprodukte sind auch hier und im folgenden kursiv geschrieben.

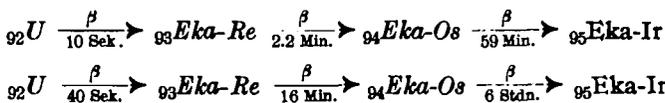
Wir glaubten damals, das Thorium 235 als kurzlebige Substanz von 4 Min. Halbwertszeit nachgewiesen zu haben. Dies war aber nicht richtig; wir wurden bei unseren Trennungen durch mit dem Thorium niedergeschlagene kleine Mengen augenscheinlich vierwertiger künstlicher Uran-Isotope getäuscht. Es war dies eine Art Szilard-Chalmers-Trennung, die uns irreführt hat (siehe oben). Wenn der Prozeß so verläuft, wie in der Tabelle angegeben, dann müssen die intermediären Thor- und Pa-Isotope sehr kurzlebig sein, was auch zu erwarten ist. Um den Prozeß sicherzustellen, müßte man die während der Bestrahlung mit Neutronen emittierten α -Strahlen nachweisen, was nur auf rein physikalischem Wege möglich ist. Versuche in dieser Richtung sind in der Abteilung von Prof. Meitner im Gang.

Die anderen beiden Prozesse nehmen ihren Ausgang augenscheinlich von den beiden kurzlebigen Uran-Isotopen Fermis, dem 10-Sek.- und dem 40-Sek.-Körper. Als β -Strahler müssen sich diese in Isotope des Elements 93 umwandeln, also in Vertreter des Eka-Rheniums. Diese zerfallen dann weiter in Isotope des Eka-Osmiums.

Wir sprechen nun zunächst von dem 16-Min.- und dem 59-Min.-Körper. Der 16-Min.-Körper läßt sich schon nach sehr kurzer Bestrahlung des Urans in erheblicher Menge nachweisen. Er kann also nicht erst indirekt aus dem 59-Min.-Körper oder gar einer der längerlebigen Substanzen entstehen. Schon dadurch wird es wahrscheinlich, daß er ein direktes Umwandlungsprodukt eines kurzlebigen Uran-Isotops ist, also ein Eka-Rhenium vorstellt. Der 59-Min.-Körper dagegen kann kein Eka-Rhenium sein, denn er hat andere chemische Eigenschaften als der 16-Min.-Körper. Man kann nämlich die beiden Substanzen weitgehend voneinander trennen, z. B. dadurch, daß man das bestrahlte Uran — es wurde meist Ammonuranat verwendet — nach dem Auflösen in Säure und Zugabe von etwas Natriumperrhenat⁶⁾ mittels Natronlauge ausfällt. Der 16-Min.-Körper findet sich in erheblicher Reinheit im Filtrat, der 59-Min.-Körper fast quantitativ im Uran-Niederschlag, aus dessen salzsaure Lösung es sich mit Schwefelwasserstoff abtrennen läßt. Dieses Verhalten der beiden Substanzen ist mit den für sie zu erwartenden Eigenschaften in Einklang, nämlich daß der 16-Min.-Körper ein Eka-Rhenium, der 59-Min.-Körper ein Eka-Osmium ist.

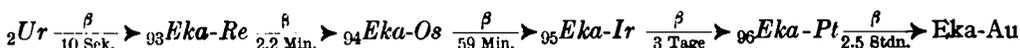
Nun wäre es naheliegend, anzunehmen, daß der 59-Min.-Körper aus dem 16-Min.-Körper unter β -Strahlung entsteht. Dies ist aber nicht der Fall. Besondere Versuche ergaben einwandfrei, daß der 59-Min.-Körper unabhängig vom 16-Min.-Körper entsteht. Aus dem 16-Min.-Körper entsteht eine stabilere Substanz, vermutlich der oben genannte 6-Stdn.-Körper (vergl. Anm. 2). Der 59-Min.-Körper mußte also aus einem anderen, und zwar kurzlebigen Eka-Rhenium entstehen. In der Tat fanden wir dann eine solche Substanz, als wir danach suchten. Bei kurzer Bestrahlung und sehr schnellem Arbeiten läßt sich ein kurzlebiges Produkt feststellen, dessen Halbwertszeit 2.2 Min. ist und dessen Verhalten mit Eka-Rhenium verträglich ist.

Wir haben also bis hierher die beiden Reihen:



⁶⁾ Das von uns vielfach verwendete Natriumperrhenat verdanken wir der Liebenswürdigkeit von Hrn. Generaldirektor Dr. Feit.

Schließlich haben wir noch den 3-Tage-Körper, der bei längerer Bestrahlung entsteht, ebenfalls aus stark saurer Lösung mit H_2S fällbar ist, und der übrig bleibt, wenn die bisher genannten Körper zerfallen sind. Aus ihm kann dann noch der oben erwähnte 2.5-Stdn.-Körper nach verschiedenen Methoden abgetrennt und nachgewiesen werden. Bei keiner dieser beiden Substanzen handelt es sich um Eka-Rhenium oder um Elemente tiefer als 93. Wir müssen deshalb schließen, daß diese Substanzen entweder aus dem 59-Min.-Körper oder dem 6-Stdn.-Körper entstehen. Die größere Wahrscheinlichkeit ist die, daß sie zu ersterem gehören; wir haben in diesem Falle also Vertreter des Eka-Ir und des Eka-Pt vor uns. Die ganze Umwandlungsreihe ist dann



Schließlich möchte ich noch ein paar Worte über die chemische Zuordnung sagen. Die Zuordnung des 2.2-Min.-Körpers und 16-Min.-Körpers zum Eka-Rhenium ist wohl frei von Willkür. Sowohl die genetischen Beziehungen wie die chemischen Eigenschaften lassen wohl keinen Zweifel über ihre Zugehörigkeit zum Element 93. Bei den dann folgenden Homologen der Platinmetalle sind wir nach ihrem allgemeinen chemischen Verhalten sicher bezüglich ihrer Gruppen-Zugehörigkeit. Dafür, daß es sich um Edelmetalle handelt, spricht z. B. ihr elektrochemisches Verhalten gegenüber Platin. Die von uns für Platin-Homologe angesprochenen Umwandlungsprodukte scheiden sich sowohl an mit Wasserstoff beladenem Platin wie an reinem, geschmirgeltem Platin aus saurer Lösung ab. Allerdings sind die Mengen bisher wechselnd und noch nicht gut reproduzierbar. Andererseits haben wir niemals die Abscheidung der Eka-Rhenium-Isotope, des 2.2-Min.- und 16-Min.-Körpers aus Platin beobachtet, obgleich diese als kurzlebige Substanzen leichter nachweisbar sein müßten. Systematische chemische Trennungen der einzelnen Glieder der höheren Elemente mit Ausnahme der Trennung des 2.5-Stdn.-Körpers vom 3-Tage-Körper, sind bisher noch nicht durchgeführt. Auffallend ist die schon in früheren Mitteilungen erwähnte Tatsache, daß im Gegensatz zum Osmium das Eka-Osmium mit Salpetersäure kein flüchtiges Tetroxyd gibt. Hier bleibt naturgemäß noch viel zu tun übrig.

Mehr Kopfzerbrechen macht nun aber die Erklärung der Ausgangsprozesse der zu den Trans-Uranen führenden beiden Umwandlungsreihen. Die Reihe mit den anfänglich kürzeren Lebensdauern ist vermutlich dem normalen Einfangprozeß des Neutrons durch das Uran 238 zuzuschreiben, so daß alle folgenden β -Strahler das Atomgewicht 239 haben. Die andere Reihe, mit dem Eka-Re 16 Min. usw., sollte nach allem was wir wissen, von einem Uran mit kleinerem Atomgewicht herrühren. Wir deuteten seinerzeit diesen Prozeß deshalb dahin, daß durch ein schnelles Neutron aus dem Uran 238 ein zweites Neutron herausgeschlagen würde, so daß statt des Urans 239 eines mit dem Atomgewicht 237 entstünde als Ausgang der Reihe. Diese Deutung hat sich aber als falsch herausgestellt, seitdem wir erkannt haben, daß, entgegen unseren früheren Vermutungen, auch ganz langsame Neutronen den Prozeß auslösen. Wir sind jetzt also in der schlimmen Lage, daß wir mehrere Zerfallsprozesse sicher kennen, aber eigentlich nur einen von ihnen bisher in wirklich befriedigender Weise erklären können, nämlich den normalen Anlagerungsprozeß des Neutrons an das Uran 238.

In der folgenden Tabelle sind noch einmal die drei Umwandlungsprozesse, so wie sie sich uns jetzt darstellen, zusammengestellt.

Bei dem Prozeß III wurde als Atomgewicht nur der Index A eingesetzt. Dies soll sagen, daß wir bisher nicht wissen, ob es sich dabei ebenfalls um 239 oder ein anderes Atomgewicht handelt.

Künstliche Atomarten aus Uran.

