

## Vor fünf Jahrzehnten: Von den „Transuranen“ zur Kernspaltung\*\*

Von Günter Herrmann\*

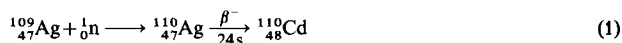
Die Entdeckung der Kernspaltung wird als ein Kapitel Chemiegeschichte nachgezeichnet: Wie *Enrico Fermi* und seine Gruppe im Frühjahr 1934 durch Bestrahlen von Uran mit Neutronen scheinbar über das damals schwerste Element Uran hinaus zum ersten Transuranelement vordringen; wie *Otto Hahn*, *Lise Meitner* und *Fritz Straßmann* weitere Transurane gefunden zu haben glauben; wie *Irène Curie* und *Paul Savitch* eine Aktivität beobachten, die nicht dazu paßt; wie *Otto Hahn* und *Fritz Straßmann* diese zunächst als Radium deuten, dann aber, als sie dies chemisch rigoros nachprüfen, am 17. Dezember 1938 auf Barium stoßen und damit die Spaltung des Uranatoms in zwei leichtere Kerne finden; schließlich, wie *Lise Meitner* und *Otto Robert Frisch* die Kernspaltung anhand eines schon gebräuchlichen Kernmodells erklären und *Otto Robert Frisch* sie am 13. Januar 1939 durch ein physikalisches Experiment bestätigt. Die Entdeckung der Kernspaltung ist nicht nur ein Ereignis von geschichtlichem Rang, sondern auch ein ausgezeichnetes Lehrstück dafür, wie Wissenschaft oft vor sich geht: nicht in logisch aufeinander aufbauenden Schritten, sondern auf merkwürdigen Umwegen.

### 1. Die „Transurane“

#### 1.1. Rom 1934: Element 93, Eka-Rhenium?

Als *Enrico Fermi* und seine Gruppe im Frühjahr 1934 in Rom Uran mit Neutronen bestrahlen, denken sie nicht im mindesten daran, daß der Urankern dabei in zwei mittelgroße Kerne gespalten wird, wie wir heute wissen. Sie haben etwas ganz anderes vor: Sie wollen das Periodensystem der Elemente über das schwerste natürliche Element, Uran (Ordnungszahl  $Z = 92$ ), hinaus erweitern und zum ersten Transuran, dem Element 93, vordringen. Diese Möglichkeit hat sich eröffnet, als *Fermi* und Mitarbeiter bei zahlreichen Elementen erfolgreich mit Neutronen – kurz zuvor erst entdeckt – radioaktive Isotope erzeugten. Anders als die bis dahin zur Kernumwandlung benutzten  $\alpha$ -Teilchen können

die ungeladenen Neutronen leicht an die positiv geladenen Atomkerne angelagert werden. Dies funktioniert<sup>[1, 2]</sup> selbst bei schweren Elementen und gibt dort stets Isotope des Ausgangselements<sup>[2, 3]</sup>, die sich durch  $\beta^-$ -Zerfall umwandeln; das heißt, die Isotope emittieren ein Elektron aus dem Kern und gehen so in das Element mit der nächst höheren Ordnungszahl über. Das stabile Silberisotop 109 ( $Z = 47$ ) zum Beispiel fängt ein Neutron zum Silber-110 ein, das sich nach Reaktion (1) mit 24 s Halbwertszeit durch  $\beta^-$ -Zerfall in stabiles Cadmium-110 umwandelt.



Würde ein solcher Prozeß auch beim Uran eintreten, so müßte nach Reaktion (2) Element 93 entstehen.



Dieses Element 93 sollte radioaktiv sein und würde, falls es sich wieder um einen  $\beta^-$ -Strahler handelte, sogar in ein weiteres Transuranelement, 94, übergehen [Reaktion (3)].



[\*] Prof. Dr. G. Herrmann  
Institut für Kernchemie der Universität  
Fritz-Straßmann-Weg 2, D-6500 Mainz, und  
Gesellschaft für Schwerionenforschung  
Planckstraße 1, D-6100 Darmstadt

[\*\*] Erweiterte Fassung eines Vortrags „Discovery and Confirmation of Fission“ auf der Konferenz „Fifty Years Research in Nuclear Fission“ in Berlin am 4. April 1989.

Auf den bloßen Nachweis von  $\beta^-$ -Strahlern kann man freilich nicht bauen, sondern man muß das Entstehen der neuen Elemente direkt beweisen, und das kann nur mit chemischen Methoden geschehen. Dazu werden Verwandtschaften innerhalb des Periodensystems genutzt: Man sucht nachzuweisen, daß die den Transuranen zugeschriebenen Aktivitäten<sup>[\*1]</sup> sich chemisch so verhalten, wie ihrer Stellung im Periodensystem nach erwartet wird. Abbildung 1 zeigt, wie man sich das System vorstellt.

[illegible]

Ein Problem bei diesem Nachweis ist, daß die künstlichen  $\beta^-$ -Strahler nur in winzigen Mengen entstehen, die weder sichtbar noch wägbare sind und nur durch ihre Radioaktivität überhaupt erkannt werden können, die sogar einzelne Atome noch zu erfassen gestattet. Indes ist dieses Problem nicht neu, denn auch manche der natürlichen radioaktiven Elemente wurden zuerst nur in solch winzigen Mengen gefun-

[\*] Wir verwenden im historischen Kontext wie damals „Aktivität“ oder „Körper“, um eine radioaktive Spezies zu kennzeichnen; heute sind dafür „Nuclid“ oder „Isotop“ üblich. Wir behalten auch die alte Nomenklatur von Nucleiden bei, obwohl sie irreführend ist, denn beispielsweise ist Mesothorium 1 (MsTh 1) kein Thoriumisotop, sondern ein Radiumisotop; wir fügen aber meist die heutige Schreibweise mit Elementsymbol und Massenzahl, oft auch die Halbwertszeit, hinzu, im Beispiel also: Mesothorium 1, 5.8a-Radium-228.

Auf die Transurane übertragen heißt dies also nachzuweisen, daß die diesen Elementen zugeordneten Aktivitäten ihren homologen Elementen bei charakteristischen chemischen Operationen folgen. Bei diesem Nachweis machen *Fermi* et al. und alle im folgenden mit den Transuranen experimentierenden Gruppen zwei Prämissen, welche beide durch Theorie und Experiment wohl begründet scheinen, sich aber später doch als falsch herausstellen: Erstens: Bei Kernreaktionen – beim spontan ablaufenden radioaktiven Zerfall ebenso wie bei den durch Teilchenbeschuß erzwungenen Reaktionen – ändert sich die Kernladungszahl nur wenig; somit sollten nur Elemente in der Nachbarschaft des Ausgangselements entstehen. Zweitens: Im Periodensystem stehen Thorium, Protactinium und Uran in der 4., 5. bzw. 6. Nebengruppe; das gesuchte Element 93 sollte somit in die 7. Nebengruppe gehören und wäre Eka-Rhenium, und die Elemente 94 bis 96 wären Eka-Platinmetalle. Chemisch zu beweisen ist also, daß Elemente rechts vom Uran entstehen, und auszuscheiden sind solche, die sich links davon unmittelbar anschließen.

Daß Kernreaktionen auf die Umgebung des Ausgangskerns beschränkt bleiben, entspricht allen bis dahin bekannten experimentellen Fakten<sup>[3]</sup>. Dies drückt sich auch in der nun üblich werdenden anschaulichen Darstellung von Kernreaktionen aus<sup>[10]</sup>. Aber auch die Theorie spricht eindeutig für diese Sicht. Nach Gamows Theorie des  $\alpha$ -Zerfalls<sup>[12]</sup>, einem der frühen Triumphe der Quantenmechanik, kann selbst das  $\alpha$ -Teilchen mit seinen beiden Kernladungen nur mit großer Mühe durch den elektrostatischen Coulomb-Wall des Kerns tunneln; für größere Kernfragmente wächst dieser Wall rasch sehr stark an und macht so das Tunneln äußerst unwahrscheinlich<sup>[13]</sup>. Diese Auffassung ist durchaus richtig, wie sich Jahrzehnte später bestätigt, als die extrem seltene Emission von Kohlenstoff-13-Kernen aus Radium-223 entdeckt wird<sup>[14]</sup>. Nur darf man das noch weiter gehende Zerbrechen eines schweren Kerns in zwei vergleichbar große Fragmente eben nicht als Tunnelprozeß betrachten. Die



Günter Herrmann, 1925 in Greiz/Thüringen geboren, studierte ab 1946 an der Universität Mainz und promovierte dort 1956 bei Fritz Straßmann mit einer Arbeit über Kernspaltung. 1962 habilitierte er sich in Mainz in Anorganischer Chemie und Kernchemie. Einen Ruf als Full Professor an die Kansas State University in Manhattan (1967) lehnte er ab. Seit 1968 ist Herrmann ordentlicher Professor und Leiter des Instituts für Kernchemie an der Universität Mainz. Nebenamtlich leitet er seit 1970 einen Forschungsbereich für Kernchemie der Gesellschaft für Schwerionenforschung Darmstadt. Seine Arbeitsgebiete umfassen schnelle chemische Trennmethode, Kernspaltung und Reaktionen zwischen schweren Atomkernen, exotische Atomkerne, Suche nach überschweren Elementen, Radionuclide in der Umwelt. Unter den Ehrungen seien genannt: seit 1984 korrespondierendes Mitglied der Akademie der Wissenschaften und der Literatur zu Mainz; 1987 Miller-Gastprofessor an der University of California in Berkeley; 1988 Nuclear Chemistry Award der American Chemical Society.

Quantenmechanik hat den Blick für die Spaltung eher ver- stellt als geöffnet.

Was das Periodensystem betrifft, so sind Thorium mit Hafnium, Protactinium mit Tantal und letztlich auch Uran mit Wolfram so eng verwandt, daß eine andere Ordnung als in Abbildung 1 nicht ernsthaft erwogen wird, obwohl seit *Niels Bohrs* Nobel-Vortrag von 1922<sup>[15]</sup> eine den Seltenen Erden ähnliche, zweite Serie von f-Elementen wiederholt postuliert wird; man vermutet sie indes eher jenseits als diesseits vom Uran<sup>[16–19]</sup>. *A. von Grosse*<sup>[20]</sup> weist zu der Zeit, über die hier berichtet wird, noch einmal ausdrücklich darauf hin, daß Element 93 und 94 völlig andere Eigenschaften haben könnten als Eka-Rhenium und Eka-Osmium.

Dieses Konzept – „Element 93 ist Eka-Rhenium“ – in chemische Trennverfahren umzusetzen, ist nicht einfach, denn man befindet sich in der damals am wenigsten erschlossenen Gruppe des Periodensystems. Die beiden homologen Elemente 43 und 75, Masurium (heute Technetium) und Rhenium, waren erst wenige Jahre zuvor von *Walter Noddack*, *Ida Tacke* (später verheiratete *Noddack*) und *Otto Berg*<sup>[21, 22]</sup> entdeckt worden, und während Rhenium zwar noch selten und wenig untersucht, aber immerhin schon verfügbar ist, weiß man über Masurium so gut wie nichts. Für die Eka-Platinmetalle muß man ebenfalls eine komplizierte Chemie erwarten, wie man an ihren Homologen sieht.

*Fermi* und Mitarbeiter orientieren sich deshalb hauptsächlich am Mangan, als sie versuchen, ihr Element 93 chemisch abzusichern. Sie wählen die Fällung von Mangandioxid aus starker Salpetersäure durch Chloratzusatz als charakteristische Reaktion, sicher kein glücklicher Griff, denn dieser oberflächenreiche Niederschlag reißt viele Fremdelemente mit. Aber zunächst verläuft alles wie erwartet: Die 13min-Aktivität, für derartige Experimente die geeignetste der neuen Aktivitäten, findet sich im Niederschlag, im Gegensatz zu Uran und dessen leichteren Nachbarn bis herab zum Blei, wie mit Radioisotopen geprüft wird<sup>[2, 4, 6–8]</sup>. Auch an Rheniumsulfid aus starker Salzsäure fällt die 13min-Aktivität mit<sup>[2, 6–8]</sup>; dies ist eine weitaus spezifischere Reaktion als die Mangandioxidfällung. Die 90min-Aktivität verhält sich chemisch sehr ähnlich wie die 13min-Aktivität. Das Fazit – Elemente jenseits vom Uran sind gefunden – präsentiert *Fermi*<sup>[7]</sup> indessen recht zurückhaltend, wie schon der Titel der Publikation erkennen läßt; über entschiedenere öffentliche Aussagen seines Mentors *Corbino* ist er nicht glücklich<sup>[23]</sup>.

## 1.2. Einwände und deren Folgen

Nun kommen Einwände. *von Grosse* und *Agruss*<sup>[25–27]</sup> ordnen *Fermis* Aktivität dem Element 91, Protactinium, zu, das sie an Mangandioxid vollständig und an Rheniumsulfid weitgehend mitfällen können. Auch *Fermi* et al. haben einige Probleme mit Protactinium bei der Mangandioxidfällung<sup>[2, 4, 8]</sup>. Durch diese Kontroverse werden *Otto Hahn* und *Lise Meitner* herausgefordert, die das einzige in der Natur wägbare vorkommende Protactiniumisotop, das  $3.3 \times 10^4$  a-Protactinium-231, gefunden<sup>[28]</sup> und dem Element auch seinen Namen gegeben hatten; *Hahn*<sup>[29]</sup> hatte zudem am natürlichen Protactinium-234 die Kernisomerie entdeckt, d. h. das Vorliegen zweier Kerne gleicher Protonen- und Neutronenzahl, aber unterschiedlicher Halbwertszeiten, nämlich

1.17 min für dessen metastabilen Zustand (m) und 6.75 h für den Grundzustand (g). *Lise Meitner*, die *Fermis* Kernreaktionen mit Neutronen sofort aufgreift<sup>[30, 31]</sup>, überredet<sup>[32, 34]</sup> *Otto Hahn*, ihre Zusammenarbeit nach zwölf Jahren wieder aufzunehmen und sich den Transuranen zuzuwenden.

In einer ersten Notiz<sup>[35]</sup> stützen sie *Fermis* Interpretation. Die 13min- und die 90min-Aktivität lassen sich auf zwei Wegen vom Protactinium trennen: Beide Aktivitäten werden an Platinsulfid mitgefällt, wobei Protactinium vollständig gelöst bleibt, und außerdem bleiben beide in Lösung, wenn Protactinium an Zirconiumphosphat mitgefällt wird. Dies wird durch Indikatorexperimente festgestellt, bei denen die Transuranaktivitäten mit natürlichem 6.7h-Protactinium-234g vor der Trennung vermischt werden und dann geprüft wird, wie alle drei Aktivitäten sich auf die Fraktionen verteilen. Die beiden Transurane ähneln mehr dem Platin als dem Rhenium, und sie könnten chemisch verschieden sein; die 13min-Aktivität könnte dem Element 93, die 90min-Aktivität dem Element 94 zugeordnet werden<sup>[35]</sup>. *Fermi* et al.<sup>[36, 37]</sup> kommen zu ähnlichen Ergebnissen und vermuten, daß die 13min- in die 90min-Aktivität zerfällt. Das war das letzte Wort der Römer zum „Fall des Urans“; sie überlassen ihn denjenigen, die in der Radiochemie erfahrener sind<sup>[38]</sup>, und wenden sich einem anderen, aufregenden Befund zu: der intensiven Reaktion langsamer Neutronen mit Atomkernen, ebenfalls in Rom entdeckt.

Auf einer anderen Ebene, nämlich im Konzeptionellen, liegt *Ida Noddacks* Kritik<sup>[39]</sup>. In einem Bericht<sup>[40]</sup> über die Lücken im Periodensystem äußert sie über dessen Ende, daß die Transurane mit steigender Ordnungszahl wohl immer kurzlebiger und seltener würden, die geradzahlig Elemente 94 und 96 aber doch noch erreichbar sein sollten; offenbar ist damit ein Nachweis in der Natur gemeint. Im Nachtrag<sup>[39]</sup> setzt sie sich mit zwei Entdeckungen des Elements 93 auseinander. Der eine Fall<sup>[41]</sup>, ein natürliches Element 93 in der Joachimsthaler Pechblende, wird von ihr rasch erledigt, weil sie in den Originalpräparaten Element 93 chemisch und röntgenspektroskopisch nicht finden kann. Im anderen Fall, eben *Fermis*<sup>[7]</sup> Element 93, kritisiert sie, daß nur die schwersten bekannten Elemente ausgeschlossen werden; *Fermi* hätte sein neues Element mit allen bekannten Elementen vergleichen müssen. Nach ihren eigenen Studien werden zahlreiche gewöhnliche Elemente an Mangandioxid mitgefällt, und auch die Mitfällung an Rheniumsulfid hält sie nicht für beweiskräftig. So bemerkt *Ida Noddack*<sup>[39]</sup>: „Es wäre denkbar, daß bei der Beschießung schwerer Kerne mit Neutronen diese Kerne in mehrere größere<sup>[\*]</sup> Bruchstücke zerfallen, die zwar Isotope bekannter Elemente, aber nicht Nachbarn der bestrahlten Elemente sind.“

War das die Voraussetzung der Kernspaltung, wie diese Sätze manchmal<sup>[42, 43]</sup> gelesen werden? Wohl kaum, denn *Ida Noddack* nimmt ihren Vorschlag einer neuartigen und über-raschenden Kernreaktion selbst nicht ernst genug, um ihn experimentell zu prüfen. Ihr geht es wohl lediglich darum, den Nachweis des Elements 93 als nicht schlüssig hinzustellen, so jedenfalls sehen es Zeitgenossen; für die weiteren Ereignisse bleibt der Einwand unerheblich<sup>[44]</sup>. Vielleicht hat sie selbst Pläne, nach Eka-Rhenium in der Natur zu suchen; mit der 7. Nebengruppe fühlt sie sich ja vertraut. Ihr Ein-

[\*] Hervorhebungen wie im Original.

wand bleibt in Rom<sup>[45]</sup> wie in Berlin<sup>[46]</sup> unbeachtet; *Straßmann* spricht sogar von einem Zufallstreffer<sup>[48]</sup>. Bei dieser Nichtbeachtung spielt sicher *Noddacks* zweifelhafte, nicht reproduzierbare Entdeckung des natürlichen Elements 43 eine Rolle<sup>[45, 50, 51]</sup>. Als sich *Ida Noddack* später in einer Zuschrift<sup>[52]</sup> hierüber beschwert, verwerfen *Hahn* und *Straßmann* eine zunächst konzipierte, scharfe Antwort<sup>[50]</sup> und überlassen es der Redaktion zu reagieren<sup>[53]</sup>. Das Verhältnis zwischen den *Noddacks* und *Hahn* und *Meitner* bleibt kühl, wohl auch durch politische Gegensätze bedingt<sup>[50]</sup>, obwohl – oder vielleicht weil – sie in derselben Stadt arbeiteten.

### 1.3. Berlin 1935–1938: Elemente 94 bis 96, die Eka-Platinelemente?

Nun liegt das weitere Studium der Transurane vorwiegend bei *Otto Hahn* und *Lise Meitner*, die bald den weit jüngeren *Fritz Straßmann* zuziehen, der sich bei schwierigen chemischen Trennungen hervorgetan hat. Eine Photographie aus diesen Jahren, in der alle drei dicht beieinander zu sehen sind, scheint es nicht zu geben, und so muß man auf zwei getrennte – Abbildung 2 – oder auf eine spätere gemeinsame



Abb. 2. *Otto Hahn* (1879–1968) und *Lise Meitner* (1878–1968) bei einem Institutsausflug, ca. 1934 oder 1935, und *Fritz Straßmann* (1902–1980), Berlin ca. 1936 (nach [48]).

Aufnahme – Abbildung 3 – zurückgreifen. Experimentiert wird im Erdgeschoß des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Chemie in Berlin-Dahlem, dessen Grundriß in Abbildung 4 zu sehen ist, in drei Räumen<sup>[\*]</sup>.

Die Ausrüstung ist denkbar einfach. Auf dem Tisch in Abbildung 5 erkennt man vorn zwei ziegelförmige Bleiblöcke, in denen die Zählrohre untergebracht sind, um den Strahlenuntergrund zu vermindern. Der rechte Block ist geöffnet; man sieht dort ein zylinderförmiges Geiger-Müller-Zählrohr. Die zu messenden Präparate werden auf schalenförmige Blei-, „Schiffchen“ geklebt und unter die Zählrohre geschoben; Präparate, Schiffchen und Absorberfolien sind zwischen den beiden Blöcken zu erkennen. Die Zählrohre sind aus 0.01 cm dickem Aluminiumrohr, 6 cm lang und 2 cm im Durchmesser, vorn und hinten mit Hartgummi-stopfen verschlossen und mit Pizein-Wachs gedichtet. Auch



Abb. 3. *Fritz Straßmann*, *Lise Meitner* und *Otto Hahn* (von links) 1956 in Mainz bei der Einweihung des Max-Planck-Instituts für Chemie (aus [54]).

der zentrale Zähl draht, Klaviersaitendraht, wird auf diese Weise eingekittet, ebenso ein Glasröhrchen zum Auspumpen und Füllen mit einem Argon-Ethanol-Gemisch (10:1) bei etwa 10 kPa Druck. Am Draht liegen etwa 1500 Volt positive Spannung, um die Elektronen zu sammeln, die durch die  $\beta^-$ -Strahlen aus dem Zählgas herausgeschlagen und im Spannungsfeld des Zählrohrs zu einer Elektronenlawine verstärkt werden.

In der Mitte des Tisches stehen zwei Verstärker-Einheiten mit jeweils zwei Verstärkerröhren; daneben je ein mechanisches Zählwerk, das bei jedem elektrischen Impuls um eine Zahl weiterspringt. Dazu gehört für jedes Zählwerk eine Stoppuhr, die auf dem Tisch jedoch fehlt<sup>[48]</sup>. Die Zählrohre sind über einen hochohmigen Widerstand angekoppelt, den man jeweils rechts von den Röhren erkennen kann; dieser ist ein mit Toluol gefülltes, in Paraffin eingegossenes Glasrohr<sup>[56]</sup>. Die nötigen elektrischen Spannungen werden im hinteren Teil erzeugt; für die Zählrohre werden sie einer Serie von Anodenbatterien entnommen, die sich unter der Tischplatte befinden.

Neutronen werden nach Reaktion (4) durch Einwirken von  $\alpha$ -Teilchen der natürlichen Radioisotope auf Beryllium erzeugt.



Die Neutronenquellen, sechs etwa 6 cm lange Messingröhrchen, erkennt man rechts hinten. Diese Röhrchen enthalten ein zugeschmolzenes Glasrohr mit Beryllimpulver und je etwa 100 mg Radiumsulfat oder kurzlebigen Radongas, das

[\*] Das Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie wird im Februar 1944 durch Bomben schwer beschädigt. Das Institut mit seinen Mitarbeitern wird in ein Provisorium nach Tailfingen in Württemberg überführt und nach dem Kriege als Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz angesiedelt. Das Berliner Gebäude ist jetzt, wiederaufgebaut, der Otto-Hahn-Bau der Freien Universität.

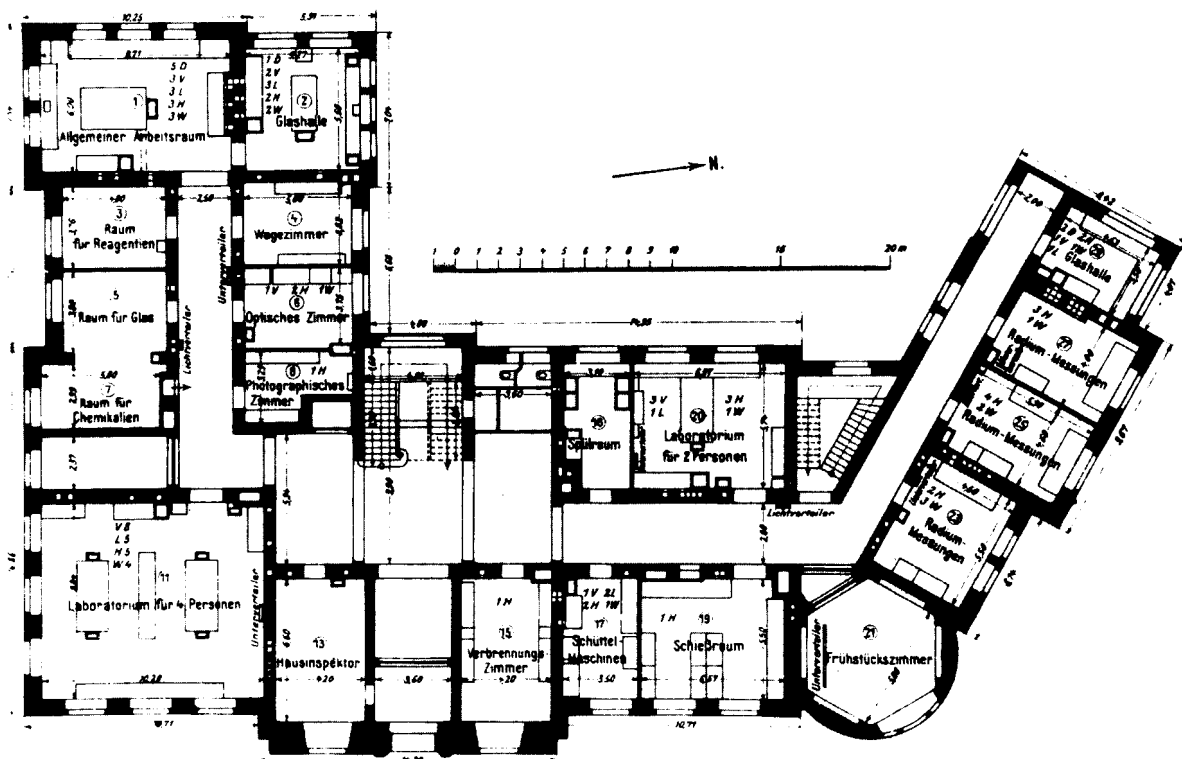


Abb. 4. Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem, Grundriß des Erdgeschosses. Im Raum 29 wurde mit den Neutronenquellen bestrahlt, im Raum 20 – *Hahns* „Privatlabor“ – chemisch gearbeitet und im Raum 23 die Radioaktivität gemessen; *Lise Meitners* Arbeitszimmer war der Raum zwischen 7 und 11, *Otto Hahns* Arbeitszimmer befand sich im 1. Stock (aus [55]).

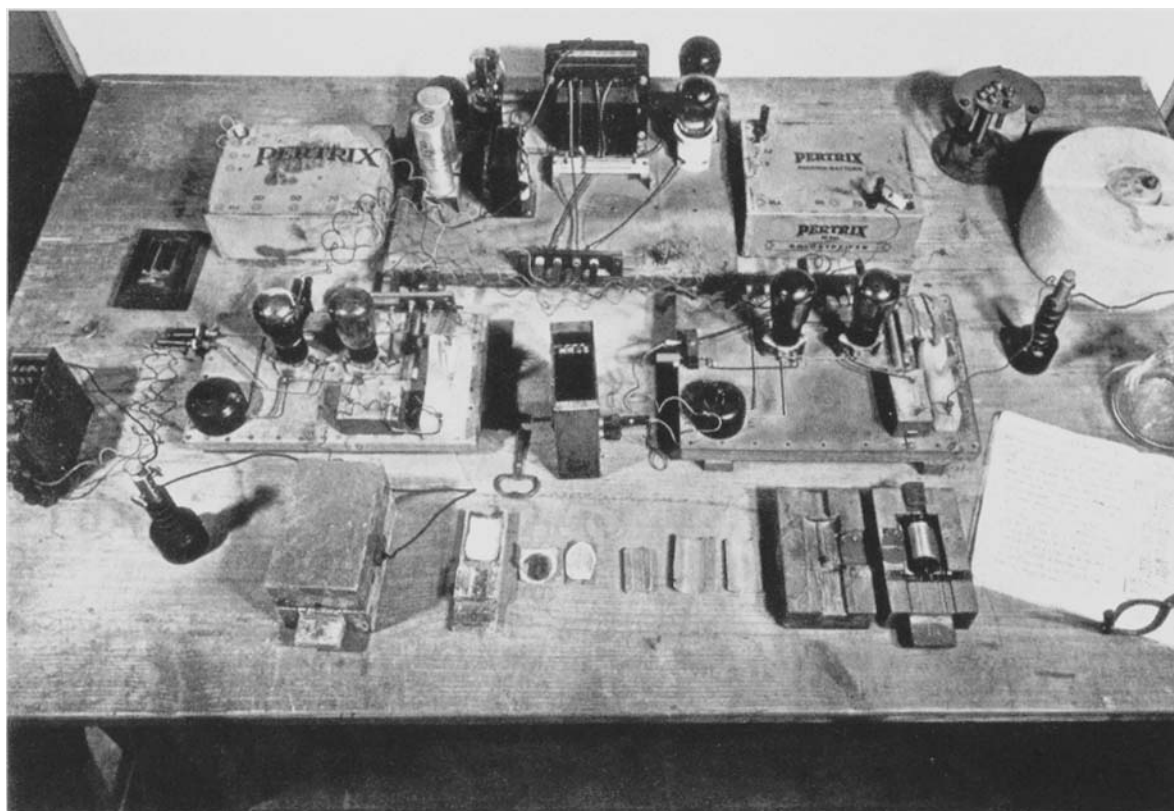


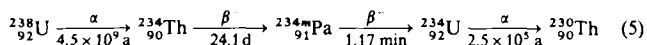
Abb. 5. Geräte des Berliner Teams, nun im Deutschen Museum in München: Geiger-Müller-Zählrohre (vorn), Impulsverstärker und Zählwerke (Mitte), Hochspannungsversorgung (hinten), Neutronenquelle und Paraffinblock (hinten rechts); weiteres im Text. Die hier zusammenstehenden Geräte waren über die Räume 20, 23 und 29 (Abb. 4) verteilt.

aus Radium in einem gesonderten Häuschen im Hof des Instituts wöchentlich frisch abgetrennt wird<sup>[56]</sup>. Wenn mit langsamen Neutronen bestrahlt wird, sind die Quellen in einem zylindrischen Paraffinblock, rechts oben, untergebracht, auf den die Probe gelegt wird. Der Fluß thermischer Neutronen beträgt etwa  $10^4$  Neutronen pro  $\text{cm}^2$  und s.

Rechts vorne auf dem Tisch steht schließlich noch – als kleiner Hinweis auf die so wichtigen chemischen Trennungen – eine Saugflasche zum schnellen Abfiltrieren radioaktiver Niederschläge. Schließlich erkennt man dort noch das historische Protokollheft „Chem. II“.

Wegen der Arbeiten auf sehr unterschiedlichen Aktivitätspegeln gibt es strenge Vorsichtsmaßnahmen gegen das Verschleppen von Radioaktivität, wodurch empfindliche Messungen auf die Dauer unmöglich würden. An den Türen der Gemeinschaftsräume, Toiletten und Korridore hängt Toilettenpapier, um damit die Klinken anzufassen. In Seminarraum und Bibliothek befinden sich helle und dunkle Stühle für die „stark“ und die „schwach“ radioaktiv Arbeitenden. Man gibt sich auch nicht die Hand, sondern begrüßt sich allenfalls durch Berühren der Spitzen der kleinen Finger. Arbeitstische werden mit saugfähigem Papier ausgelegt, wozu sich Makulaturware aus der Fahrplandruckerei der Reichsbahn bewährt, die billig zu bekommen ist. Nicht gespart wurde an der recht komfortablen internen Telefonanlage, die die Kommunikation ohne direkten Kontakt erleichtert.

Ein großes Problem ist die natürliche Radioaktivität des Urans. Um mit den schwachen Neutronenquellen statistisch hinreichende Zählraten der künstlichen Aktivitäten zu erhalten – etwa hundert Impulse pro Minute –, müssen zehn bis hundert Gramm Uran bestrahlt werden. Diese enthalten vier bis fünf Größenordnungen mehr natürliche Aktivität in der Zerfallsreihe (5).



Von dieser Reihe durchdringen die energiereichen  $\beta^-$ -Strahlen des 1.17min-Protactinium-234m die Aluminiummängel der Zählrohre. Man kann Protactinium-234 zwar zusammen mit seiner Muttersubstanz Thorium-234 vom Uran chemisch abtrennen, aber beide Aktivitäten bilden sich immer wieder nach; Uran muß deshalb unmittelbar vor dem Bestrahlen gereinigt werden<sup>[57]</sup>. Dazu wird es in Gegenwart von etwas Eisen mit Ammoniak-Ammoniumcarbonat gefällt und als Uranylcarbonatkomplex wieder gelöst; Thorium-234 und Protactinium-234 bleiben beim ausfallenden Eisenhydroxid. Aus dem Filtrat wird Ammoniumdiuranat abgeschieden; dieses wird in der Regel auch bestrahlt.

Je weiter man in Berlin mit der radiochemischen Analyse der aus Uran erzeugten radioaktiven „Körper“ vorankommt, je raffinierter die Trennmethode werden, desto komplexer wird das Bild. In den folgenden drei Jahren werden neue Transuran-Aktivitäten entdeckt<sup>[58, 59]</sup>, deren Bildungsreaktionen<sup>[57, 60, 61]</sup> und Strahlen<sup>[62]</sup> untersucht und das chemische Verhalten studiert<sup>[63]</sup>. Ausführlich dargestellt sind die Ergebnisse in zwei Publikationen<sup>[61, 63]</sup> vom Mai 1937, die dann in der letzten gemeinsamen Notiz<sup>[64]</sup>, wenige Tage vor Lise Meitners Flucht aus Deutschland eingereicht, noch durch einen neuen Körper, das 60d-Eka-Iridium, ergänzt werden.

Nun sieht das Schema der Transuranelemente wie in Abbildung 6 aus. Drei dem Uran zugeordnete  $\beta^-$ -Strahler gehen in zwei lange  $\beta^-$ -Zerfallsketten mit sieben Transuran-Aktivitäten über; eine Kette reicht bis zum Element 95, Eka-Iridium, die andere sogar bis Element 96, Eka-Platin. Für das dritte Uranisotop mit 23 min Halbwertszeit – die auffälligste Aktivität – wird kein Folgeprodukt gefunden,

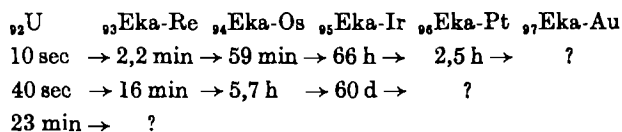


Abb. 6. Zerfallsreihen des Urans und der Transuranelemente, erzeugt durch Bestrahlen von Uran mit Neutronen; Stand vom Juni 1938 gemäß der letzten gemeinsamen Publikation von O. Hahn, L. Meitner und F. Straßmann [64].

obwohl es chemisch eindeutig als Uran und durch Nebelkammeraufnahmen als  $\beta^-$ -Strahler identifiziert ist<sup>[57]</sup> und somit in Element 93 zerfallen muß; da selbst in reinen Präparaten dieser Aktivität kein Zerfallsprodukt gefunden wird, vermuten Hahn et al. ein langlebiges Eka-Rhenium<sup>[63]</sup>. Alle Uranaktivitäten werden schließlich<sup>[61]</sup> demselben Isotop, Uran-239, zugeschrieben. Eine solche dreifache Kernisomerie, die sich noch dazu in den Folgeprodukten fortsetzt, ist freilich kaum zu verstehen; dies haben Meitner, Hahn und Straßmann sehr wohl gesehen<sup>[61]</sup>. Merkwürdig ist auch die Stabilität gegen  $\alpha$ -Zerfall, denn die Ketten laufen ja in ein Gebiet hinein, wo  $\alpha$ -Zerfall mehr und mehr vorherrschen sollte;  $\alpha$ -Strahler tauchen unter den „Transuranen“ jedoch nicht auf<sup>[65]</sup>. Diese Stabilität wird theoretisch dadurch erklärt<sup>[66]</sup>, daß die Transurankerne nicht kugelförmig, sondern gestreckt seien. Tatsächlich sind die Kerne in dieser Gegend derartig deformiert, wie sich viel später zeigt. Mit den um Größenordnungen stärkeren Neutronenflüssen am Cyclotron in Berkeley werden gleiche Ergebnisse erhalten, und es wird ein weiteres Produkt von 17 h Halbwertszeit zugefügt<sup>[65]</sup>. Auch mit energiereichen Neutronen entstehen im Uran mehrere  $\beta^-$ -Strahler<sup>[67]</sup>.

Jenes Schema der parallelen Zerfallsketten basiert auf verschiedenartigen Argumenten, die einander zu stützen und zu ergänzen scheinen. Da ist zunächst durch Nebelkammeraufnahmen<sup>[57, 62]</sup> der Nachweis, daß es sich wirklich um  $\beta^-$ -Strahler handelt. Genetische Zusammenhänge in den Ketten ergeben sich unmittelbar daraus, daß eine der Aktivitäten in einer chemisch isolierten Fraktion in eine andere Aktivität übergeht; so zerfällt 16min-Eka-Rhenium in 5.7h-Eka-Osmium<sup>[61]</sup> oder 66h-Eka-Iridium in 2.5h-Eka-Platin<sup>[63]</sup>. Aber auch wenn solche Zusammenhänge nicht unmittelbar nachweisbar sind, so müssen diejenigen Aktivitäten, die schon nach kurzer Bestrahlung vorliegen, vorn in den Zerfallsketten stehen; sie können nicht erst aus dem Zerfall späterer Glieder hervorgehen. Mit diesem Argument werden die 10s-, 40s-, 2.2min- und 16min-Aktivität dem Uran oder dem Eka-Rhenium zugeschrieben<sup>[61]</sup>. Ein weiteres Kriterium ist, wie sich die Neutronenenergie auf die Produktion der Aktivitäten auswirkt. Die beiden langen Zerfallsketten entstehen mit thermischen, langsamen und schnellen Neutronen ohne erkennbare Unterschiede, der 23min-Körper hingegen durch einen Resonanzeinfang von Neutronen mit 25 Elektronenvolt Energie<sup>[61]</sup>. Dabei ergeben sich für die drei Reihen Pro-

duktionsquerschnitte, die nur mit Uran-238 als Ausgangskern vereinbar scheinen, nicht aber mit den seltenen Urani-sotopen 235 und 234<sup>[61]</sup>; so kommt man zum Schluß, daß alle drei Reihen parallel vom Uran-239 ausgehen. Bei derartigen, mehr auf kernphysikalische Aspekte ausgerichteten Experimenten werden auch chemische Methoden herangezogen, um das Gemisch zu entwirren.

Vor allem aber stützt sich dieses Schema auf das chemische Verhalten der Aktivitäten, immer unter dem Aspekt, daß es sich um Uran, Eka-Rhenium und Eka-Platinelemente handele. Bei diesen chemischen Studien<sup>[63]</sup> wird eine Vielfalt von Verfahren verwendet, von Gruppentrennungen, welche alle vier Transurane oder die drei Eka-Platinelemente gemeinsam erfassen, bis zu Methoden, die als sehr spezifisch für einzelne Elemente gelten. Bei den Anfangs- wie bei den Endgliedern der Reihen sind solche chemischen Studien ziemlich durchsichtig. Die 16min-, 23min- und 59min-Körper dominieren nach kurzem Bestrahlen und sind dennoch langlebig genug, um auch kompliziertere chemische Operationen zu ermöglichen. Wird hingegen lange bestrahlt und gewartet, so bleibt fast nur noch die 66h-Aktivität mit ihrem 2.5h-Folgeprodukt übrig. Problematischer sind die mittleren Glieder wegen des komplexen Gemischs von zerfallenden und sich bildenden Aktivitäten. Auch erscheint es leichter, zwischen Uran, dem Eka-Rhenium und der Gruppe aller Eka-Platinelemente zu unterscheiden als die Eka-Platinelemente zu differenzieren.

Als besonders charakteristisch gilt die fast quantitative gemeinsame Mitfällung aller Transurane an Platinsulfid aus mittelstarker Salzsäure; dadurch können die Transurane von großen Uranmengen und starken Aktivitäten natürlicher Zerfallsprodukte befreit werden<sup>[63]</sup>. Diese Sulfidbildung ist, in der damaligen Sicht des Periodensystems, der wohl auffälligste Unterschied zwischen den Transuranen einerseits und Uran und Csuranen andererseits. Im Filtrat einer solchen Sulfidfällung läßt sich die 23min-Aktivität zusammen mit dem für Uran sehr charakteristischen, schwer löslichen Natriumuranylacetat abscheiden<sup>[63]</sup>. Wenn dieser Niederschlag rasch direkt aus bestrahltem Uran gefällt wird, ist eine noch schneller abklingende Aktivität zu sehen; so scheint auch die 40s-Aktivität als Uranisotop gesichert<sup>[63]</sup> – ein frühes Beispiel für schnelle radiochemische Trennungen komplexer Gemische.

Elektrochemisch erweist sich, wie erwartet, Eka-Rhenium als das unedelste Transuranelement, denn es läßt sich nicht – im Gegensatz zu den Eka-Platinelementen – aus Lösungen an Edelmetallblechen niederschlagen und auch nicht mit Bismut als Träger zum Metall reduzieren. Bei einigen Operationen können die Transurane regelrecht „gereiht“ werden. So fallen sie durch Natronlauge mit Uran als Träger in der Reihenfolge Eka-Os > Eka-Ir > Eka-Re > Eka-Pt aus, und wenn Rheniumsulfid aus starker Salzsäure gefällt wird, in der Reihenfolge Eka-Os > Eka-Re ≥ Eka-Ir > Eka-Pt. Gemeinsam ist den Transuranen auch, daß sie bei mäßigen bis höheren Temperaturen flüchtig sind, anders als Uran und die Csurane; wird ein Sulfidniederschlag an der Luft abgeröstet, nimmt die Flüchtigkeit vom Eka-Rhenium zum Eka-Platin zu; wird er vorher mit Königswasser behandelt, also chloriert, ist die Reihenfolge umgekehrt. Schließlich scheinen zwei sehr spezifische Reaktionen dieses ganze Schema noch einmal zu bekräftigen: Eka-Rhenium fällt zusammen mit Nitronperrhenat aus und Eka-Platin mit Ammoniumhexachloroplatinat; Element 93 scheint also eine dem Perrhe-

nat und Element 96 eine dem Hexachloroplatinat analoge Spezies zu bilden.

Hahn, Meitner und Straßmann<sup>[63]</sup> beenden den Bericht über die Chemie der Transurane damit, daß sie Ähnlichkeiten und Unterschiede zum Rhenium und zu den Platinmetallen erörtern. Die Ähnlichkeiten überwiegen, und die Trends scheinen sich plausibel fortzusetzen. Zweifel an ihrer Stellung im Periodensystem könne man wohl nicht mehr haben, und vor allem stehe ihre Verschiedenheit von allen bisher bekannten Elementen außerhalb jeder Diskussion<sup>[63]</sup>. Dies ist allerdings ein voreiliger Schluß; man kann sich eben nicht vorstellen, daß ein komplexes Gemisch leichter Elemente dies alles vortäuschen könne.

Namen für die Transuranelemente schlägt das Berliner Team nicht vor. Die römische Gruppe fühlt sich hingegen so bestätigt, daß sie die Namen Ausonium für 93 und Hesperium für 94 zu benutzen beginnt<sup>[3, 68]</sup>. Auch Enrico Fermi verwendet sie, als er am 10. Dezember 1938 den Nobel-Preis auch für die Synthese neuer Elemente entgegennimmt; der später veröffentlichten Fassung<sup>[69]</sup> des Vortrags fügt er, nobel, eine Fußnote an, daß nach dem Auffinden der Kernspaltung – wenige Tage nach dem Vortrag – alle Transurane überprüft werden müßten, denn es könne sich um Spaltprodukte handeln. Fermi kehrt nicht nach Italien zurück. Kurz vorher erscheint eine lange Übersicht über die Transurane<sup>[70]</sup>. Ja, sogar von einem Nachweis des Elements 93 in der Natur durch Röntgenspektroskopie wird erneut berichtet<sup>[71, 72]</sup>.

#### 1.4. Zwischenspiel: Radium aus Thorium?

Nicht nur Uran, sondern auch Thorium ist ein besonders interessanter Fall für die Aktivierung durch Neutronen. Hier geht es natürlich nicht um Transurane, die vom Thorium aus nicht erreichbar sein sollten; dennoch hat dieser Fall durchaus mit unserem Thema zu tun, wie sich noch herausstellen wird. Was die Radiochemiker hier fasziniert<sup>[73, 74]</sup>, ist der Zugang zur lange gesuchten  $(4n + 1)$ -Zerfallsreihe durch Reaktionen wie (6) und (7).



oder



In den drei radioaktiven Zerfallsreihen, die von Uran-238, Uran-235 oder Thorium-232 ausgehen, sind die Massenzahlen aller Glieder durch  $4n + 2$ ,  $4n + 3$  oder  $4n$  teilbar. Deshalb ist auch eine  $(4n + 1)$ -Reihe zu postulieren, die aber in der Natur nicht gefunden wird.

Experimentell muß man beim Bestrahlen von Thorium mit der ganzen  $4n$ -Zerfallsreihe mit ihren neun Gliedern fertig werden<sup>[75]</sup>. Selbst wenn Thoriumpräparate verwendet werden, die über viele Jahre immer wieder von Folgeprodukten befreit wurden<sup>[76]</sup>, so daß diese schließlich weitgehend ausgestorben sind, kann man umständliches Reinigen und zusätzliche Kontrollversuche nicht umgehen<sup>[73, 75, 78]</sup>.

Den Anfang machen wiederum Fermi et al.<sup>[2, 8]</sup>, die zwei  $\beta^-$ -Strahler von 1 min und 15 min Halbwertszeit finden und die letztgenannte Halbwertszeit bald auf 24 min korrigieren<sup>[36, 37]</sup>. Diese Aktivität zeigt charakteristische chemische



Eigenschaften des Thoriums; so fällt sie mit Thoriumfluorid und Thoriumperoxid aus, und sie kann von allen anderen Elementen zwischen Blei und Uran getrennt werden<sup>[37]</sup>. *Hahn und Meitner*<sup>[73]</sup> bestätigen die beiden Aktivitäten und finden ebenfalls, daß die längerlebige zum Thorium gehört. Da die kurzlebige Aktivität mit schnellen Neutronen gebildet wird, ordnen sie diese dem Radium-229 aus einem (n,  $\alpha$ )-Prozeß gemäß Reaktion (7) zu und meinen, daß eine weitere, von ihnen beobachtete 11min-Aktivität dessen Actinium-Folgeprodukt sein könne.

Doch bald wird die Situation komplexer, ähnlich wie beim Uran. *Irène Curie, Hans von Halban und Pierre Preiswerk* finden in Paris zunächst vier<sup>[74]</sup>, dann insgesamt fünf<sup>[79]</sup>  $\beta^-$ -Strahler, mit Halbwertszeiten von<sup>[80]</sup> 1 min, 2,5 min, 12 min, 25 min und 3,5h, die alle chemisch dem Thorium und seinen Nachbarn zugeordnet werden, die 3,5h-Aktivität beispielsweise dem Actinium, weil sie mit Lanthanfluorid zusammen ausfällt<sup>[80]</sup>. Schließlich kommt noch ein 42h-Actinium hinzu<sup>[78]</sup>. Ob man in Paris oder in Berlin die (4n + 1)-Reihe vermeintlich zuerst gefunden hat, bleibt kontrovers; hierin mag begründet sein, daß die Berliner Gruppe den folgenden Arbeiten der Pariser Gruppe sehr zurückhaltend gegenübersteht<sup>[10]</sup>.

Das Aktivitätsgemisch wird indes noch verwickelter. *Lise Meitner, Fritz Straßmann und Otto Hahn*<sup>[75]</sup> weisen nach, daß das 23min-Thorium durch einen Resonanzeinfang, also einen (n,  $\gamma$ )-Prozeß (6), entsteht und somit – korrekt – Thorium-233 ist. Als dessen Folgeprodukt identifizieren sie – ebenfalls korrekt – das 27d-Protactinium-233. Mit schnellen Neutronen finden sie gleich drei  $\beta^-$ -strahlende Radiumisotope (Abb. 7), darunter eines mit 0,8 min Halbwertszeit, die

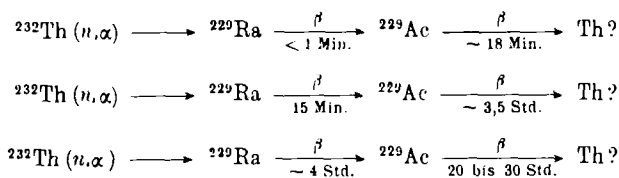


Abb. 7. Drei isomere Zerfallsreihen bei Radium und Actinium, die aus Thorium durch Bestrahlen mit schnellen Neutronen entstehen, nach *L. Meitner, F. Straßmann und O. Hahn* [75], Mai 1938.

alle chemisch als Radium identifiziert werden. Sie lassen sich mit drei Actiniumisotopen verknüpfen. Als Bildungsprozeß wird eine  $\text{Th}(n, \alpha)\text{Ra}$ -Reaktion (7) angenommen, obwohl (n,  $\alpha$ )-Reaktionen bis dahin nur bei leichten Elementen beobachtet worden sind<sup>[3]</sup>; man beruft sich<sup>[75]</sup> auf die  $\alpha$ -Instabilität des Thoriums bei seinem natürlichen Zerfall. Diese Interpretation scheint bestätigt zu werden durch eine Notiz<sup>[81]</sup> über das Auftreten energiereicher  $\alpha$ -Teilchen während des Bestrahleins von Thorium mit Neutronen, wohingegen die Suche nach solchen prompten  $\alpha$ -Teilchen in *Meitners* Abteilung erfolglos bleibt<sup>[82]</sup>. Mit wesentlich stärkeren Neutronenquellen werden die Aktivitäten des Berliner Teams bestätigt, und 24h-Thorium-231 wird als weiteres Umwandlungsprodukt zugefügt<sup>[83]</sup>. Da natürliches Thorium fast ausschließlich aus Thorium-232 besteht, müssen alle drei Radiumaktivitäten dem Radium-229 und die Tochterprodukte dem Actinium-229 zugeordnet werden, wie in Abbildung 7 angegeben ist. Diese vererbte, dreifache Kernisomerie ist,

wie die ähnliche Situation bei Uran (Abb. 6), freilich schwer zu verstehen<sup>[75]</sup>.

Heute beginnt die (4n + 1)-Reihe<sup>[84]</sup> bei Neptunium-237, das mit  $2,14 \times 10^6$  a Halbwertszeit in der Natur ausgestorben ist, und somit fehlt dort auch die ganze Reihe. Von den in jenen frühen Arbeiten richtig zugeordneten Nucliden kommt 27,0d-Protactinium-233 tatsächlich darin vor, nicht aber 22,3min-Thorium-233.

### 1.5. Paris 1937–1938: die 3,5-Stunden-Aktivität

Kommen wir nun wieder auf die künstlichen Aktivitäten aus Uran zurück! Auf das lästige Reinigen des Urans vor dem Bestrahlen kann man verzichten, wenn die energiereichen  $\beta^-$ -Strahlen des natürlichen Zerfallsprodukts Protactinium-234m beim Messen ausgeschaltet werden; dazu wird eine Kupferfolie aufgelegt, welche die Strahlen nicht mehr durchdringen können. Dann lassen sich freilich nur solche Aktivitäten beobachten, deren  $\beta^-$ -Strahlen noch energiereicher sind. *Irène Curie und Paul Savitch*<sup>[85]</sup> schauen sich im Sommer 1937 in Paris die in Uran erzeugten künstlichen Aktivitäten so an. Dabei zeigt sich – neben den bekannten 40s-, 2min- und 16min-Komponenten – eine neue Aktivität mit 3,5h Halbwertszeit, wie in Abbildung 8 zu sehen ist<sup>[86]</sup>.

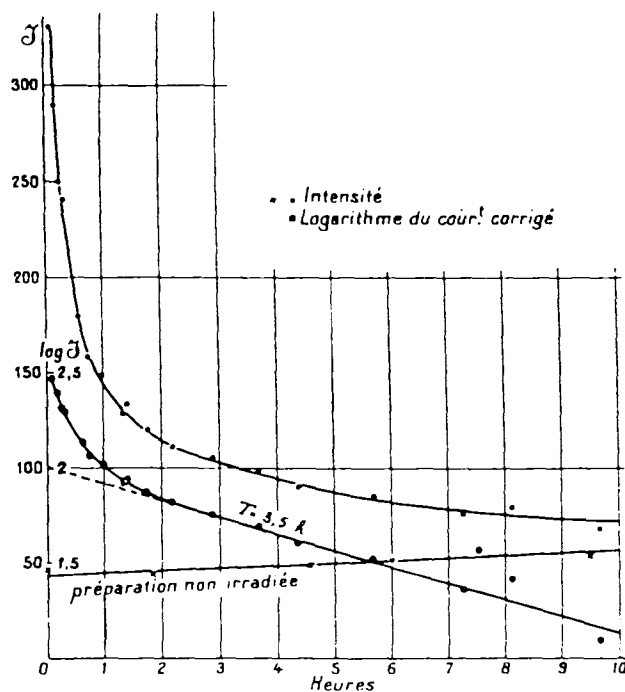


Abb. 8. Die 3,5h-Aktivität in mit Neutronen bestrahltem und direkt gemessenem Uran, publiziert von *I. Curie und P. Savitch* [86] in Paris im Juli 1938. Obere Kurve: durch ein  $0,48 \text{ g cm}^{-2}$  dickes Kupferblech gemessene Aktivität, linear gegen die Zeit aufgetragen; untere Kurve: Aufbau der natürlichen Zerfallsprodukte im Uran, ebenfalls linear aufgetragen; mittlere Kurve: Differenz der beiden Messungen, halblogarithmisch aufgetragen mit dem 16min-„Eka-Rhenium“ am Anfang, gefolgt von einem reinen Abfall mit 3,5h Halbwertszeit.

Die 3,5h-Aktivität ist auch ohne Absorberfolie zu erkennen, wenn der Aktivitätsverlauf in bestrahltem und in unbestrahltem Uran mit einer Kompensationsmethode genau verglichen wird. Daß eine ganz ähnliche Aktivität auch beim Bestrahlen von Thorium mit Neutronen auftritt<sup>[80]</sup>, wird nicht



wahrgenommen. Die 3.5h-Aktivität fällt nicht mit Sulfiden aus saurer Lösung aus<sup>[85]</sup>, und sie läßt sich somit von den bis dahin beschriebenen Transuranen trennen. Sie scheint mit dem natürlichen Zerfallsprodukt des Urans, Thorium-234, zu gehen. Diese Zuordnung zum Thorium aus einer Reaktion (8) kann in Berlin freilich bestätigt werden, wo erneut



– wie auch schon früher<sup>[61]</sup> – kein Thorium gefunden wird. Darüber werden die Pariser Forscher brieflich informiert, und ihnen wird vorgeschlagen, diese Ergebnisse zurückzuziehen<sup>[87]</sup>.

In einer folgenden Notiz korrigieren sich *I. Curie* und *Savitch*<sup>[88]</sup> tatsächlich, nachdem sie die 3.5h-Aktivität vom Thorium und auch vom Protactinium chemisch trennen können. Was sie nun berichten, ist jedoch noch erstaunlicher: In ihren chemischen Eigenschaften ähnele die Aktivität den Lanthanoiden; entweder sei sie Actinium, das höhere Homologe dieser Elementgruppe, oder ein neues Transuranelement mit ganz anderen chemischen Eigenschaften als Eka-Rhenium und die Eka-Platinelemente. In der nächsten Notiz<sup>[89]</sup> werden der 3.5h-Aktivität weitere Lanthanoideneigenschaften zugeschrieben, so die Fällbarkeit als Fluorid und Oxalat. *I. Curie* und *Savitch* entscheiden sich für die Hypothese eines neuen Transurans, obwohl diese schwierig zu verstehen sei; sie können nämlich die 3.5h-Aktivität vom Actinium chemisch trennen. Dazu wird die Aktivität mit Lanthan als Träger isoliert und mit natürlichem Radioactinium versetzt. Bei der fraktionsweisen Fällung von Lanthanoxalat geht der 3.5h-Strahler in die Kopffraktion, Actinium hingegen – wie erwartet – in die Schwanzfraktion.

Alle diese Ergebnisse werden, mit weiteren zusammen, in der folgenden Arbeit<sup>[86]</sup> ausführlich vorgelegt, die durch eine Notiz<sup>[90]</sup> über die maximale  $\beta^-$ -Energie der 3.5h-Aktivität, 3.2 MeV, ergänzt wird. *I. Curie* und *Savitch* bringen weitere chemische Belege, daß es sich nicht um Actinium handeln könne. Die Ähnlichkeit mit den Lanthanoiden wird so zusammengefaßt<sup>[86]</sup>: „Dans l'ensemble, les propriétés de  $R_{3,5h}$  sont celles du lanthane, dont il semble jusqu'ici qu'on ne puisse le séparer que par fractionnement“<sup>[\*]</sup>. Man ist versucht zu sagen, daß *I. Curie* und *Savitch* nur die zweite Satzhälfte hätten streichen müssen, und das Rätsel wäre gelöst gewesen; aber diese Fraktionierbarkeit war durchaus richtig beobachtet, wie wir noch sehen werden. Nach späterem Bekunden<sup>[91]</sup> erwägen *I. Curie* und *Savitch* sogar ein Zerbrechen des Urans in leichtere Elemente, verwerfen diesen Gedanken aber, weil die 3.5h-Aktivität und die Transurane, repräsentiert durch das 16min-Eka-Rhenium, auf veränderte Neutronenenergien völlig gleichartig ansprechen<sup>[86]</sup> und somit zusammenzugehören scheinen. So bleiben sie, nicht ohne zu zögern, bei ihrer Hypothese eines Transuranelements mit ganz anderen Eigenschaften, das vermutlich am Anfang dieser Elementreihe zu suchen sei<sup>[86]</sup>: „On pourrait imaginer, par exemple, que ce corps a le nombre atomique 93 et que les corps étudiés par *Hahn*, *Meitner* et *Strassmann* ont des nombres atomiques de 94 à 97“<sup>[\*\*]</sup>.

[\*] „Im großen und ganzen sind die Eigenschaften der 3.5h-Aktivität die des Lanthans, von dem man sie, wie es bisher scheint, nur durch Fraktionierung trennen kann.“

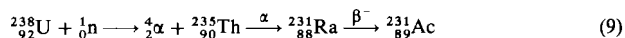
[\*\*] „Man könnte sich zum Beispiel vorstellen, daß dieser Körper die Ordnungszahl 93 hat und die von *Hahn*, *Meitner* und *Straßmann* untersuchten Körper die Ordnungszahlen 94 bis 97 haben.“

Das ist natürlich eine Herausforderung für die Berliner Gruppe. Nun endlich sind genügend Einzelheiten bekannt, um kritisch prüfen zu können, wie fundiert diese Ergebnisse sind. In Berlin werden sie skeptisch betrachtet, wie *Otto Hahn* auch *Frédéric Joliot – Irène Curies* Mann – sagt, als er ihn im Mai 1938 auf einem Kongreß in Rom trifft<sup>[10, 92]</sup>. Scherzhaft spricht man in Berlin vom „Curiosum“<sup>[76]</sup>.

## 2. Erdalkalimetalle aus Uran

### 2.1. Berlin, Herbst 1938: die „Radium“-Aktivitäten

Als jene ausführliche Publikation von *I. Curie* und *Savitch*<sup>[86]</sup> in der dritten Oktoberwoche 1938 erscheint, können *Hahn* und *Straßmann* die 3.5h-Aktivität sofort reproduzieren<sup>[93]</sup>. Als bester Weg, die Aktivität chemisch zu isolieren, wird in Paris deren Mitfällung am schwerlöslichen Kaliumlanthansulfat empfohlen. Dabei würde, so *Straßmanns* spontane Überlegung<sup>[48]</sup>, etwa vorhandenes Radium als Sulfat mitfallen und dann bei der späteren Fraktionierung in die Kopffraktion gelangen, wie für die 3.5h-Aktivität angegeben. Radium könnte entstehen, wenn ein durch  $\text{U(n, } \alpha)\text{Th}$ -Reaktion gebildetes Thorium sich durch  $\alpha$ -Zerfall umwandelt [Reaktion (9)].



Aus einem  $\beta^-$ -strahlenden Radium könnte schließlich Actinium hervorgehen. Ein  $\alpha$ -strahlendes Thorium hätte zuvor leicht übersehen werden können. Mit dieser Hypothese würden die merkwürdigen chemischen Eigenschaften der 3.5h-Aktivität auf bekannte, aber eben auf mehrere Elemente zurückgeführt. Von diesen Elementen läßt sich Radium eher identifizieren als ein lanthanähnliches Element; *Straßmann* schlägt vor<sup>[76, 94]</sup>, Radium nicht wie üblich am oberflächenreichen Bariumsulfat zu fällen, sondern zusammen mit Bariumchlorid, das aus konzentrierter Salzsäure in schönen, farblosen Nadeln besonders rein kristallisiert und auch rasch, nach Lösen in Wasser, umgefällt werden kann. Mit dieser eleganten Methode läßt sich Radium schnell und eindeutig fassen; allein Barium begleitet es.

*Hahn* und *Straßmann* werden sofort fündig, wie *Hahn* schon am 25. Oktober 1938 brieflich *L. Meitner* andeutet<sup>[93]</sup>. Nun beginnt der „Countdown“ zur Entdeckung der Kernspaltung, niedergelegt im Protokollheft „Chem. II“<sup>[96]</sup>, einer unscheinbaren, in Wachstuch gebundenen Kladde von etwa 18 × 24 cm Format mit 94 Blättern<sup>[\*]</sup>. Über die folgenden Ereignisse sind wir durch den Briefwechsel zwischen *Otto Hahn* und *Lise Meitner* ungewöhnlich gut informiert, der unter verschiedenen Aspekten ediert ist<sup>[97, 98]</sup>. Alles, was die beiden langjährigen Partner spontan bewegt, ist dort festgehalten, und die Antwort ist oft schon in zwei Tagen eingetroffen. Besonders aufschlußreich ist es, den wissenschaftlichen Teil der Briefe und die Protokolle in chronologischer Abfolge zu lesen<sup>[98]</sup>. *Hahn* drängt auf Erklärungen für die unerwarteten Befunde, *Lise Meitner* auf mehr Informationen. Dies alles geschieht in einer sehr bewegten Zeit, wie

[\*] Der Autor dankt *Ernst Berninger* für eine Kopie des Heftes „Chem. II“. Ein vorangehendes Heft „Chem. I“ scheint nicht mehr auffindbar zu sein. Die folgenden Hefte ab „Chem. III“ und die dazu gehörenden, größeren Kurvenblätter befinden sich im Landeshauptarchiv Koblenz, Nachlaß *Fritz Straßmann*.

besonders in *Hahns* autobiographischer Niederschrift von 1945<sup>[176]</sup> und, dramatisch verkürzt, in seinem Taschenkalender von 1938<sup>[199]</sup> deutlich wird. *Hahn* hatte sich auch schon vorher, als *Lise Meitner* noch in Berlin war, völlig abgekapselt<sup>[1101]</sup>; niemand im Institut erfährt, was sich nun anbahnt. Es ist die Zeit der Reichskristallnacht. Einige der ältesten Mitarbeiter des Instituts sind entschiedene Anhänger der Nationalsozialisten, andere, wie *Fritz Straßmann*, entziehen sich diesem Sog und nehmen dafür Nachteile in Kauf. Ein präsumtiver Nachfolger für den als politisch unzuverlässig geltenden *Hahn* ist schon im Haus. In dieser Atmosphäre muß *Lise Meitners* Eigentum gesichert werden. *Hahns* Frau *Edith* erkrankt psychisch schwer, und auch *Hahn* selbst fühlt sich manchmal völlig erschöpft. Die aufregenden Ergebnisse am Uran lenken ihn ab und retten die äußerst schwierige Situation<sup>[176]</sup>. Der zurückgezogene *Fritz Straßmann*, dem er auch politisch vertrauen kann, sorgt für den kontinuierlichen Fortgang der Experimente.

homologe Elemente Barium und Lanthan abgetrennt und mitgerissene „Transurane“ an Platinsulfid entfernt. Dazu werden 8 g Uran einen Tag lang mit verlangsamen Neutronen bestrahlt, in Salzsäure gelöst, und daraus wird Bariumchlorid gefällt. Aus dem umgefällten Bariumchlorid werden Platin als Sulfid und Lanthan als Hydroxid abgetrennt. Eine Hälfte der Barium-Radium-Fraktion wird sofort als Sulfat präpariert, die andere bleibt stehen, um Actinium nachzubilden, und wird dann in eine Barium-Radium- und eine Lanthan-Actinium-Fraktion geteilt.

Vor allem die Barium-Radium-Fraktionen sind aktiv. Die Zerfallskurven zeigen gleich drei Radiumisotope an, mit etwa 25 min, 110 min und mehreren Tagen Halbwertszeit, die mit drei Actinium-Folgeprodukten verknüpft scheinen, wie aus Abbildung 10 hervorgeht. Darüber berichten *Hahn*

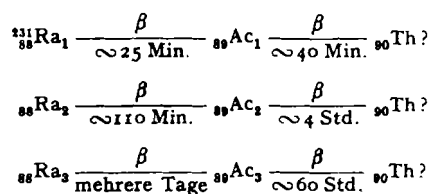


Abb. 10. Drei Radiumisomere und ihre Actinium-Folgeprodukte in der Bariumfraktion aus mit Neutronen bestrahltem Uran, Notiz von *O. Hahn* und *F. Straßmann* [104], November 1938.

und *Straßmann*<sup>[104]</sup> bald in einer Notiz. Alle drei Radiumaktivitäten werden Radium-231 zugeschrieben, so daß erneut eine vererbare Dreifachisomerie angenommen wird, wie bei den aus Thorium isolierten, dem Radium-229 zugeordneten Aktivitäten (vgl. Abb. 7). Daß die Halbwertszeiten beide Male ziemlich ähnlich sind, fällt offenbar noch nicht auf, vermutlich weil verschiedene Radiumisotope postuliert werden. Ganz ungewöhnlich ist auch, daß die (n, α)-Reaktion (9) am Uran schon mit langsamen Neutronen eintritt<sup>[104]</sup>; so etwas wird zum ersten Male gefunden.

Details über diese Aktivitäten geben *Hahn* und *Straßmann*<sup>[105]</sup> in ihrer folgenden Arbeit, die am 22. Dezember 1938 bei den „Naturwissenschaften“ eingereicht wird. Deren Redakteur, *Paul Rosbaud*, erkennt die Signifikanz einiger am Ende mitgeteilter Ergebnisse und erreicht, daß die Arbeit bereits im nächsten Heft am 6. Januar 1939 erscheint. Aber zunächst einmal handeln vier der fünf Druckseiten von interessanten, aber nicht eben spektakulären Ergebnissen, und es fällt nur auf, daß im Titel „Erdalkalimetalle“ steht statt, wie in der Kurzmitteilung, „Radium“. Im Text steht dann wieder „Radium“, wenn auch häufig in Anführungszeichen, so auch in den Zerfallsketten (Abb. 11), die jetzt noch etwas

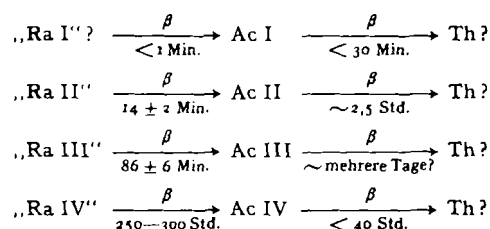


Abb. 11. Dieselben Zerfallsketten wie in Abbildung 10 aus der ausführlichen Publikation von *O. Hahn* und *F. Straßmann* [105] vom 22. Dezember 1938, nun ergänzt und mit den Radiumsymbolen in Anführungszeichen.

2.  
Weiterprüfung des „Cu-Sa“ auf Ra-Ac.  
2 x 4,5 g U werden am 21. 5. 1938 mit 10<sup>10</sup> n-Strahlung bestrahlt.  
Dann wird das U. in 200 cm 10% jenseitig gelöst (Alkohol) u.  
mit 100 mg Ba<sup>2+</sup> versetzt. Das Ba<sup>2+</sup> wird mit HCl gefällt, gewaschen,  
gelöst u. nochmals mit HCl gefällt. Das geringste BaCl<sub>2</sub>-Menge wird in HCl gelöst, mit 10 mg Pb u. etwas HCl versetzt u.  
dann wird Pb mit HCl gefällt u. gewaschen.  
Zusätzliches PbCl<sub>2</sub>-Niederschlag werden es nachgegeben.  
Die mit HCl gefällten werden. Der Pb-Niederschlag wird noch  
einmal umgefällt, um ihn von Blei von PbCl<sub>2</sub> u. Ba<sup>2+</sup>  
zu befreien u. dann gewaschen. Das Filtrat des 1. Pb-Nieder-  
schlags wird in 2 Gefäßen geteilt, deren einer sofort mit  
HNO<sub>3</sub> gefällt wird (nach dem Aufwässern). Der Niederschlag wird  
gewaschen. Die andere Hälfte der Ba-Lösung wird eingedampft  
und auf ~ 3 Std. mit HCl gefällt. Der BaCl<sub>2</sub>-Niederschlag wird  
gewaschen. Das Filtrat wird in 2. Pb-Niederschlag mit HNO<sub>3</sub>  
gewaschen, der nach dem Umfällen ebenfalls gewaschen  
wird.

Abb. 9. Beginn des Protokollhefts „Chem. II“ von *O. Hahn* und *F. Straßmann* [103]: Chemischer Trennungsgang für eine „Weiter Prüfung des „Cu-Sa“ auf Ra-Ac“ am 1. November 1938, eingetragen von *F. Straßmann*; Isolierung einer Radiumfraktion aus bestrahltem Uran durch Fällen von Bariumchlorid aus starker Salzsäure. „Cu-Sa“ steht für die 3.5h-Aktivität von *I. Curie* und *P. Savitch* [86].

„Chem. II“ beginnt am 1. November 1938 mit der in Abbildung 9 wiedergegebenen Eintragung<sup>[103]</sup>. Um „Cu-Sa“, die 3.5h-Aktivität von *I. Curie* und *Savitch*, auf Radium und Actinium zu prüfen, werden aus bestrahltem Uran deren

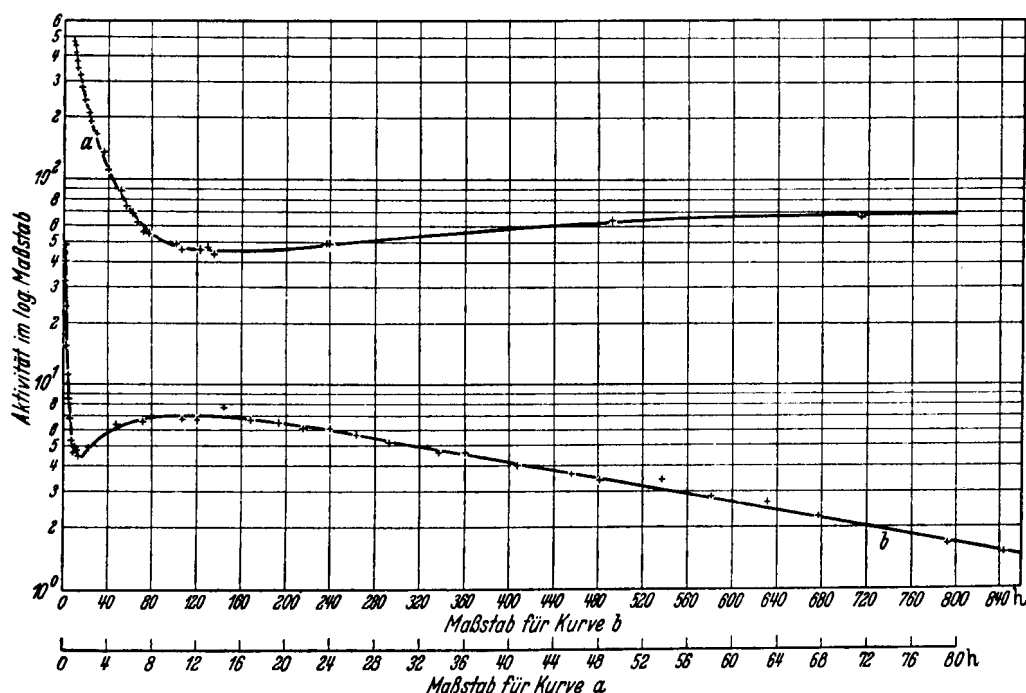


Abb. 12. Eine der Zerfallskurven aus derselben Arbeit [105] wie Abbildung 11: Die drei Radiumisotope nach viertägiger Bestrahlung; gemessene Aktivität logarithmisch gegen die Zeit aufgetragen (Kurve b) und Anfangsteil mit zehnfach gespreizter Zeitachse (Kurve a). Der anfängliche Abfall stammt hauptsächlich vom 86min-„Ra III“, der folgende Anstieg von der Nachbildung des 40h-„Ac IV“ aus dem langlebigen 12d-„Ra IV“, das dann den späteren Abfall bestimmt.

ergänzt sind. Alle diese Aktivitäten werden nun durch Zerfallskurven belegt, die nach unterschiedlichen Bestrahlungs- und Abtrennzeiten erhalten werden. Abbildung 12 gibt ein Beispiel dafür. Der chemische Trennungsgang wird ausführlich diskutiert, und es wird unterstrichen, daß die mit den Bariumsalzen abgeschiedene Aktivität nur vom Radium herühren könne, „wenn man das Barium selbst als allzu unwahrscheinlich vorerst außer Betracht läßt“<sup>[105]</sup>, wie es am Anfang des Textes noch heißt.

## 2.2. Berlin, 17. Dezember 1938: radiochemischer Nachweis von Barium

Der Paukenschlag kommt erst ziemlich am Ende der Arbeit<sup>[105]</sup>; man würde ihn wohl kaum in einer Publikation vermuten, die mit „Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle“ betitelt ist. *Hahn* und *Straßmann* kommen auf einige neuere Untersuchungen zu sprechen, die sie nur zögernd veröffentlichen. Sie haben sich nämlich entschlossen, noch rigoroser zu beweisen, daß Radium vorliegt. Wie das zu geschehen hat, ist seit *Marie Curies* Zeiten bekannt<sup>[106]</sup>; Werden bestimmte Bariumsalze wie das Chlorid fraktionsweise kristallisiert, so reichert sich Radium in den Kopffractionen an und kann, durch vielfaches Wiederholen, sogar rein gewonnen werden. *Hahn* hatte diese Methoden während seiner Lehrzeit in London bei *Ramsay* kennengelernt<sup>[76, 107]</sup> und damit seinen ersten radioaktiven Körper entdeckt<sup>[109]</sup>, das 1.9 a-Thorium-229, damals Radiothor genannt. Noch bis in die dreißiger Jahre war das Studium solcher Mitfällungen eines seiner Arbeitsgebiete.

Wahrscheinlich werden diese Kontrollexperimente durch die Skepsis angeregt, die von Theoretikern gegen die ver-

erbaren Isomeren vorgebracht werden<sup>[13]</sup>. Die Kernisomerie ist damals bereits korrekt als Kernspineffekt erkannt<sup>[110]</sup> – große Spinunterschiede behindern den Übergang angeregter Kernzustände in die Grundzustände –, aber daß ein solcher Effekt über ganze Zerfallsketten hinweg erhalten bleibt, gilt als sehr unwahrscheinlich. Deshalb wird, ausgehend von der Idee deformierter Transurankerne<sup>[66]</sup>, eine andere Art von Isomerie diskutiert<sup>[111]</sup>, nämlich daß es verschieden stark verformte Kerne mit denselben Protonen- und Neutronenzahl geben könne, die sich auch in ihren Halbwertszeiten unterscheiden. Diese Formisomerie wird viel später bei den echten Transuranen tatsächlich entdeckt<sup>[112 – 115]</sup>, und zwar über deren spontane Kernspaltung. Ein zweiter Punkt, der auf Skepsis stößt<sup>[116]</sup>, ist die Bildungsreaktion, die offenbar von manchen als eine ganz ungewöhnliche, sukzessive Abspaltung zweier  $\alpha$ -Teilchen gesehen wird<sup>[13, 117]</sup>, [vgl. (10)],



obwohl *Hahn* und *Straßmann*<sup>[104]</sup> ausdrücklich auf ein oder mehrere  $\alpha$ -strahlende Thoriumisotope als Zwischenstufe hinweisen. *Hahn* selbst hat sich aber manchmal auch im Sinne der  $(n, 2\alpha)$ -Reaktion geäußert<sup>[48, 116]</sup>. Maßgebend für *Hahn*<sup>[76, 117]</sup> sind wohl vor allem die Bedenken, die er am 13. und 14. November 1938 in Kopenhagen hört, wo er *Niels Bohr* zu einem Vortrag besucht; dabei trifft er<sup>[99]</sup> auch *Lise Meitner* und deren Neffen *Otto Robert Frisch*, der als Experimentalphysiker in *Bohrs* Institut arbeitet. Aber auch im Berliner Institut werden Bedenken laut<sup>[118]</sup>, mit theoretischen Argumenten und weil prompte  $\alpha$ -Teilchen einer  $(n, \alpha)$ -Reaktion beim Bestrahlen von Uran mit Neutronen nicht beobachtet werden<sup>[82]</sup>.

*Hahn* gibt indes später auch einen trivialeren Grund für die Fraktionierungen<sup>[46, 94, 117]</sup>: Da in den dicken Barium-

Während der Fällung wird die Mischkristallbildung des „Ra“ mit Ba Salzen  
in Folge nachfolgenden aus Ac-La-Niederschlag.

8,5 g Uran werden in Salzsäure gelöst und mit 1 g Ba Salzen versetzt.  
 am 25. 11. 1938 11<sup>30</sup> Abkühlung, dann wird man in der Lösung  
 des gelösten ~ 1 g Ba als BaCl<sub>2</sub> mit HCl gefällt. Die Uran-  
 fällung wird rein reaktiv in einem befruchteten auf Ac-La reaktiv.  
 versetzt. [Unter BaCl<sub>2</sub> Niederschlag wird gelöst in Salzsäure  
 Kupfer in. Kupfer reaktiv mit HCl reaktiv bis zur beginnenden  
 Fällung. dann wird abgekühlt in die Abkühlung nach dem  
 Abkühlen gemessen (ist nicht so wie BaCl<sub>2</sub> auf). die Abkühlung  
 gemessen Abkühlung kommen für Lösung gemessen in. man  
 auf gemessen Lösung befruchteten Abkühlung der Lösung fraktioniert  
 gefällt. der Rest des Ba wird als BaCl<sub>2</sub> gefällt in.  
 Abkühlung gemessen. für 1. alle Ba-Niederschläge werden in  
 ~ 100 cm H<sub>2</sub>O gelöst in. gemessen mit H<sub>2</sub>O 1/2 des gefällten  
 in gemessen. da keine Ac-Abkühlung vorhanden man  
 man, muß der 1. BaCl<sub>2</sub> Niederschlag des auf dem Gefäß  
Ba aufkühlung des aufkühlung.

Abb. 13. Erste chemische Fraktionierung der Radiumaktivität aus bestrahltem Uran mit Barium als Trägerelement am 25. November 1938 [119]: Anfang des Chemieprotokolls zu „Weitere Versuche über die Mischkristallbildung des „Ra“ mit Ba Salzen u. Suche nach Folgeprodukten aus Ac-La-Niederschlag“, eingetragen von F. Straßmann. Aus der Lösung des bestrahlten Urans in Salzsäure wird Bariumchlorid gefällt, dieses wieder in Wasser gelöst und durch Abkühlen erneut, nun in Fraktionen, gefällt. Nach kurzem Messen werden die Niederschläge zu Bariumcarbonat umgearbeitet. Man beachte im Titel bei Ra die Anführungsstriche.

präparaten die  $\beta^-$ -Strahlen vor allem der langlebigsten der neuen Aktivitäten stark absorbiert werden, sollte durch das Anreichern des „Radiums“ in einem kleinen Anteil des Bariums die Zählhausbeute verbessert werden. Gemeint ist die langlebige 12d-Komponente in Abbildung 12, die nur durch die Nachbildung der 40h-Tochtersubstanz sichtbar wird.

Die erste Fraktionierung geschieht am 25. November 1938. Abbildung 13 zeigt das Protokoll dieses bestechend einfachen Experiments<sup>[119]</sup>. 8,5 g Uran werden über Nacht bestrahlt, in starker Salzsäure gelöst und mit 1 g Barium-Ionen versetzt. Das Barium wird als Chlorid gefällt, und der Niederschlag wird wieder in Wasser gelöst. Nach Zusatz von Salzsäure wird Bariumchlorid nun durch Abkühlen portionsweise gefällt. Die Bariumniederschläge werden zunächst nacheinander gemessen und nach knapp zwei Stunden zu Bariumcarbonat umgearbeitet, wie am Ende des Protokolls zu lesen ist. Zudem werden weitere Elemente isoliert, worauf hier nicht eingegangen werden soll.

Die Meßdaten für die jeweils erste Messung der drei Bariumchloridniederschläge sind in Abbildung 14 zusammengestellt. Die vorletzte Spalte gibt die korrigierten Zählraten. Diese setzen sich beim Übergang von einer auf die nachfolgende Fraktion im Rahmen der Meßgenauigkeit stetig fort. Die Halbwertszeit beträgt etwa 40 Minuten, das

1. H<sub>2</sub>O 2, 350 mg, H<sub>2</sub>O 2

2

2. 27. 11. 5

25. 11. 1938	0	23 270			aufgrund (150)		mit 12 <sup>10</sup>
	1	23 155	385/1	385	402	387	55
	3	24 455	500/6	400	420	405	3
	5	25 211	756/6	178	501	380	9
	7	25 949	738/6	369	388	373	11
12 <sup>10</sup>	9	26 637	688/6	344	358	343	13
	11	27 304	667/6	333	347	332	15
	13	27 938	634/2	317	327	312	17
	15	28 550	612/6	306	315	300	19

26. H<sub>2</sub>O 2, 350 mg, H<sub>2</sub>O 2

2

2. 27. 11. 12

25. 11. 1938	0	28 600			aufgrund (150)		mit 12 <sup>10</sup>
	1	28 940	340/1	340	335	340	20 <sup>14</sup>
	3	29 550	610/6	305	315	298	22 <sup>14</sup>
	5	30 142	592/6	296	301	286	24 <sup>14</sup>
	7	30 743	601/6	300	310	295	26 <sup>14</sup>
12 <sup>10</sup>	9	31 276	533/6	267	270	255	28 <sup>14</sup>
	11	31 853	607/6	303	311	296	30 <sup>14</sup>
	13	32 990	1110/4	279	286	274	32 <sup>14</sup>
	15	33 766	768/6	266	—	221	34 <sup>14</sup>

36. H<sub>2</sub>O 2, 350 mg

2

2. 27. 11. 27

25. 11. 1938	0	33 850			[15.]		mit 12 <sup>10</sup>
	2	34 290	440/2	220	205		16 <sup>14</sup>
	4	34 678	380/2	190	179		18
12 <sup>10</sup>	6	35 066	380/2	194	179		19
	8	35 448	372/2	186	176		20
12 <sup>10</sup>	10	35 818	365/2	185	168		21

Abb. 14. Auszüge aus den Meßdaten des Fraktionierungsexperiments vom 25. November 1938 [119]: Erster Hinweis, daß die „Radium“-Isotope aus Uran sich nicht wie Radium verhalten, weil sie sich nicht in der Kopffraktion anreichern lassen. Zusammengestellt sind die jeweils ersten Messungen gleicher Mengen der drei aufeinander folgenden Bariumchloridfraktionen, mit dem gleichen Zähler (Z.27) auf verschiedenen Schiffchen (Sch) vorgenommen. Die Spalten enthalten von links nach rechts: 1 Datum, 2 Uhrzeit, 3 laufende Zeit in Minuten, 4 Zählwerksstand, 5 Differenz der Zählwerksstände und Meßdauer in Minuten, 6 Zählrate in Impulsen pro Minute, 7 Zählrate korrigiert für Zählverluste, 8 Zählrate nach Abzug des Nulleffekts von 15,0 Impulsen/min, 9 – am rechten Rand – normierte laufende Zeit. Während dieser insgesamt 43 min klingt die Aktivität – eine Mischung von „Radium“ II und III – über alle drei Fraktionen stetig ab, ohne zwischen den aufeinander folgenden Fraktionen sprunghaft abzunehmen, wie für Radium erwartet wird. Die chemischen Angaben stammen von Hahns Hand, die anderen Eintragungen von Irmgard Bohne, Clara Lieber und F. Straßmann.

heißt, hauptsächlich liegen die kurzlebigen Körper „Radium“ II und III vor. Eine sprunghafte Abnahme zwischen der ersten und zweiten und dann wieder zwischen der zweiten

Indikatorversuch: Ra III - Msth 1<sup>11</sup> J. 16. 7.

15,5 Uran wird um 16. II. abends bis 17. II. Morgens ~ 8 Uhr bestrahlt. Dann 2 1/2 Stunden das „Ra II“ (14 Min.) zerfallen lassen. Dann das Polonium-Ra II. prüfen, also bei an Ac I ~ Ac II, hergestellt. Dieses mit einer hinreichenden Menge vorher von Th B + C und Rdth befreiten Menge von Jodur 1 versetzt, alles gemeinsam mit H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Ba Br<sub>2</sub> ~ 2 g Ba - fraktioniert. Konzentration der Säure bei den Fraktionen bleibt ungefähr gleich.

Während der Fraktionierung zerfällt ein Teil des Polonium-Ra II. Dagegen wird das Jodur 1 in einem Reaktor für an Jodur 2 bei den Fraktionen erhalten.

Das die Verteilungen für die 2 Stoffe etwas verschieden. Bei den Jodur 1 macht dies aber nichts aus, da die Löslichkeit vernachlässigbar ist.

Die Aktivität von Ra III - Polonium 1 auf die erste

Bestimmung zugezogen für alle!

Abb. 15. Entdeckung der Kernspaltung in Berlin am 17. Dezember 1938: Der Indikatorversuch „Ra III - Msth 1“; Vergleich des Verhaltens von künstlichem und natürlichem Radium bei der fraktionierenden Kristallisation von Bariumbromid. In ganzen acht Zeilen beschreibt Otto Hahn den chemischen Ablauf [126]: „15,5 [g] Uran wird am 16. XII. Abends bis 17. XII. Morgens ~ 8 Uhr bestrahlt. Dann 2 1/2 Stunden das „Ra II“ (14 Min.) zerfallen lassen. Dann das 86 Min-Ra III frisch, also frei von Ac I und Ac II, hergestellt. Dieses mit einer hinreichenden Menge vorher von Th B + C und Rdth befreiten Menge von Msth 1 [= 5.8 a-Radium-228] versetzt, alles gemeinsam mit BaBr<sub>2</sub> [-] ~ 2 g Ba - fraktioniert. Konzentration der Säure bei den Fraktionen blieb ungefähr gleich“.

und dritten Fraktion ist nicht zu erkennen: Das „Radium“ hat sich nicht, wie eigentlich erwartet, in der ersten Fraktion angereichert. Ein Kommentar dazu findet sich im Protokoll nicht, aber immerhin ist das „Ra“ in der Überschrift, Abbildung 13, in Anführungszeichen gesetzt, freilich nicht in den folgenden Protokollen und auch nicht im Briefwechsel Hahn-Meitner.

Die nächste Fraktionierung wird am 28. November versucht<sup>[120]</sup>, diesmal mit dem 86min-„Ra III“ und mit Bariumbromid, das Radium stärker anreichert als das Chlorid. Wegen der längeren Halbwertszeit können die Fraktionen jetzt abwechselnd gemessen und die Zählraten so genauer verglichen werden. Wiederum bleibt die Aktivität über vier Fraktionen gleichförmig verteilt. Auch der dritte Anlauf am 6. bis 8. Dezember<sup>[121]</sup>, erneut mit dem Bromid, nun aber dem langlebigen „Ra IV“, gibt dasselbe Bild.

In einer ersten Hypothese wird das unerwartete Verhalten des Radiums den extrem geringen Konzentrationen zugeschrieben, die weit niedriger sind als zu jener Zeit, als die Fraktionierung von Radium mit wesentlich weniger empfindlichen Meßgeräten studiert wurde. Hahn beginnt<sup>[76]</sup>, im „aktiven“ Labor im 1. Stock Radium in Mengen zu fraktionieren, wie sie früher üblich waren. Als dann auf die Mengen der künstlichen Isotope herabgegangen wird, zeigt sich kein Unterschied - alles läuft wie gewohnt<sup>[46, 76]</sup>.

Indikatorversuch: Ra III - Ba Br<sub>2</sub>  
Ra III - Msth 1<sup>11</sup> J. 16. 7.

17. 12. 38

17. 12. 38	0	7:13:58	[126]	hull 10:45
2	7:15:52	164/8.82	60.1	10:45
6	7:18:55	323/4.81	65.1	10:45
10	7:21:50	285/4.71	55.1	10:45
14	7:24:10	440/6.73	52.1	10:45
18	7:26:51	901/12.75.1	59.2	10:45
22	7:29:53			10:45
26	7:32:11	658/10.85.8	49.4	10:45
30	7:34:54			10:45
34	7:37:00	346/6.57.7	60.2	10:45
38	7:39:36	376/6.62.7	60.2	10:45
42	7:42:02			10:45
46	7:44:57	355/6.59.2	52.1	10:45
50	7:47:55	318/6.53.0	52.1	10:45
54	7:50:17			10:45
58	7:52:55	338/6.58.3	58.8	10:45
62	7:55:22	367/6.61.2		10:45
66	7:57:45			10:45
70	8:00:12	1157/20.57.9	42.2	10:45
74	8:02:47			10:45
78	8:05:12	735/12.61.3		10:45
82	8:07:32	1245/10.62.0	46.3	10:45
86	8:09:51			10:45
90	8:12:15	1004/13.77.1	60.2	10:45
94	8:14:41			10:45
98	8:17:05	1534/18.85.2	67.9	10:45
102	8:19:34			10:45
106	8:21:54	1630/20.81.5	65.8	10:45
110	8:24:10			10:45
114	8:26:31	419/1.50.83.8	67.1	10:45

Abb. 16. Meßdaten für die erste von drei Bariumbromidfraktionen aus dem Indikatorversuch Radium III - Mesothorium 1, mit 500 mg BaBr<sub>2</sub> aufgenommen am 17. Dezember 1938 von 11:18 bis 19:41 Uhr, mit einigen Messungen des Anstiegs von Mesothorium 2 aus Mesothorium 1 bis zum 21. Dezember [127]. Die Spalten enthalten von links nach rechts: 1 Datum, 2 Uhrzeit, 3 laufende Zeit in Minuten, 4 Zählwerksstand, 5 Differenz der Zählwerksstände und Meßdauer in Minuten, 6 Zählrate in Impulsen pro Minute, 7 Zählrate nach Abzug des Nulleffekts, 8 normierte laufende Zeit. „K8, K16“ sind nachträglich hinzugefügte Hinweise auf die zugehörigen Kurvenblätter. Die Eintragungen stammen von I. Bohne, O. Hahn, C. Lieber und F. Straßmann.

Die Auswertung (siehe Kurven-Blatt und beiliegende Zettel)  
Ergebnis Fraktion I : II : III } für Msth 1 : 6  
für Msth 66 : 24,5 : 11 } für Ra III 1 : 1,2 : 1  
für Ra III ~ 80 : 70 : 65-70 bei schlecht stimmenden Kurven!

Abb. 17. Otto Hahns Fazit aus dem Indikatorversuch Radium III - Mesothorium 1 vom 17. Dezember 1938 am Ende des Meßblatts der dritten Bariumbromidfraktion [129].

„Die Auswertung (siehe Kurven-Blatt und beiliegende Zettel)  
ergibt Fraktion I : II : III } für Msth 1 : 6  
für Msth 66 : 24,5 : 11 } für Ra III 1 : 1,2  
für Ra III ~ 80 : 70 (-80) : 65-70 bei schlecht stimmenden Kurven!“

Nun gibt es nur noch einen konsequenten Schritt zu tun: das chemische Verhalten der künstlichen und der natürlichen Radiumisotope direkt zu vergleichen - der berühmte Indikatorversuch von Otto Hahn und Fritz Straßmann am 17. Dezember 1938, einem Samstag<sup>[122]</sup>. Verglichen wird das 86min-„Radium“ aus Uran mit dem natürlichen Radium-228, Mesothorium-1. Dieses langlebige Radiumisotop,

wie in den anderen

[.....] Mittendurch arbeiten ich, und arbeitet Straßmann unermüdlich

an den Messungen, unterstützt von Lieber und Bohne. Es ist jetzt fast 11 Uhr Abends;  
um 1/4 12 will Straßmann wiederkommen, so daß ich nach Hause kann allmählich.

Es ist nämlich etwas bei den „Radiumisotopen“, was so merkwürdig ist, daß wir es vorerst  
nur Dir sagen. ~~Wissen~~ Die Halbwertszeiten der drei Isotope sind recht genau sicher  
gestellt, sie lassen sich von allen Elementen außer Barium trennen, alle Reaktionen  
stimmen. Nur eine nicht – wenn nicht höchst seltsame Zufälle vorliegen: die  
Fraktionierung funktioniert nicht. Unsere Ra-isotope verhalten sich wie Ba.

Die Ursache dieses scheinbar widersprüchlichen und Gegen zu dem, was ich  
vorige Woche mit ThX<sup>124</sup> fraktioniert, ist uns noch nicht bekannt. Dann haben  
Straßmann + ich am Samstag eines unserer Ra-Isotope mit Msth 1 als Indikator fraktioniert

Es lief alles nach Programm, entsprechend, unser Ra nicht. Es kam noch  
ein höchst merkwürdiger Zufall vorliegen. Das lassen sich trennen wie in den anderen Fällen  
sehen: unsere Ra-isotope verhalten sich nicht wie Ra, sondern wie Ba. Wie gesagt,  
andere z.B. Th-Xenon, u, Th, Sc, Fe, Pb, Bi, Po trennen nicht in Folge.

Da habe ich vorerst keinen Verdacht, daß es in <sup>meiner</sup> ThX<sup>124</sup> liegt. Vielleicht kommt  
das irgend eine chemische Reaktion vorliegen. Wie kann das sein, daß es eigentlich  
nicht ein Ra-Isotop ist. [.....]

Abb. 18. Otto Hahn berichtet Lise Meitner am Abend des 19. Dezembers 1938 über den Nachweis von Barium in bestrahltem Uran; Auszug aus  
Seite 2 des Briefes [130]. Transkription im Text.

Halbwertszeit 5.8a, bildet kurzlebige 6.1h-Actinium-228, Mesothorium-2, nach. Radium-Actinium-228 war Hahns erste wichtige Entdeckung in Berlin gewesen<sup>[123 – 125]</sup>. Das Experiment ist im Prinzip einfach, und das Protokoll des chemischen Teils ist entsprechend kurz<sup>[126]</sup>; Abbildung 15 gibt es wieder. Wiederum wird Bariumbromid fraktionsweise gefällt.

Schon am Abend desselben Tages ist das künstliche „Radium“ in den drei Bariumbromidfraktionen wieder abgeklungen; dann wird noch über einige Tage der Anstieg des Actiniums-228 verfolgt, bis sich das radioaktive Gleichgewicht mit dessen Muttersubstanz Radium-228 eingestellt hat. Abbildung 16 zeigt die Meßdaten für die erste Fraktion von 500 mg Bariumbromid<sup>[127]</sup>; Faksimiles der anderen beiden Meßblätter findet man anderswo<sup>[128]</sup>. Das Fazit – Abbildung 17 – zieht Hahn<sup>[129]</sup> am Ende des Meßblattes für die dritte Bariumbromidfraktion und noch kürzer im Taschenkalender:<sup>[99]</sup> „Indikatorversuch Msth 1 + unser Ra III. Ra III reichert sich nicht an. Msth 1 stark!“.

Am Abend des folgenden Montags, dem 19. Dezember, berichtet er Lise Meitner<sup>[130]</sup>: „Zwischendurch arbeite ich,

soweit ich dazu komme, und arbeitet Straßmann unermüdlich an den Urankörpern, unterstützt von Lieber und Bohne<sup>[\*]</sup>. Es ist jetzt gleich 11 Uhr Abends; um 1/4 12 will Straßmann wiederkommen, so daß ich nach Hause kann allmählich. Es ist nämlich etwas bei den „Radiumisotopen“, was so merkwürdig ist, daß wir es vorerst nur Dir sagen. Die Halbwertszeiten der drei Isotope sind recht genau sichergestellt; sie lassen sich von allen<sup>[\*\*]</sup> Elementen außer Barium trennen; alle Reaktionen stimmen. Nur eine nicht – wenn nicht höchst seltsame Zufälle vorliegen: Die Fraktionierung funktioniert nicht. Unsere Ra-isotope verhalten sich wie Ba. Wir kriegen keine eindeutige Anreicherung mit BaBr<sub>2</sub> oder Chromat etc. Nun habe ich vorige Woche im 1. Stock ThX [= <sup>224</sup>Ra] fraktioniert; das ging genau wie es sollte. Dann haben Straßmann + ich am Samstag eines unserer „Ra“-Isotope mit Msth 1 als Indikator fraktioniert. Das Mesothor wurde programmäßig angereichert, unser Ra nicht. Es könnte noch ein höchst merkwürdiger Zufall vor-

[\*] Clara Lieber war eine amerikanische Gastwissenschaftlerin, Irmgard Bohne war Laborantin am Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie.

[\*\*] Hervorhebungen wie im Original.

# Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle .

O. HAHN und F. STRASSMANN

22. Dezember 1938

Nun müssen wir aber noch auf einige neuere Untersuchungen zu sprechen kommen, die wir der seltsamen Ergebnisse wegen nur zögernd veröffentlichten. Um den Beweis für die chemische Natur der mit dem Barium abgeschiedenen und als „Radium-isotope“ bezeichneten Anfangsglieder der Reihen über jeden Zweifel hinaus zu erbringen, haben wir mit den aktiven Bariumsalzen fraktionierte Kristallisationen und fraktionierte Fällungen vorgenommen, in der Weise, wie sie für die Anreicherung (oder auch Abreicherung) des Radiums in Bariumsalzen bekannt sind. Bariumbromid reichert das Radium bei fraktionierter Kristallisation stark an, Bariumchromat bei nicht zu schnellem Herauskommen der Kriställchen noch mehr. Bariumchlorid reichert weniger stark an als das Bromid, Bariumkarbonat reichert etwas ab. Entsprechende Versuche, die wir mit unseren von Folgeprodukten gereinigten aktiven Bariumpräparaten gemacht haben, verliefen ausnahmslos negativ: Die Aktivität blieb gleichmäßig auf alle Bariumfraktionen verteilt, wenigstens soweit wir dies innerhalb der nicht ganz geringen Versuchsfehlermöglichkeiten angeben können. Es wurden dann ein paar Fraktionierungsversuche mit dem Radiumisotop  $\text{ThX}$  und mit dem Radiumisotop  $\text{MsTh}_2$  gemacht. Sie verliefen genau so, wie man aus allen früheren Erfahrungen mit dem Radium erwarten sollte. Es wurde dann die „Indikatorenmethode“ auf ein Gemisch des gereinigten langlebigen „ $\text{RaIV}$ “ mit reinem, radiumfreiem  $\text{MsTh}_2$  angewandt: das Gemisch mit Bariumbromid als Trägersubstanz wurde fraktioniert kristallisiert. Das  $\text{MsTh}_2$  wurde angereichert, das „ $\text{RaIV}$ “ nicht, sondern seine Aktivität blieb bei gleichem Bariumgehalt der Fraktionen wieder gleich. Wir kommen zu dem Schluß: Unsere „Radiumisotope“ haben die Eigenschaften des Bariums; als Chemiker müßten wir eigentlich sagen, bei den neuen Körpern handelt es sich nicht um Radium, sondern um Barium;

denn andere Elemente als Radium oder Barium kommen nicht in Frage.

Schließlich haben wir auch einen Indikatorversuch mit unserem rein abgeschiedenen „ $\text{AcII}$ “ (H.Z. rund 2,5 Stunden) und dem reinen Actiniumisotop  $\text{MsTh}_2$  gemacht. Wenn unsere „ $\text{Ra}$ -Isotope“ kein Radium sind, dann sind die „ $\text{Ac}$ -Isotope“ auch kein Actinium, sondern sollten Lanthan sein. Nach dem Vorgehen von Mme CURIE<sup>1</sup> haben wir eine Fraktionierung von Lanthanoxalat, das die beiden aktiven Substanzen enthält, aus salpetersaurer Lösung vorgenommen. Das  $\text{MsTh}_2$  fand sich, wie von Mme CURIE angegeben, in den Endfraktionen stark angereichert. Bei unserem „ $\text{AcII}$ “ war von einer Anreicherung am Ende nichts zu merken. In Übereinstimmung mit CURIE und SAVITCH<sup>2</sup> über ihren allerdings nicht einheitlichen 3,5-Stunden-Körper finden wir also, daß das aus unserem aktiven Erdalkalimetall durch  $\beta$ -Strahlenemission entstehende Erdmetall kein Actinium ist. Den von CURIE und SAVITCH angegebenen Befund, daß die Aktivität im Lanthan anreichtert, der also gegen eine Gleichheit mit Lanthan spricht, wollen wir noch genauer experimentell prüfen, da bei dem dort vorliegendem Gemisch eine Anreicherung vorgetäuscht sein könnte.

<sup>1</sup> Mme PIERRE CURIE, J. Chim. physique etc. 27, 1 (1930).

<sup>2</sup> I. CURIE u. P. SAVITCH, C. r. Acad. Sci. Paris 206, 1643 (1938).

Ob die aus den „ $\text{Ac-La}$ -Präparaten“ entstehenden, als „Thor“ bezeichneten Endglieder unserer Reihen sich als Cer herausstellen, wurde noch nicht geprüft.

Was die „ $\text{Trans-Urane}$ “ anbelangt, so sind diese Elemente ihren niedrigeren Homologen Rhenium, Osmium, Iridium, Platin zwar chemisch verwandt, mit ihnen aber nicht gleich. Ob sie etwa mit den noch niedrigeren Homologen Masurium, Ruthenium, Rhodium, Palladium chemisch gleich sind, wurde noch nicht geprüft. Daran konnte man früher ja nicht denken. Die Summe der Massenzahlen  $\text{Ba} + \text{Ma}$ , also z. B.  $138 + 101$ , ergibt 239!

Als Chemiker müßten wir aus den kurz dargelegten Versuchen das oben gebrachte Schema eigentlich umbenennen und statt  $\text{Ra}$ ,  $\text{Ac}$ ,  $\text{Th}$  die Symbole  $\text{Ba}$ ,  $\text{La}$ ,  $\text{Ce}$  einsetzen. Als der Physik in gewisser Weise nahestehende „Kernchemiker“ können wir uns zu diesem, allen bisherigen Erfahrungen der Kernphysik widersprechenden, Sprung noch nicht entschließen. Es könnten doch noch vielleicht eine Reihe seltsamer Zufälle unsere Ergebnisse vorgetäuscht haben.

Es ist beabsichtigt, weitere Indikatorenversuche mit den neuen Umwandlungsprodukten durchzuführen. Insbesondere soll auch eine gemeinsame Fraktionierung der aus Thor durch Bestrahlen mit schnellen Neutronen entstehenden, von MEITNER, STRASSMANN und HAHN<sup>1</sup> untersuchten Radiumisotope mit unseren aus dem Uran entstandenen Erdalkalimetallen versucht werden. An Stellen, denen starke künstliche Strahlenquellen zur Verfügung stehen, könnte dies allerdings wesentlich leichter geschehen.

Zum Schluß danken wir Frl. CL. LIEBER und Frl. I. BOHNE für ihre wirksame Hilfe bei den sehr zahlreichen Fällungen und Messungen.

<sup>1</sup> L. MEITNER, F. STRASSMANN u. O. HAHN, l. c.

Die Naturwissenschaften

Heft 1.  
6. I. 1939

Abb. 19. Letzte drei Spalten aus der ersten historischen Publikation von Otto Hahn und Fritz Straßmann [105] mit der noch zögernden Bekanntgabe der Kernspaltung, bei den „Naturwissenschaften“ eingereicht am 22. Dezember 1938 und erschienen am 6. Januar 1939. Die nicht zu diesem Teil gehörenden Abbildungen sind herausgenommen, und der Umbruch ist leicht verändert. Hervorhebungen vom Autor. Das „vorerst“ (am Anfang des Textes, hier nicht abgebildet; vgl. Ende von Abschnitt 2.1) sowie der Absatz „Was die ... ergibt 239!“ wurden bei der Fahrenkorrektur [139] am 27. Dezember 1938 durch Hahn eingefügt, und im Absatz „Als Chemiker ... vorgetäuscht haben“ wurde „Erfahrungen“ anstelle von „Gesetzen“ geschrieben: Gesetze waren es eben nicht gewesen.

liegen. Aber immer mehr kommen wir zu dem schrecklichen Schluß: Unsere  $\text{Ra}$ -isotope verhalten sich nicht wie  $\text{Ra}$ , sondern wie  $\text{Ba}$ . Wie gesagt, andere Ele[mente],  $\text{Trans-Urane}$ ,  $\text{U}$ ,  $\text{Th}$ ,  $\text{Ac}$ ,  $\text{Pa}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Bi}$ ,  $\text{Po}$  kommen nicht in Frage. Ich habe mit Straßmann verabredet, daß wir vorerst nur *Dir* dies sagen wollen. Vielleicht kannst Du irgendeine phantastische Erklärung vorschlagen. Wir wissen dabei selbst, daß es eigentlich nicht in  $\text{Ba}$  zerplatzen kann“. Dieser Teil des Briefes ist in Abbildung 18 wiedergegeben. Hahn kündigt an, daß noch geprüft werden soll, ob sich die aus dem „Radium“ entstehenden „Actinium“-Isotope wie Lanthan verhalten.

Dieses Experiment<sup>[132]</sup> läuft schon, als der Brief geschrieben wird. Das 40h-„Actinium IV“ wird aus dem langlebigen „Radium IV“ isoliert, das in den Bariumpräparaten vom 17. Dezember noch vorhanden ist, und mit natürlichem Actinium-228 und mit Lanthanträger gemischt. Bei der Fraktionierung von Lanthanoxalat aus salpetersaurer Lösung reichert sich das natürliche Actinium, wie erwartet, stark in der Endfraktion an, das „Actinium IV“ aus Uran verteilt sich hingegen gleichförmig: Es ist Lanthan.

Alle diese Ergebnisse werden in den letzten drei Spalten von Hahn und Straßmanns erster historischer Arbeit<sup>[105]</sup> dargeboten, die in Abbildung 19 zusammengestellt sind. Noch zögern sie in einer viel zitierten Textpassage „Als Che-

miker ... als Kernchemiker“, anstelle von Radium, Actinium und Thorium die Elemente Barium, Lanthan und Cer zu setzen. Dabei sind die Ergebnisse über diese Spaltprodukte erstaunlich gut; vergleicht man die Zerfallsketten in Abbildung 11 mit dem heutigen Stand, Abbildung 20, war alles korrekt gefunden; lediglich die Kette II muß später nochmals in zwei ähnliche Ketten aufgeteilt werden. Daß die Bariumaktivitäten aus kurzlebigen Caesium- und Xenonvorläufern hervorgehen, stellt sich sehr bald heraus.

Selten wohl ist ein so bedeutsames Ergebnis so versteckt und mit so viel Untertreibung vorgelegt worden wie dieses. Manche der nachfolgenden Arbeiten aus anderer Hand lesen sich dann auch so, als hätten Hahn und Straßmann gar nicht recht bemerkt, was sie da gefunden hatten. Und auch in jüngster Zeit wird die These vertreten<sup>[134]</sup>, erst durch Lise Meitners zustimmenden Kommentar sei Hahn ermutigt worden, das Zerbrechen in zwei Kerne deutlich zu formulieren. Indessen schreibt er schon im Brief vom 19. Dezember (Abb. 18) von einem „Zerplatzen“.

Daß die Entdeckung der Kernspaltung so eigenartig präsentiert wird, läßt sich indes durch die Eile erklären, in der jenes Manuskript<sup>[105]</sup> entsteht. Wie Hahn später erläutert<sup>[135]</sup>, geht er von einem schon weitgehend fertigen Text über die Radiumisotope aus, einer ausführlichen Publika-



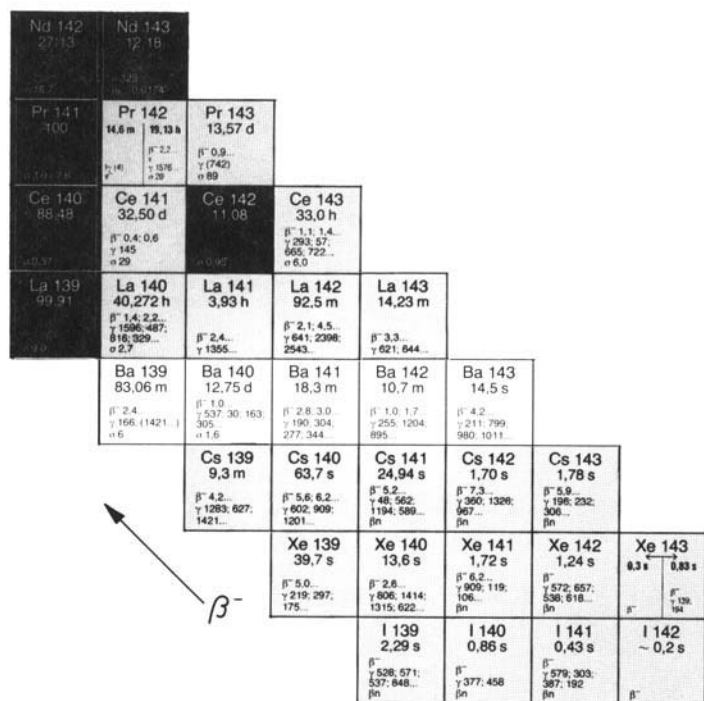


Abb. 20. Die historischen Barium-Lanthan-Zerfallsketten und ihre Vorläufersysteme in heutiger Sicht [133]. „Ra III“ ist Barium-139, und „Ra-Ac IV“ sind Barium-Lanthan-140; das „Ra-Ac II“ hat sich später als komplex, Barium-Lanthan-141 gemischt mit Barium-Lanthan-142, herausgestellt; daß es noch ein ganz kurzlebiges „Ra I“ gibt, stimmt ebenfalls. Der  $\beta^-$ -Zerfall läuft diagonal von rechts unten nach links oben bei konstant bleibender Massenzahl; stabile Nuclide sind schwarz gezeichnet.

tion dessen, was zuvor<sup>[104]</sup> kurz mitgeteilt war. Die Ergebnisse der Indikatorversuche werden am Ende angefügt. Man erwägt zwar, schon im Titel „Barium“ statt ursprünglich „Radium“ zu setzen, aber dann hätte das ganze Manuskript umgeschrieben werden müssen; „Erdalkalimetalle“ zu wählen, ist ein Ausweg<sup>[135]</sup>. Zum weitgehenden Umarbeiten bleibt keine Zeit, denn die Mitarbeiter sind ab 21. Dezember für zwei Wochen in den Weihnachtsferien; so lange kann man angesichts der Pariser Konkurrenz nicht warten. Die Beweise für Barium statt Radium werden am 21. und 22. Dezember zusammengeschrieben, und das Manuskript wird von Rosbaud am 22. abends für die „Naturwissenschaften“ abgeholt<sup>[99]</sup>. Die Eile läßt langes Feilen und Argumentieren nicht zu, und so unterlaufen merkwürdige Unstimmigkeiten: Im gedruckten Text steht, die Indikatorversuche seien mit dem „langlebigen Ra IV“ und mit „Ac II (H. Z. rund 2,5 Stunden)“ gemacht worden, wie man in Abbildung 19 nachlesen kann; verwendet wurden aber das 86min-„Radium III“, wie aus dem Protokoll, Abbildungen 15 bis 17, hervorgeht, und<sup>[132]</sup> das 40h-„Actinium IV“. Dazu findet sich später nirgends ein Kommentar.

Hahn informiert Lise Meitner am 21. Dezember über die Absicht, rasch zu publizieren, und kündigt eine Kopie des Manuskripts an<sup>[136]</sup>. Er reicht dieses ein, ohne abzuwarten, was Lise Meitner zu den unerwarteten Ergebnissen – sein Brief vom 19. Dezember – sagen wird. Ihre Antwort<sup>[137]</sup> erreicht ihn am 23. Dezember<sup>[138]</sup>; sie schreibt ihm, die Annahme eines so weitgehenden Zerplatzens scheine ihr vorläufig sehr schwierig, aber in der Kernphysik hätte man so viele Überraschungen erlebt, daß man auf nichts ohne weiteres sagen könne, es sei unmöglich. Durch die jahrelange gemein-

same Arbeit kennt Lise Meitner die Treffsicherheit radiochemischer Methoden in einem so klassischen System wie Radium-Barium, und so ist sie geneigt, eher kernphysikalische Dogmen fallen zu lassen, als diese Ergebnisse anzuzweifeln<sup>[134]</sup>. Sie fragt auch nach den Transuranen, und dies mag Hahn dazu gebracht haben, am gleichen Tag, als er das Manuskript noch etwas verbessert<sup>[99]</sup>, einen kurzen Absatz „Was die ... ergibt 239!“ zu formulieren, der bei der Korrektur am 27. Dezember eingefügt wird<sup>[139]</sup>. Hierin wird angedeutet (siehe Abb. 19), daß es sich bei den Transuranen um niedrigere statt um höhere Homologe des Rheniums und der Platinmetalle handeln könne, denn die Summe der Massenzahlen von Barium und Masurium ergäbe 239, die Ausgangsmasse. Hier also ist klar ein Zerbrechen in zwei große Kerne angesprochen, und nicht etwa ein Zerplatzen in viele Kerne. Das Argument ist freilich problematisch, was Hahn durchaus sieht<sup>[139]</sup>, denn nicht auf die Massenbilanz kommt es an, sondern auf die Kernladungsbilanz: Zum Barium, Element 56, gehört Krypton, Element 36, als komplementäres Bruchstück, und nicht „Masurium“, Element 43. Richtig ist der Verdacht, hinter den „Transuranen“ könnten sich leichtere Homologe verbergen, Element 43 statt Eka-Rhenium zum Beispiel.

Die Meßkurven des Indikatorexperiments vom 17. Dezember erscheinen erst in der zweiten historischen Arbeit von Otto Hahn und Fritz Straßmann<sup>[140]</sup>, die am 28. Januar 1939 eingereicht wird. Jetzt sagt der Titel schon deutlich, worum es geht: „Nachweis der Entstehung aktiver Bariumisotope aus Uran und Thorium durch Neutronenbestrahlung“. Chemie und Meßdaten werden mit den richtigen Isotopen eingehend beschrieben und diskutiert. Abbildung 21 A zeigt, wie die Radioaktivität der drei Bariumbromidfractionen zunächst abfällt, dann wieder auf ein Plateau unterschiedlicher Höhe zunimmt; Kurve I gibt die Meßdaten aus dem Protokoll (Abb. 16) wieder. Aus Abbildung 21 B geht hervor, wie dieser Anstieg von Actinium-228 im Radiumindikator Radium-228 korrigiert wird. Abbildung 21 C zeigt schließlich den so erhaltenen Anfangsverlauf: drei aufeinanderfallende Zerfallsgeraden für das 86min-Barium III. Man versteht jetzt auch, weshalb Hahn mit den Kurven nicht ganz zufrieden ist, wie er im Protokoll (Abb. 17) vermerkt, denn die letzten Meßpunkte für Fraktion I und III in Abbildung 21 C liegen deutlich über den Geraden.

Diese Publikation enthält indessen noch sehr viel mehr: „The experiments described in Hahn and Strassmann's 'second' paper rank among the most careful and unambiguous ever carried out in radiochemistry“<sup>[141]</sup>. Nun spielen Hahn und Straßmann ihre ganze radiochemische Könnerschaft aus; zwischen dem 4. Januar, als die Arbeit im Kaiser-Wilhelm-Institut wieder aufgenommen wird<sup>[142]</sup>, und der Niederschrift jener zweiten Publikation wird eine Fülle von Ergebnissen erarbeitet. Die Fraktionierungen werden mit anderen Aktivitäten und anderen Bariumsalzen wiederholt: Das 86min-Barium III wird mit dem natürlichen Thorium X, 3.7d-Radium-224, gemischt und als Chromat fraktioniert; dies glückt ungewöhnlich gut, denn während das natürliche Radium in der ersten gegenüber der zweiten Fraktion auf das 19.5fache angereichert ist, stimmen die Bariumaktivitäten genau überein. Dasselbe wird mit langlebigem Barium IV und Radium-224 wiederholt. Schließlich wird Barium IV noch durch einen Kreislaufversuch geschickt, eine Folge von Bariumpräparaten: Chlorid, Succinat, Nitrat, Carbonat,

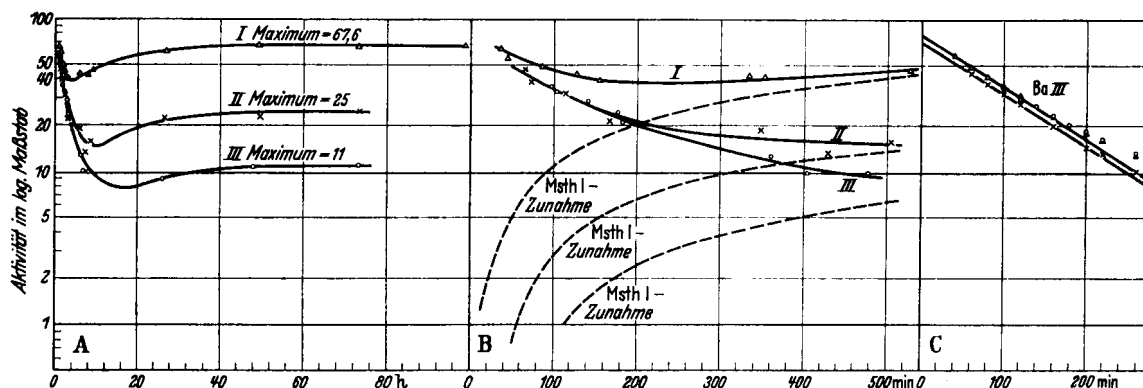


Abb. 21. Meßkurven der Radioaktivität in den drei Bariumbromidfraktionen I, II, III aus dem Indikatorversuch Barium III – Mesothorium 1 vom 17. Dezember 1938, publiziert in der zweiten historischen Arbeit von *Otto Hahn* und *Fritz Straßmann* [140] vom 28. Januar 1939. Aufgetragen ist die Zählrate, logarithmisch, gegen die Zeit. Teil A zeigt die Rohdaten (vgl. Protokoll für Fraktion I in Abb. 16). Nach einem anfänglichen Abfall biegen die Kurven in einen Anstieg um, bis das radioaktive Gleichgewicht zwischen dem Indikator Mesothorium 1, 5,8 a-Radium-228, und seinem sich nachbildenden Folgeprodukt Mesothorium 2, 6,1h-Actinium-228, erreicht ist; in diesem Teil unterscheiden sich die Meßkurven erheblich, weil der Radiumindikator in der Reihenfolge Fraktion I > II > III angereichert ist. In Teil B ist dargestellt, wie dieser Anstieg abgezogen wird. Danach ergibt sich Teil C mit drei aufeinander fallenden Zerfallsgeraden für den Anfangsteil, das Barium III, 86min-Barium-139. Dessen Aktivität ist gleichförmig auf die drei Fraktionen verteilt, im Gegensatz zum natürlichen Radium. Auf diesen Kurven basiert das in Abbildung 17 wiedergegebene Fazit.

wieder Chlorid, Eisen(III)-Mannit, nochmals Chlorid; die Aktivität gleicher Mengen Barium bleibt auch hier unverändert. Experimentierfreude, und nicht etwa – wie behauptet wird<sup>[134]</sup> – Unsicherheit haben wohl zu diesen Variationen geführt. *Lise Meitners* Kommentar<sup>[143]</sup> drückt dies aus: „Euere Versuche stellen eine wunderbar geschlossene Beweiskette dar und es ist fabelhaft, was Ihr in diesen kurzen Wochen alles gemacht habt.“

Das 15min- und das 4h-„Radium“ aus Thorium (Abb. 7) werden mit dem Indikator Radium-224 zusammen als Bariumchromat fraktioniert und so ebenfalls als Barium erkannt; auch Thorium ist somit spaltbar<sup>[140]</sup>. Damit sind die „Radium“-Zerfallsketten aus Thorium nun richtig gedeutet. Für Barium III aus Uran wird, korrekt, die Massenzahl 139 angegeben und für Barium IV die Massenzahl 140 vermutet. Ob die Bariumisotope aus Uran und aus Thorium identisch sind, wird trotz der ähnlichen Halbwertszeiten noch offen gelassen.

Vor allem aber wird nach zu Barium komplementären Bruchstücken des Urans in der Gegend von Krypton gesucht<sup>[140]</sup>, das sich durch  $\beta^-$ -Zerfall in Rubidium, Strontium und Yttrium umwandeln könnte; darauf weisen auch *Lise Meitner* und *Otto Robert Frisch*<sup>[144]</sup> hin, wovon *Hahn* durch einen Vorabdruck erfährt, als entsprechende radiochemische Experimente gerade begonnen sind<sup>[145]</sup>. Durch Fälen des schön kristallisierenden Strontiumnitrats mit rauchender Salpetersäure wird Strontium isoliert und daraus Yttrium abgetrennt; beide sind aktiv. Ein radioaktives Edelgas wird gefunden, das in ein ebenfalls aktives Alkalimetall zerfällt; ob es sich um Krypton und Rubidium oder um Xenon und Cäsium handelt, bleibt zunächst offen. In der „Transuranfraktion“ wird nach Palladium, Element 46, gesucht, das beim Zerbrennen des Urankerns in zwei gleich große Bruchstücke entstehen sollte; es wird jedoch ebenso wenig gefunden wie das Nachbarlement Silber. Damit ist die merkwürdige Asymmetrie der Uranspaltung, das Zerbrennen in ein leichteres und ein schwereres Fragment, bereits sichtbar, ein Phänomen, das Experimentatoren und Theoretiker noch viel beschäftigen sollte. Produkte symmetrischer Spaltung in gleich große Fragmente werden erst später<sup>[146]</sup> nach Beschuß mit energiereichen Neutronen nachgewiesen.

Natürlich wird auch diskutiert, was von den früheren Transuranen zu halten sei. Diese Frage wird im nun intensiven Schriftwechsel *Hahn-Meitner*<sup>[97, 98]</sup> mit wechselnden Standpunkten – und nicht ohne Verstimmung zwischen beiden – immer wieder angeschnitten. Für *Lise Meitner* ist sie besonders wichtig<sup>[134]</sup>, denn wenn alle Transurane sich als Spaltprodukte herausstellen würden, ist ihre Arbeit der letzten Jahre verloren, ohne daß sie an einer Entdeckung noch höheren Rangs teilhaben kann. Der Gedanke<sup>[105]</sup>, die „Transurane“ könnten niedere Homologe des Rheniums und der Platinelemente sein, wird aufgrund weiterer chemischer Experimente und Überlegungen zunächst wieder verworfen und geäußert, daß die „Transurane“ bestehen bleiben<sup>[140]</sup>. Wir kommen noch darauf zurück.

### 3. Bestätigung der Kernspaltung

#### 3.1. Physikalische Experimente und theoretische Deutungen

*Lise Meitner* und *Otto Robert Frisch* wissen durch die Briefe und die Kopie des Manuskripts, was sich zugetragen hat; die Mitarbeiter des Berliner Instituts erfahren davon erst<sup>[13, 118]</sup>, als sie Anfang Januar 1939 aus den Weihnachtsferien zurückkommen und die „erste“ Arbeit erscheint. *Lise Meitner* trifft sich mit *Otto Robert Frisch* über Weihnachten 1938 in Kungälv an der schwedischen Westküste<sup>[34, 147]</sup>. Gemeinsam finden sie bei einem Spaziergang im Schnee eine sehr einfache Deutung<sup>[144]</sup> dieser unerwarteten Kernreaktion. Man darf die Abspaltung größerer Fragmente aus schweren Kernen nicht als quantenmechanischen Tunnelprozeß<sup>[12]</sup> betrachten, sondern muß ein anderes Konzept<sup>[148]</sup> heranziehen, das Kerne mit Flüssigkeitströpfchen vergleicht. Auch Kerne haben eine Oberflächenspannung, welche sie gegen die abstoßenden elektrischen Kräfte zwischen den Protonen zusammenhält. Beim Urankern ist dieser Zusammenhalt allerdings nur noch gering, und so kann ein solcher Kern nach Einfang eines Neutrons so heftig zu schwingen beginnen, daß er sich in die Länge zieht, einschnürt, und schließlich in zwei Kerne teilt. Diese beiden Bruchstücke stoßen sich elektrostatisch ab, mit einer kineti-

schen Energie von etwa 200 MeV, wie sich aus den Kernradien und Kernladungen abschätzen läßt. Eine solche Energie ist tatsächlich verfügbar, da zwei mittelschwere Kerne gerade um diesen Betrag stärker gebunden sind als Uran. Energetisch ist der Prozeß somit möglich, den sie wegen der Ähnlichkeit zur Zellteilung im Englischen „fission“<sup>[144]</sup> nennen, ein Vorschlag des Biochemikers *W. A. Arnold*<sup>[147]</sup>. Abbildung 22 gibt den wesentlichen Absatz aus der Publikation dieser Gedanken von *Meitner* und *Frisch*<sup>[144]</sup> wieder.

#### Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction

It seems therefore possible that the uranium nucleus has only small stability of form, and may, after neutron capture, divide itself into two nuclei of roughly equal size (the precise ratio of sizes depending on finer structural features and perhaps partly on chance). These two nuclei will repel each other and should gain a total kinetic energy of c. 200 Mev., as calculated from nuclear radius and charge. This amount of energy may actually be expected to be available from the difference in packing fraction between uranium and the elements in the middle of the periodic system. The whole 'fission' process can thus be described in an essentially classical way, without having to consider quantum-mechanical 'tunnel effects', which would actually be extremely small, on account of the large masses involved.

LISE MEITNER.

Physical Institute,  
Academy of Sciences,  
Stockholm.

O. R. FRISCH.

Institute of Theoretical Physics,  
University,  
Copenhagen.  
Jan. 16.

Abb. 22. Deutung der Kernspaltung mit dem Tröpfchenmodell der Atomkerne durch *Lise Meitner* und *Otto Robert Frisch* nach dem in Kungälv entwickelten Konzept. Ausschnitt aus der am 16. Januar 1939 eingereichten Publikation<sup>[144]</sup>.

Darüber hinaus wird Krypton als komplementäres Fragment vermutet<sup>[144]</sup>, und es wird für wahrscheinlich gehalten, daß die bisher den Transuranen zugeschriebenen Aktivitäten zu leichten Homologen des Rheniums und der Platinmetalle gehören; dies würde auch die Isomerenketten überflüssig machen. Die Ähnlichkeit der „Radium-Actinium“-Ketten aus Thorium (Abb. 7) mit den nun als Barium-Lanthan erkannten Aktivitäten wird gesehen und daraus geschlossen, daß Thorium ebenfalls spaltbar ist. Schließlich wird auf das 24min-Uran eingegangen; dessen Auftreten zeige, daß nicht alle Schwingungen des Urankerns diesen spalten würden<sup>[144]</sup>.

*Frisch* informiert hierüber, zurück in Kopenhagen, *Bohr* ausführlich am 3. Januar 1939 und *Hahn* am darauffolgenden Tag kurz brieflich<sup>[149]</sup>. *Bohrs* Reaktion ist drastisch<sup>[147]</sup>: „Oh what fools we have been! We ought to have seen that before“. Vermutlich hat er das Tröpfchenmodell bis zu diesem Zeitpunkt nicht allzu ernst genommen<sup>[150]</sup>, da es ursprünglich zum Verständnis statischer Kerneigenschaften wie der Kernmassen entwickelt wurde und die dynamischen Aspekte nicht gleich gesehen werden. In Telefongesprächen zwischen *Meitner* und *Frisch* wird eine Notiz konzipiert<sup>[147]</sup>,

die *Frisch* am 6. Januar entwirft und nach Diskussion mit *Bohr* überarbeitet; die ersten beiden Seiten steckt er *Bohr* noch auf dem Bahnhof zu, als dieser am 7. Januar per Zug und Schiff in die USA reist<sup>[151]</sup>. *Bohr* sichert zu, nichts darüber verlauten zu lassen, bevor die Notiz publiziert ist<sup>[150]</sup>.

Inzwischen ist *Hahn* und *Straßmanns* „erste“ Arbeit erschienen. *Frisch* diskutiert das neue Phänomen mit *G. Placzek*, der sich skeptisch zeigt<sup>[151]</sup>. Dadurch wird *Frisch*, der zunächst nicht an ein Experiment denkt, herausgefordert<sup>[147]</sup> zu überlegen, wie man die schnellen Spaltfragmente physikalisch nachweisen könnte. Sie sollten in einem Gas ungewöhnlich viele Ionen erzeugen, weitaus mehr als etwa  $\alpha$ -Teilchen, und somit zu ungewöhnlich großen Impulsen führen. Das entsprechende Experiment ist sehr einfach<sup>[147]</sup> und dauert ganze zwei Tage, den 13. und 14. Januar 1939. Abbildung 23 zeigt den entscheidenden Teil des Protokolls<sup>[152]</sup>, Abbildung 24 dessen Autor. Die Notiz über die Deutung der Spaltung<sup>[144]</sup> bleibt nun freilich liegen, bis *Frisch* am 16. Januar auch über sein Experiment berichten kann<sup>[154]</sup>: „By means of a uranium-lined ionization chamber, connected to a linear amplifier, I have succeeded in demonstrating the occurrence of such bursts of ionization.“ Er macht diese großen Impulse mit einem Oszillographen über dem Untergrund der  $\alpha$ -Teilchen des Urans sichtbar und schätzt ihre Massenzahl auf mindestens 70. Thorium gibt denselben Effekt.

*Frisch* zeigt kein Bild der Spaltfragmentimpulse; deshalb muß Abbildung 25 der Arbeit über den ersten Nachweis der Kernspaltung auf dem amerikanischen Kontinent in New York am 25. Januar 1939 entnommen werden<sup>[155, 157, 158]</sup>. Unmittelbar zu sehen sind die beiden entgegengesetzt fliegenden Spaltfragmente in einer Nebelkammer. Abbildung 26 zeigt eine der beiden ersten derartigen Aufnahmen<sup>[159, 160]</sup>.

Die Notizen von *Meitner* und *Frisch* „Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction“<sup>[144]</sup> und von *Frisch* „Physical Evidence for the Division of Heavy Nuclei under Neutron Bombardment“<sup>[154]</sup> erscheinen erst am 11. beziehungsweise 18. Februar 1939; die Autoren hatten nicht auf eine schnelle Veröffentlichung gedrängt<sup>[134]</sup>. Inzwischen ist aber die Kernspaltung durch *Hahn* und *Straßmanns* erste Arbeit<sup>[105]</sup> bekannt geworden. In Berlin reagieren zuerst die Theoretiker<sup>[66, 111]</sup> mit ähnlichen Gedanken wie *Meitner* und *Frisch* und diskutieren<sup>[161]</sup> die Energetik des Prozesses sowie die Frage, warum gerade Barium entsteht.

Die riesigen Spaltfragmentimpulse werden sogleich an mehreren Stellen beobachtet, in New York<sup>[155]</sup>, Berkeley<sup>[162]</sup>, Baltimore<sup>[163]</sup>, Washington<sup>[164]</sup> und Wien<sup>[165]</sup>; die Berliner Experimentalphysiker reagieren etwas später<sup>[166]</sup>. Dabei zeigen sich zwei deutlich getrennte Gruppen von Fragmentenergien, die dem leichten und dem schweren Fragment entsprechen; deren mittlere kinetische Energie wird von *W. Jentschke* und *F. Prank*<sup>[165]</sup> schon erstaunlich richtig mit 61 und 98 MeV, die gesamte in dieser Form freigesetzte Energie also mit rund 160 MeV angegeben.

Einen anderen Weg wählt *F. Joliot*<sup>[167]</sup> in Paris für den physikalischen Nachweis des Spaltprozesses, nachdem er frühzeitig die Berliner Ergebnisse durch einen Brief von *O. R. Frisch* an dessen Freund *H. von Halban* erfährt, der bei *Joliot* arbeitet; wann genau dies geschieht, läßt sich nicht mehr feststellen<sup>[168, 169]</sup>. Für sein Experiment am 26. Januar

# Uran (2)

Fr 13.1.39.

Gelbes U-hydroxyd auf Cu Blech mit  $H_2O$  aufgeschmiert und in Kammer gelegt.  
 $\alpha$ -Strahl eben (?) = Teilchen hörbar. Mit Thyatron, wie früher, bei  
 $V_g 48$  noch Teilchen reagiert eben noch auf 3 V Stärke.  
 $\rightarrow$  reagiert sicher auf 15 V Stärke

(1)	$V_g: 45$ , kein Ra	15.52	3860	$\rightarrow$
		16.22	3060	
(2)	Ra 5, 5mm unter K	16.26	3861	
		16.34	61	1 Hurrah
		16.50	62	1. statt, neu best.
		17.00	63	

Ableitwiderst. des 1. Sektors  $10^8 \Omega$  (Rück) statt  $3 \times 10^7 \Omega$ .  $\alpha$ -Strahl Kond. d. 2. Sektors 500  
 nicht 500 cm.  $\alpha$ -Strahlen durchdringt zu hören. Bei 45 reagiert noch ganz wie  
 vorher auf 12 V Stärke.

(3)	wie (2)	17.20	3894	3 HURRAH
(4)	Ra 10cm weg	30	3897	0
(5)	wie (3)	40	97	4
(6)	wie (4)	50	01	0
(7)	wie (3), aber R243+5	18.04	01	6
(8)	Ra 10cm weg	14	07	0
		24	07	

Abb. 23. Erster physikalischer Nachweis der Kernspaltung durch Otto Robert Frisch in Kopenhagen am 13. Januar 1939; obere Hälfte des Protokollblatts „Uran 2“ [152]. Ein Uranpräparat wird in einer mit Wasserstoff gefüllten Ionisationskammer von 1 cm Tiefe und 3 cm Durchmesser mit Radium-Beryllium-Neutronen, 100 mg Ra, bestrahlt. Die elektrischen Impulse werden über ein Thyatron abgenommen, dessen Schwellenspannung Impulse der natürlichen  $\alpha$ -Strahlen nicht durchläßt, sondern nur größere Impulse. Die oberste Textzeile lautet: „Gelbes U-hydroxyd auf Cu Blech mit  $H_2O$  aufgeschmiert und in Kammer gelegt“. Die folgenden Zeilen oben und in der Mitte enthalten Angaben über die Meßelektronik. Alternierend wird ohne (1, 4, 6, 8) und mit Neutronenquelle „Ra“ (2, 3, 5, 7) gemessen. Die zweite Zahlenreihe gibt die Uhrzeit, die dritte den Zählwerksstand und die vierte die Zahl der registrierten Impulse an. Das erste Spaltereignis wird zwischen 16:34 und 16:50 Uhr mit „Hurrah“ begrüßt. Impulse treten stets nur mit der Neutronenquelle auf.



Abb. 24. Otto Robert Frisch (1904–1975) etwa zur Zeit des „Frisch-Experiments“ [153].

1939<sup>[170]</sup> nutzt Joliot den starken Rückstoß, den Spaltfragmente wegen ihrer hohen kinetischen Energie erfahren. Uran oder Thorium werden auf die Oberfläche eines Hohlzylinders aufgebracht, in den eine Neutronenquelle eingeführt wird. In 3 mm Abstand von der Oberfläche befindet sich konzentrisch ein Bakelitzyylinder, auf dem nach Bestrahlen radioaktive Produkte gefunden werden, die nur durch Rückstoß dahin gelangt sein können. Joliot's Arbeit „Preuve expé-

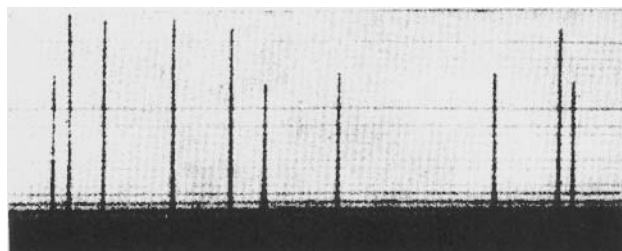


Abb. 25. Oszillographisches Bild der stark ionisierenden Spaltfragmente, mit einer Ionisationskammer während der Bestrahlung von Uran mit Neutronen registriert; den Untergrund bilden natürliche  $\alpha$ -Strahlen des Urans-238 [156]. Das Bild stammt aus der ersten Beobachtung der Kernspaltung auf dem amerikanischen Kontinent durch H. L. Anderson, E. T. Booth, J. R. Dunning, E. Fermi, G. N. Glasoe und F. G. Slack in New York am 25. Januar 1939 [155].

rimentale de la rupture explosive des noyaux d'uranium et de thorium sous l'action des neutrons“<sup>[167]</sup> wird der französischen Akademie der Wissenschaften am 30. Januar 1939 vorgetragen, noch vor dem Erscheinen von Meitner und Frischs Publikationen<sup>[144, 154]</sup>. Ganz ähnlich ist das Experiment von E. McMillan<sup>[171]</sup> in Berkeley, der bereits ausmißt, wie tief die Spaltfragmente in Aluminiumfolien und Zigarettenpapier eindringen; auf Luft umgerechnet sind es 2.2 cm. Das ist weniger als für  $\alpha$ -Teilchen, trotz der weitaus höheren kinetischen Energie; Spaltproduktatome sind weit höher geladen und wechselwirken deshalb stärker mit Materie.

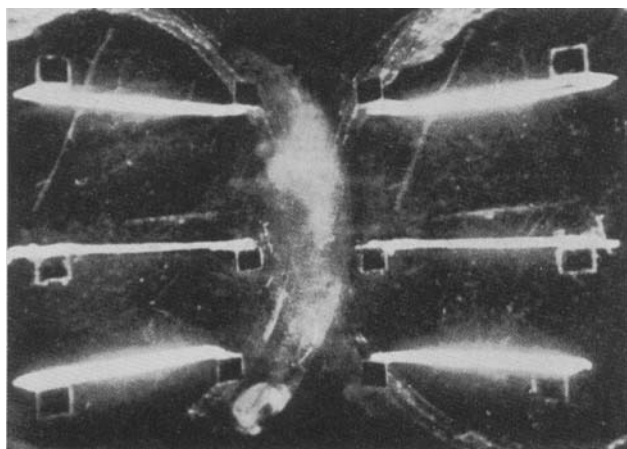


Abb. 26. Eine der ersten Nebelkammeraufnahmen der Kernspaltung mit drei Paaren von genau entgegengesetzt fliegenden Spaltfragmenten, in Berkeley angefertigt [159]; Teil einer Stereoaufnahme.

Geradezu dramatisch geht es in den USA zu<sup>[150, 172]</sup>. Auf der Überfahrt diskutiert *Bohr* ausführlich mit seinem Begleiter, dem theoretischen Physiker *L. Rosenfeld*. Er sagt diesem aber nichts von einem Schweigegebot, und so erfahren die Physiker in Princeton, *Rosenfelds* erster Station, am 16. Januar die große Neuigkeit<sup>[173]</sup>. Als *Bohr* bis zum 20. Januar nichts von *Frisch* über die Annahme der Interpretationsarbeit<sup>[144]</sup> hört – von dessen eingeschobenen Experimenten weiß er nichts – und er *Hahn* und *Straßmanns* Arbeit in Princeton sieht, sendet er eine eigene Notiz<sup>[174]</sup> ab, in der er den Spaltprozeß im Lichte des Tröpfchenmodells diskutiert. Von *Frisch* wird er erst am 22. Januar informiert. *Bohr* fährt zu einer Theoretiker-Konferenz in Washington, unterbricht am 25. Januar in New York und spricht mit *H. L. Anderson*, einem Studenten *Fermis*, der sofort das Abbildung 25 liefernde Experiment einleitet. Die Konferenz wird am 26. Januar mit Berichten von *Bohr* und *Fermi* über die große Neuigkeit eröffnet, die das Ereignis der Konferenz sind<sup>[175]</sup>. Mehrere Gruppen beginnen daraufhin sofort mit ähnlichen Experimenten wie *Frisch*, und so schließt die Konferenz am 28. Januar mit der Vorlage positiver Ergebnisse<sup>[155, 163, 164]</sup>; die ortsansässige Gruppe kann *Bohr* und *Fermi* die Spaltung sogar vorführen<sup>[158, 164]</sup>. Tageszeitungen berichten<sup>[172, 176]</sup>. *Bohr* hat Mühe, die Prioritäten von *Meitner* und *Frisch* in den physikalischen Befunden zu verteidigen.

Nun wird eine wahre Flut von Studien über Spaltung und Spaltprodukte ausgelöst. *Bohr*<sup>[177]</sup> erkennt das seltene Uranisotop 235, mit 0.72% Häufigkeit vor wenigen Jahren erst gefunden<sup>[178]</sup>, als den mit thermischen Neutronen spaltbaren Bestandteil des Urans. Das Konzept vom sich spaltenden Flüssigkeitströpfchen wird quantitativ formuliert<sup>[111, 179, 180]</sup> und wird Grundlage von *Bohr* und *Wheeler*<sup>[181]</sup> wegweisender theoretischer Arbeit, die erscheint, als der zweite Weltkrieg beginnt. Als erster Schritt zur Kettenreaktion werden die beim Spaltprozeß frei werdenden Neutronen gefunden<sup>[182, 183]</sup>. Die energieerzeugende „Uranmaschine“, aber auch die Kernexplosion beginnt sich, zum ersten Male von *Flügge*<sup>[184]</sup> klar ausgesprochen, abzuzeichnen. Ziemlich genau ein Jahr nach der Entdeckung schließt *L. A. Turner*<sup>[144]</sup> die erste Übersicht ab, in der nahezu hundert Arbeiten ausführlich referiert werden. Fast alle wichtigen Aspekte sind schon berührt. Bereits am 2. Dezember 1942

gelingt *Enrico Fermi* und seinem Team<sup>[185]</sup> in Chicago die erste Kettenreaktion. Aber davon erfährt die Welt erst viel später, denn bald wird fast alles, was mit Spaltung zu tun hat, geheim gehalten.

Nirgends findet sich der leiseste Zweifel an dem Phänomen, aber für die Entdecker gibt es dennoch manchen Verdruß, der sich im Briefwechsel *Hahn-Meitner* niederschlägt<sup>[97, 98]</sup>. Manche Arbeiten – so auch *Bohrs* erste Notizen<sup>[174, 177]</sup> – lesen sich so, als ob nicht *Hahn* und *Straßmann*, sondern erst *Meitner* und *Frisch* den Prozeß erkannt hätten. Anderswo<sup>[182]</sup> wird diese Erkenntnis sogar *Joliot* sowie *Meitner* und *Frisch* zugeschrieben, ohne daß *Hahn* und *Straßmann* überhaupt erwähnt werden; pikanterweise schließt daran unmittelbar eine Publikation<sup>[186]</sup> an, die mit *Hahns* und *Straßmanns* Namen beginnt. Manchmal<sup>[167, 187]</sup> liest sich die Vorgeschichte auch so, als hätten *Hahn* und *Straßmann* lediglich Ergebnisse von *I. Curie* und *Savitch* bestätigt; in einem Fall erreicht *Hahn* eine Berichtigung<sup>[188]</sup>. Zu diesem Wirrwarr trägt sicher der eigenartige Stil von *Hahns* und *Straßmanns* „erster“ Arbeit einiges bei: Wer wird, beim flüchtigen Darschauen, hinter den „Erdalkalimetallen“<sup>[105]</sup> des Titels (Abb. 19) die Entdeckung der Kernspaltung vermuten, und selbst der neugierig gewordene Leser wird nach einigen Absätzen dazu neigen, den detaillierten radiochemischen Bericht über Radium aus Uran beiseite zu legen. Wer ihn schließlich doch durcharbeitet und am Ende sogar begreift, was die chemischen Fraktionierungen bedeuten, der wird dann gleich wieder durch den berühmten ambivalenten Absatz „Als Chemiker – als Kernchemiker“ ratlos gemacht, den *Straßmann* nicht so unentschlossen formuliert hätte<sup>[48]</sup>. Da lesen sich die folgenden physikalischen Arbeiten<sup>[144, 154, 167]</sup> mit ihren griffigen Überschriften schon viel glatter. Indes wird mancher Leser heute im Stil der „ersten“ Arbeit gerade deren besonderen Reiz empfinden.

### 3.2. Verpaßte Gelegenheiten

Bevor wir auf einige spätere Ergebnisse eingehen, wollen wir etwas zurückblättern und fragen, warum die Kernspaltung nicht schon früher gefunden wurde, wenn es so einfach ist, die Spaltfragmente mit einer Ionisationskammer zu beobachten. Denn Experimente ähnlich dem von *Frisch*<sup>[154]</sup> ausgeführten sind damals in mehreren Laboratorien im Gange, um beim Bestrahlen von Uran oder Thorium mit Neutronen energiereiche  $\alpha$ -Teilchen aus einem  $(n, \alpha)$ -Prozeß [vgl. Reaktion (8, 9)] nachzuweisen und so die Produktion von „Radium“-Aktivitäten aus Uran beziehungsweise Thorium zu stützen. Derartige Experimente laufen in Berkeley<sup>[189]</sup>, Berlin<sup>[82]</sup>, Cambridge<sup>[190]</sup>, Heidelberg<sup>[191]</sup>, Rom<sup>[38, 192]</sup>, Zürich<sup>[81]</sup> und vermutlich auch anderswo. Dabei wird der störende Untergrund natürlicher  $\alpha$ -Strahlen, in Abbildung 25 deutlich sichtbar, einfach durch Abdecken mit Absorberfolien eliminiert statt, wie in *Frischs* Experiment, elektronisch unterdrückt; dadurch werden aber zugleich auch die Spaltfragmente abgedeckt. Sobald die Spaltung bekannt ist, brauchen nur die Absorberfolien entfernt zu werden, um die Fragmente sichtbar zu machen. „But who can say whether even *Fermi* would have recognized them for what they were if he had them?“<sup>[192]</sup> Manchmal werden sie auch gesehen, aber als elektrische Störimpulse abgetan<sup>[190]</sup>, so auch in Berlin durch *von Droste*<sup>[118]</sup> und vermutlich auch

in Zürich, denn die angekündigte<sup>[81]</sup> ausführliche Publikation über die prompten  $\alpha$ -Teilchen ist nicht mehr erschienen.

Sehr nahe daran ist *P. Abelson*, ein Doktorand in Berkeley. Er ist gerade dabei, die Energien der charakteristischen Röntgenstrahlen des 66h-Eka-Iridiums (vgl. Abb. 6) mit einem starken Präparat in einem Kristallspektrometer auszumessen; während die Exposition läuft, liest *Abelson* in der Tagespresse die Neuigkeit aus Berlin<sup>[193]</sup>. Sofort stellt er das Experiment auf eine Absorptionsmessung um, die rascher geht, und findet so die charakteristische K-Röntgenstrahlung des Iods, emittiert nach dem  $\beta^-$ -Zerfall seiner Muttersubstanz 66h-Eka-Iridium. Dieses ist nun als Tellurisotop identifiziert, wie in einer neun Zeilen langen Notiz<sup>[194]</sup> mitgeteilt wird; später<sup>[195]</sup> gibt *Abelson* Einzelheiten. Damit ist die Kernspaltung erneut, und zwar anhand eines Spaltprodukts, bestätigt.

Auch die Berliner Gruppe hätte schon 1936 die Spaltung finden können, hätte man eine nächtliche Spielerei von *Fritz Straßmann*<sup>[196]</sup> ernster genommen. In der Absicht, eine schnelle chemische Trennmethode für das 16min-Eka-Rhenium zu finden, versucht er, dieses an Bariumsulfat mitzufällen. Kaliumpermanganat wird nämlich in Bariumsulfatkristalle eingebaut; das homologe Eka-Rhenium hätte sich, in einer dem Perrhenat entsprechenden Form, ebenso verhalten können. Der Niederschlag ist aktiv, aber die Aktivitäten sind nicht diejenigen des 16min-Körpers. *Lise Meitner* gegenüber muß *Straßmann* zugeben, daß Adsorptionseffekte nicht auszuschließen sind. Daraufhin lehnt sie die Ergebnisse ab, freundlich, aber energisch<sup>[196]</sup>.

Wie nahe *I. Curie* dem Schluß war, leichtere Elemente zu sehen, läßt sich aus ihrer kurzen Bemerkung<sup>[91]</sup> nicht entnehmen. Immerhin hat sie *G. von Hevesy* im Herbst 1939 erzählt<sup>[34, 151]</sup>, manchmal dächte sie, das ganze Periodensystem sei in ihren bestrahlten Uranproben. Trotz intensiver Diskussionen in Seminaren kommt indes niemand auf des Rätsels Lösung, wie ein Augenzeuge berichtet<sup>[197]</sup>. Auch in Berlin kommt der Gedanke an solch leichte Elemente auf, wird aber wegen des unüberwindlich scheinenden Coulomb-Walls wieder verworfen<sup>[118]</sup>.

Nicht zu den verpaßten Gelegenheiten zählen darf man hingegen, wie es kürzlich geschehen ist<sup>[43]</sup>, das Masurium, Element 43, von *Walter* und *Ida Noddack*<sup>[21, 22]</sup>. Alle Isotope dieses Elements sind so kurzlebig, daß sie seit der Synthese schwerer Elemente in Sternen bereits wieder ausgestorben sind. Element 43 entsteht aber ständig neu durch die spontane Kernspaltung des Urans, auf die wir gleich noch kommen werden. Allerdings sind die Mengen äußerst gering. Um diese zu sehen und damit – unbewußt – die Spaltung zu beobachten, hätte die Röntgenfluoreszenzspektroskopie der *Noddacks* um fünf Größenordnungen empfindlicher sein müssen als sie selbst angeben; dafür gibt es keine Argumente<sup>[198]</sup>.

### 3.3. Weitere Spaltprodukte

Was bleibt nun aber von den Uran-Transuran-Zerfallsketten der Abbildung 6 übrig und was steckte hinter den „Transuranen“? Eben schon erwähnt wurde, daß *Abelson*<sup>[194, 195]</sup> das 66h-Eka-Iridium als Tellurisotop identifiziert und somit die Tochtersubstanz 2.5h-Eka-Platin als Iod. Sein Resultat wird auf dieselbe Weise, durch Röntgenabsorptionsmessung, bestätigt<sup>[199]</sup>. *Hahn* und *Straßmann*<sup>[200]</sup>

schließen sich an, als sie dieses Eka-Iridium eingehend chemisch untersuchen. Dabei finden sie eine zweite Aktivität ganz ähnlicher Halbwertszeit, die – korrekt – als Molybdän identifiziert wird. Sie diskutieren, wieso das 2.5h-Iod für ein Platinmetall gehalten werden konnte: Bei der als selektiv für Platin herangezogenen Kristallisation von Ammoniumhexachloroplatinat<sup>[63]</sup> fällt auch Iod als analoges Ammoniumhexaiodoplatinat aus, womit niemand im entferntesten gerechnet hat, und im Platinsulfidniederschlag erscheint das 2.5h-Iod, weil es sich aus dem mitfallenden 66h-Tellur nachbildet. Weitere experimentelle Studien zur Frage der Transurane erscheinen, obwohl durch *Hahn* und *Straßmann* angekündigt<sup>[200]</sup>, jedoch nicht.

Während hier individuelle „Transuran“-Aktivitäten betrachtet werden, überprüfen *Meitner* und *Frisch*<sup>[186]</sup> das gesamte, an Platinsulfid mitfallende Gemisch auf einmal. Dazu werden die Spaltfragmente während des Bestrahleins durch Rückstoß aus dem Uran in eine Wasserschicht überführt und dort später an Platinsulfid ausgefällt. Die Zerfallskurve wird mit einem Platinsulfidniederschlag verglichen, der ohne Rückstoß direkt aus bestrahltem Uran isoliert wird. Die beiden Zerfallskurven stimmen perfekt überein. Die „Transurane“ sind somit Spaltprodukte, denn nur diese haben eine entsprechend hohe Rückstoßenergie. In derselben Weise werden auch Spaltprodukte des Thoriums identifiziert<sup>[201]</sup>; aus der Spaltung von Uran und Thorium gehen somit ähnliche Produkte hervor. Andere Autoren<sup>[202, 203]</sup> kommen mit solchen Rückstoßexperimenten zu ähnlichen Schlüssen.

Was die übrigen „Transurane“ vorgetäuscht haben könnte, diskutiert *Hahn* in seiner Autobiographie<sup>[204]</sup> aufgrund einer Stellungnahme von *Straßmann*<sup>[205]</sup>. Später wird diese Frage auch experimentell angegangen<sup>[206]</sup>, indem Platinsulfidniederschläge und andere, nach *Hahn*, *Meitner* und *Straßmann* hergestellte Transuranfraktionen mit hochauflösender  $\gamma$ -Strahlenspektroskopie untersucht werden. Auch diese Körper erweisen sich als komplex. Die historisch wichtigste Aktivität, der 16min-Körper, besteht zur Hälfte aus Technetium-101, zur anderen Hälfte aus einem Gemisch von Molybdän-101, Antimon-130g, Antimon-131 und Tellur-131g. Im 55min-Körper dominiert Iod-134 neben Tellur-134 und Zinn-128, und im 5.5h-Körper Ruthenium-105 neben Antimon-129 und Iod-133. Auch die an Mangandioxid mitfallende 16min-Aktivität, von *Fermi* et al. für Element 93 gehalten, war komplex; hauptsächlich fällt Molybdän-101 mit, aus dem sich Technetium-101 nachbildet<sup>[207]</sup>.

Was nun die 3.5h-Aktivität von *I. Curie* und *Savitch* betrifft, so wird schon bald gesehen<sup>[44]</sup>, daß das 3.5h-Yttrium-92 hier heranzuziehen ist; es hat mit 3.6 MeV eine  $\beta^-$ -Strahlung, die erheblich energiereicher ist als diejenige von natürlichem Protactinium-234m mit 2.3 MeV. Daneben tragen sicher auch 3.90h-Lanthan-141, 93min-Lanthan-142 und, im chemisch ungetrennten Gemisch, 76min-Krypton-87 zur Aktivität bei. Mit Yttrium-92 als Hauptbestandteil wird auch verständlich, daß die 3.5h-Aktivität vom Lanthan fraktioniert werden kann; dies war also korrekt gefunden worden. Da *I. Curie* und *Savitch* diese Aktivität direkt aus bestrahltem Uran isolieren, haben sie stets Yttrium-92 in der Lanthanoidenfraktion. *Hahn* und *Straßmann* erfassen hingegen die Lanthanoidenelemente nicht direkt, sondern als Zerfallsprodukte von „Radium“-Barium und schließen Yttrium dadurch aus, weil dessen Muttersubstanz Strontium nicht in ihre Bariumfraktion gelangt.

Die Spaltprodukte stellen sich als äußerst komplexes Gemisch von Elementen heraus, die jeweils mit mehreren Isotopen vertreten sind. Sie bilden lange  $\beta^-$ -Zerfallsketten, die oft kompliziert in Isomere verzweigen. Abbildung 20 zeigt einige davon. In den folgenden Jahren ist die kleine Berliner Arbeitsgruppe, um *H.-J. Born*, *H. Götte* und *W. Seelmann-Eggebert* erweitert, voll damit beschäftigt, diese Ketten zu entwirren, soweit es ihr unter den immer schwieriger werdenden Umständen möglich ist. Alle diese Arbeiten werden publiziert. Anfang 1945 sind es rund hundert Produkte von 25 Elementen<sup>[208]</sup>, die *Hahn* 1946 in seinem Nobelpreis-Vortrag<sup>[46]</sup> präsentiert. Um diese Zeit werden auch die entsprechenden amerikanischen Ergebnisse freigegeben, die unter *Charles Coryell*<sup>[209]</sup> am „Met Lab“ mit überlegenen Mitteln erarbeitet wurden; sie erscheinen zunächst als tabellarische Übersicht<sup>[210]</sup>, später auch im Detail<sup>[211]</sup>. Dort sind 170 Produkte von 37 Elementen aufgeführt. Nur wenige der in Berlin beobachteten Produkte sind in den amerikanischen Tabellen nicht enthalten; an solche unklaren Fällen knüpft dann *Fritz Straßmann* mit seinen Studenten wieder an, sobald dies nach dem Kriege möglich wird<sup>[212]</sup>.

Nicht über Anfänge<sup>[213]</sup> hinaus geraten in Berlin quantitative Messungen über die Häufigkeit der einzelnen Spaltprodukte, die anzeigen, in welche Fragmente der Urankern häufig und in welche er selten zerbricht. Hier können die amerikanischen Gruppen bereits eine vollständige Verteilung als Funktion der Massenzahl vorlegen<sup>[210, 211]</sup>. Die Massenverteilung wird herangezogen, weil sich beim  $\beta^-$ -Zerfall die Massenzahl nicht ändert; wartet man den  $\beta^-$ -Zerfall in die langlebigen Endglieder der Ketten ab, so hat man die gesamte Ausbeute aller Kettenglieder ganz von selbst aufsummiert. Die Elementverteilung ändert sich zeitlich hingegen durch den  $\beta^-$ -Zerfall ständig; wie sie ursprünglich gleich nach dem Zerplatzen des Urankerns aussieht, ist experimentell schwieriger festzustellen, weil – wie Abbildung 20 an einigen Beispielen erkennen läßt – die am Anfang der Zerfallsketten stehenden Spaltprodukte fast alle sehr kurzlebig sind. Um herauszufinden, wie häufig die einzelnen Elemente gebildet werden, müssen die Ausbeuten aller ihrer Isotope bestimmt und zusammengezählt werden. Derartige Daten sind erst in jüngerer Zeit ermittelt worden. Abbildung 27 zeigt die Elementhäufigkeiten bei der Spaltung von Uran-235<sup>[214]</sup>. Man erkennt das leichtere und das schwerere Fragment aus dem asymmetrischen Spaltprozeß mit jeweils fünf häufiger gebildeten Elementen, Krypton bis Zirkonium und

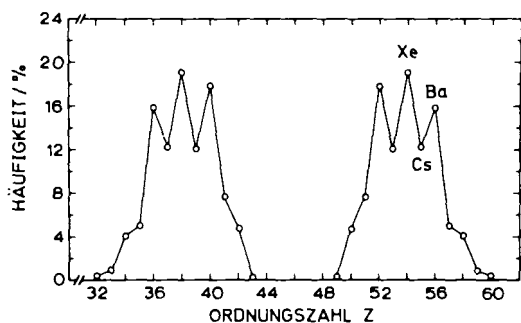


Abb. 27. Häufigkeitsverteilung der Elemente bei der Spaltung von Uran-235 durch thermische Neutronen: Primäre Häufigkeit, aufgetragen gegen die Ordnungszahl *Z*. Die Asymmetrie der Spaltung in ein kleineres und ein größeres Fragment ist evident; Xenon, Caesium und Barium, Schlüsselemente für die Entdeckung, liegen im „schweren“ Höcker (nach [124]).

Tellur bis Barium. *Hahn* und *Straßmanns* Bariumisotope entstehen vorwiegend sekundär durch den  $\beta^-$ -Zerfall von kurzlebigen Xenon- und Caesiumkernen, die ziemlich im Zentrum des schweren Asts liegen.

## 4. Nochmals Transurane

### 4.1. Element 93, Neptunium

Von den Zerfallsketten der Abbildung 6 bleibt ein Glied übrig, das 23min-Uran-239, dessen Zuordnung zum Uran chemisch<sup>[63]</sup> und zur Massenzahl 239 in Uran-238 physikalisch<sup>[61]</sup> gesichert ist. Als ein  $\beta^-$ -Strahler muß es in das Isotop 239 des Elements 93 zerfallen. Ausgerechnet dieses Folgeprodukt läßt sich nur sehr schwierig finden. Der erste Schritt voran gelingt *E. McMillan*<sup>[171]</sup>. Als er die Reichweite von Spaltprodukten in Zigarettenpapier mißt und sich auch die dünne Uranschicht anschaut, fallen ihm darin zwei starke Aktivitäten auf, eine von 23 min Halbwertszeit, die er jenem Uran-239 zuschreibt, und eine von 2 Tagen Halbwertszeit, die sogar stark ist verglichen mit den Aktivitäten von Spaltprodukten ähnlicher Halbwertszeit. Selbst die natürliche Aktivität des Urans kann demgegenüber vernachlässigt werden. Dieser Hinweis<sup>[171]</sup> veranlaßt einen Leser – war es *Hahn* selbst? – im Berliner Institut, am Rande der Publikation ein heute noch gut sichtbares, großes Ausrufungszeichen anzubringen; die ungleich stärkeren „Geschütze“ der amerikanischen Konkurrenz beginnen sich auszuwirken.

Ist dies das gesuchte Element 93, dessen Rückstoßenergie ja gering sein muß, so daß es im Urantarget bleiben sollte? *E. Segrè*<sup>[215]</sup> schließt zunächst aus Zerfallskurven, daß die 2.3d-Aktivität nicht aus dem 23min-Uran-239 hervorgeht; hier hat ihn deren niedrige  $\beta$ -Energie irregeführt<sup>[216]</sup>. Dann versucht er, die langlebige Aktivität chemisch zuzuordnen, erneut unter der Annahme, daß Element 93 sich wie Eka-Rhenium verhalten müsse. Für die 7. Nebengruppe im Periodensystem war er ja als Mitentdecker<sup>[217]</sup> des homologen Elements 43 mit chemischen Methoden ausgewiesen. *Segrè* findet indes, daß die 2.3d-Aktivität nicht mit Rheniumsulfid zusammen ausfällt, sondern sich in jeder Hinsicht wie ein Lanthanoid verhält: Sie fällt mit Lanthanfluorid und -oxalat, mit Kaliumlanthansulfat und anderen typischen Niederschlägen und kann vom Actinium durch Fraktionieren des Lanthanoxalats getrennt werden. *Segrè*<sup>[215]</sup> ordnet die 2.3d-Aktivität einem Spaltprodukt zu, das zu den Lanthanoiden gehört, und er folgert, das 23min-Uran zerfalle in ein langlebiges Element 93, das noch nicht gefunden sei. Ebenfalls negativ verlaufen andere Versuche<sup>[218]</sup>, aus stark angereicherten Proben des 23min-Urans ein Element 93 mit Rheniumsulfid zu isolieren.

*E. McMillan* nimmt seine Studien<sup>[171]</sup> nach einem Jahr wieder auf, jetzt mit noch stärkeren Neutronenflüssen, die es ermöglichen, die Uranschicht noch dünner zu machen. Die 2.3d-Aktivität bleibt dennoch im Uran und kann so von Spaltprodukten vollständig befreit werden. Sie wird durch Resonanzneutronen genauso gebildet wie 23min-Uran-239. *P. Abelson*, nun in Washington, beobachtet, daß sich die 2.3d-Aktivität nicht immer wie ein Lanthanoid verhält. Beide Forscher tun sich in Berkeley zusammen und finden innerhalb von fünf Tagen<sup>[193]</sup> die Lösung<sup>[219]</sup>: In einem oxidierenden Medium (Bromat in starker Säure) fällt die 2.3d-



Aktivität nicht mit Cerfluorid aus; in einem reduzierenden Medium (Sulfit) fällt sie hingegen quantitativ. Nach Oxidation fällt die Aktivität zusammen mit Natriumuranacetat aus, nach Reduktion begleitet sie Thoriumiodat und -peroxid. Typische Eigenschaften des Rheniums, wie die Sulfidfällung, werden nicht beobachtet. Offenbar hat das Element 93, nun endlich gefunden, wie Uran zwei hauptsächliche Oxidationszustände, vier und sechs, nur ist der niedrigere Zustand stabiler, umgekehrt wie beim Uran. *McMillan* und *Abelson*<sup>[219]</sup> vermuten eine neue Serie von aufeinanderfolgenden ähnlichen Elementen, beginnend beim Uran. Darauf basiert auch die am Uran orientierte, „astronomische“ Namensgebung für das Element 93: Neptunium.

Mit diesen chemischen Kenntnissen können *McMillan* und *Abelson*<sup>[219]</sup> beweisen, daß die 2.3d-Aktivität die Tochter des 23min-Urans ist. Die Ergebnisse dieses Experiments sind in Abbildung 28 gezeigt. Aus einer reduzierend gehaltenen Lösung der 23min-Aktivität wird in Abständen von 20 Minuten wiederholt Cerfluorid ausgefällt und so die sich immer wieder bildende 2.3d-Aktivität aus dem 23min-Uran-239 „abgemolken“. Die Anfangsintensitäten dieser abgemolkenen Präparate nehmen, gegen den Zeitpunkt des Abmelkens aufgetragen, mit einer Halbwertszeit von 23 Minuten ab, wie in Abbildung 28 zu sehen ist. Nach den

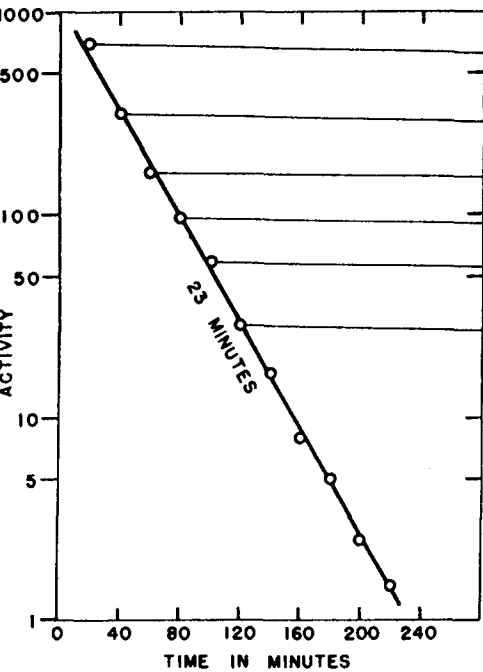


Abb. 28. Entdeckung des Elements 93, Neptunium, durch *E. McMillan* und *P. Abelson* in Berkeley [219]: Nachweis des genetischen Zusammenhangs zwischen 23min-Uran-239 und dessen 2.3d-Folgeprodukt. Gegen die Zeit aufgetragen sind die Anfangszählraten (logarithmisch) der 2.3d-Aktivität in aufeinanderfolgend aus derselben Uran-239-Lösung gefällten Cerfluorid-Niederschlägen. Sie nehmen mit der Halbwertszeit des Urans-239, 23 min, ab. Uran-239 zerfällt demnach in die 2.3d-Aktivität, und diese ist somit Neptunium-239.

radioaktiven Zerfallsgesetzen beweist dies, daß die 2.3d-Aktivität aus dem 23min-Uran hervorgeht und somit Neptunium-239 ist. Neptunium-239 hat weiche  $\beta^-$ -Strahlen von nur 0.47 MeV Energie. Ein Folgeprodukt, Element 94, wird gesucht, aber nicht gefunden<sup>[219]</sup>.

In Berlin kann nach *McMillans* erster Publikation<sup>[171]</sup> die 2.3d-Aktivität nicht beobachtet werden, selbst in Proben nicht, die an der Kopenhagener Hochspannungsanlage stark bestrahlt werden<sup>[220]</sup>. Die Erklärung dafür ist einfach: In einen Platinsulfidniederschlag gelangt die Aktivität gar nicht; in der Uranfraktion wird sie aus dem 23min-Uran nur schwach gebildet, und sie läßt sich zudem wegen der starken Absorption ihrer energiearmen Strahlen nur schlecht messen. Deshalb müssen in Berlin besondere Anreicherungsverfahren für das 23min-Uran entwickelt werden. *K. Starke*<sup>[221, 222]</sup> gelingt dies durch eine Szilard-Chalmers-Trennung<sup>[223]</sup>, bei der ausgenutzt wird, daß bei Kernreaktionen die radioaktiv gewordenen Atome in einen anderen chemischen Zustand überführt werden können als die bestrahlte Spezies. Wird Uran als Uranylbenzoylacetat bestrahlt, so wird das 23min-Uran-239 teils in eine anorganische Form umgewandelt und kann so aus großen Uranmengen konzentriert werden. In solchen stark angereicherten Uran-239-Präparaten findet *Starke*<sup>[224, 225]</sup> die 2.3d-Aktivität bereits, bevor die Arbeit von *McMillan* und *Abelson*<sup>[219]</sup>. Ende August 1940 Berlin erreicht<sup>[226]</sup>. Kriegsbedingt können *Starkes* Resultate allerdings erst später veröffentlicht werden<sup>[221, 222, 224, 225]</sup>.

*Hahn* und *Straßmann* beginnen sich nun auch mit dem Element 93 zu beschäftigen, haben aber zunächst erneut Schwierigkeiten, die 2.3d-Aktivität zu finden<sup>[227]</sup> und bauen deshalb ein dünnwandiges Zählrohr. Sie entwickeln ein chemisches Verfahren, Element 93 direkt aus großen Mengen Uran zu isolieren, und untersuchen die Chemie des Elements 93 eingehend<sup>[228]</sup>. Schon beschriebene Eigenschaften<sup>[215, 219]</sup> werden teils bestätigt, teils auch nicht, und neue hinzugefügt. Alle belegen den Bruch im Periodensystem: Element 93 hat gar nichts mit dem Eka-Rhenium gemeinsam.

#### 4.2. Element 107, Eka-Rhenium

Nun beginnt das Zeitalter der kernchemischen Elementsynthesen. Das Periodensystem dehnt sich aus und nimmt einen noch anderen Verlauf als zunächst vermutet: Die Reihe der Actinoiden wird erkannt, zuerst von *Seaborg*<sup>[229]</sup>. Sie reicht bis zum Lawrencium ( $Z = 103$ ), dann springt das System mit dem Element 104 wieder in die Nebengruppen zurück, zur Zeit bis zum Element 109<sup>[230]</sup>. Abbildung 29 zeigt das System von heute.

HEUTE																		He															
H																		He															
Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne										
Na	Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar										
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																
Fr	Ra	Ac	104	105	106	107	108	109	(110)	(111)	(112)	(113)	(114)	(115)	(116)	(117)	(118)																
ANTHANOIDEN																																	
La																		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
57																		58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
CTINOIDEN																																	
Ac																		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		
89																		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		

Abb. 29. Periodensystem der Elemente heute. Die Ordnungszahlen noch unbekannter Elemente sind eingeklammert.

Unter Rhenium steht jetzt das Element 107; es dauert nahezu vier Jahrzehnte, bis dieses Eka-Rhenium schließlich durch *Gottfried Münzenberg, Peter Armbruster* und die „SHIP“-Gruppe<sup>[231]</sup> am Darmstädter Schwerionenbeschleuniger UNILAC durch Kernfusion von Chrom-54 mit Bismut-209 erzeugt wird [Reaktion (11)].



Der Nachweis des Elements 107 beruht wiederum auf der genetischen Verknüpfung mit Folgeprodukten: Das Isotop 262 zerfällt mit 8.2 msec Halbwertszeit durch  $\alpha$ -Teilchen-Emission in das bekannte Isotop 258 des Elements 105 und dessen ebenfalls bekannte Zerfallsreihe; Abbildung 30 gibt ein Beispiel für die Zerfallskette eines individuellen Atomkerns.

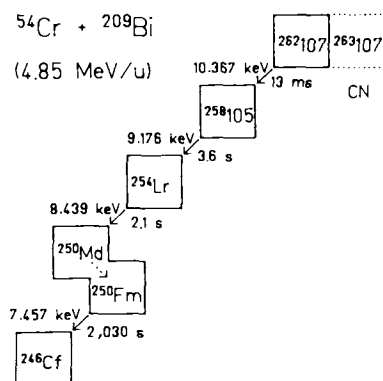


Abb. 30. Entdeckung des Elements 107, Eka-Rhenium, durch die SHIP-Gruppe in Darmstadt [231]: Eine von fünf beobachteten Zerfallsketten eines kurzlebigen  $\alpha$ -Strahlers, der in das bekannte Nuclid 105–258 und dessen ebenfalls bekannte Folgeprodukte übergeht; deshalb muß er dem Isotop 262 des Elements 107 zugeschrieben werden. Erzeugt wird Element 107 durch Kernfusion von Chrom-54, Element 24, mit Bismut-209, Element 83.

Über die Chemie des Eka-Rheniums ist noch nichts bekannt, und so wissen wir noch nicht, ob die Extrapolationen von damals sich bestätigen. Kurze Halbwertszeiten und extrem niedrige Produktionsraten lassen derartige Studien vorerst nicht zu. Chemische Experimente mit den Transactinoiden reichen zur Zeit bis zum Element 105, wie man Übersichten<sup>[232–234]</sup> und weiteren jüngsten Arbeiten<sup>[236–238]</sup> entnehmen kann.

## 5. Kernspaltung in der Natur

Die Uranspaltung ist ein natürlicher Vorgang; Uran zerplatzt schon spontan ohne Energiezufuhr. Diese spontane Spaltung finden *G. N. Flerov* und *K. A. Petrzhak*<sup>[239, 240]</sup> 1940 mit einer großen Ionisationskammer, in der etwa 10 g Uran in dünner Schicht ausgebreitet werden. Sie beobachten etwa sechs Spaltereignisse pro Stunde und schätzen die Halbwertszeit des Urans-238 für spontane Spaltung auf  $10^{16}$  bis  $10^{17}$  Jahre<sup>[239, 241]</sup>; damit sind sie schon in der richtigen Größenordnung. Bei den Transuranen wird die spontane Kernspaltung ein wichtiger Zerfallsprozeß, der letztlich das Periodensystem begrenzt<sup>[230]</sup>.

Aber auch die Kettenreaktion hat in der Natur stattgefunden. Ein natürlicher Kernreaktor wird schon früh disku-

tiert<sup>[184, 242]</sup>, zunächst aber mit dem Argument verworfen, daß es ja Uranlagerstätten gäbe; später wird diese Frage erneut aufgegriffen und eine natürliche Kettenreaktion als möglich erkannt<sup>[243]</sup>. Entdeckt wird ein natürlicher Kernreaktor durch minimale Abweichungen im Uran-235-Gehalt eines in Frankreich angelieferten Urans, nämlich<sup>[243]</sup> 0.7171 % gegen den Sollwert von 0.7202 %. Als Ursache wird Uranerz aus Oklo, Gabun, ausfindig gemacht, wo dann an der Lagerstätte Proben gefunden werden, in denen Uran-235 bis auf 0.29 % abgereichert ist. Der Reaktor lief vor etwa 1.8 Milliarden Jahren für etwa 600 000 Jahre und hat etwa 10 000 Megawatt-Jahre Gesamtenergie freigesetzt, so viel, wie ein großer Leistungsreaktor in etwa drei Jahren liefert; dabei sind 4 Tonnen Uran-235 verbraucht worden<sup>[242, 246]</sup>. Ein interessanter Aspekt des Oklo-Reaktors ist, daß die entstandenen Spaltprodukte in dieser langen Zeitspanne nicht nennenswert gewandert sind<sup>[245, 246]</sup>.

## 6. Fazit

Durch die Entdeckung der Kernspaltung war nun die in den Atomkernen schlummernde Energie – seit Jahrzehnten viel und breit diskutiert<sup>[172]</sup> – zugänglich geworden. Nicht nur das war sensationell, sondern auch, wie es dazu gekommen ist: Nicht das Zerplatzen des Urankerns unmittelbar wurde beobachtet, sondern einige daraus hervorgehende, sekundäre Produkte. Indes war es wohl der zwingendste Weg zu dieser Entdeckung; am Barium in den Berliner Bechergläsern gab es einfach nichts zu deuten: „It was good solid chemistry that got things on the right track“<sup>[147]</sup>. Daß *Otto Hahn* und *Fritz Straßmann* und ihre Vorgänger eigentlich auf etwas ganz anderes hinarbeiteten, macht die Kernspaltung nicht zu einem Zufallsprodukt, denn sie ist ihnen ja nicht einfach zugefallen, sondern war das Ergebnis jahrelanger, intensiver radiochemisch-analytischer Arbeit. An Zufälle mag man allenfalls denken, wenn man sich vergegenwärtigt, wie sehr das hier geschilderte Geschehen vom scheinbar zufälligen Auf und Ab der Bindungsenergie von Kernen bestimmt wird, hinter dem freilich subtile quantenmechanische Effekte stecken. Einerseits wird der Spaltprozeß durch dieses Auf und Ab asymmetrisch, mit einem schweren Fragment genau dort, wo *Otto Hahn* und *Fritz Straßmann* bei ihrer Suche nach Radium landeten. Andererseits machen solche lokale Fluktuationen den  $\beta^-$ -Zerfall von Neptunium-239 ungewöhnlich energiearm, und so entging das Element 93 *Otto Hahn*, *Lise Meitner* und *Fritz Straßmann*, obwohl es um eine Größenordnung häufiger aus Uran entsteht als die stärksten Spaltprodukte. Somit konnte, zu *Hahns* Enttäuschung<sup>[247]</sup>, in Berlin nach Protactinium, dem linken Nachbarn des Urans im Periodensystem, nicht auch noch dessen rechter Nachbar entdeckt werden.

Aus der Geschichte der Kernspaltung kann man lernen, wie Wissenschaft oft vor sich geht, nicht in logisch aufeinander aufbauenden Schritten, sondern auf merkwürdigen Umwegen; wie die erfahrensten Arbeitsgruppen einerseits jahrelang an der Sache vorbei experimentieren und vorbei denken, weil sie sich nicht rechtzeitig von scheinbar gesicherten Konzepten lösen; wie sie andererseits intuitiv das Richtige tun; und wie ein Forscher nach Jahrzehnten wieder auf das zurückkommt, was er als Anfänger getan hat.

Peter Brix, Hans Otto Denschlag, Helmut Folger, Jens-Volker Kratz, Klaus Lützenkirchen, Matthias Schädel und Norbert Trautmann haben den Bericht kritisch durchgesehen, und Karl-Heinz Gläsel, Annette Krämer und Ursula Othmer haben ihn herzustellen geholfen; dafür sei ihnen herzlich gedankt.

Eingegangen am 21. September,  
ergänzte Fassung am 5. Dezember 1989 [A760]

Vorbemerkung: Bei einigen Arbeiten ist das Eingangsdatum angegeben.

- [1] E. Fermi, „Radioactivity Induced by Neutron Bombardment“, *Nature (London)* 133 (1934) 757 (10. Apr. 1934).
- [2] E. Fermi, E. Amaldi, O. D'Agostino, F. Rasetti, E. Segrè, „Artificial Radioactivity Produced by Neutron Bombardment“, *Proc. R. Soc. London* 146 (1934) 483–500 (25. Juli 1934).
- [3] E. Amaldi, „Künstliche Radioaktivität durch Neutronen“, *Phys. Z.* 38 (1937) 692–734 (2. Aug. 1936).
- [4] E. Amaldi, O. D'Agostino, E. Fermi, F. Rasetti, E. Segrè, „Radioattività „beta“ provocata da bombardamento di neutroni III“, *Ric. Sci.* 5 (1) (1934) 452–453 (10. Mai 1934). Englische Übersetzung in [5], S. 677–678.
- [5] E. Fermi: *Note e Memorie (Collected Papers)*, Vol. I, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma 1962.
- [6] E. Fermi, F. Rasetti, O. D'Agostino, „Sulla possibilità di produrre elementi di numero atomico maggiore di 92“, *Ric. Sci.* 5 (1) (1934) 536–537 (6. Juni 1934).
- [7] E. Fermi, „Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92“, *Nature (London)* 133 (1934) 898–899 (erschienen 16. Juni 1934).
- [8] E. Amaldi, O. D'Agostino, E. Fermi, F. Rasetti, E. Segrè, „Radioattività provocata da bombardamento di neutroni V“, *Ric. Sci.* 5 (2) (1934) 21–22 (12. Juni 1934). Englische Übersetzung in [5], S. 681–682.
- [9] O. Hahn: *Applied Radiochemistry*, Cornell University Press, Ithaca 1936.
- [10] S. R. Weart, „The Discovery of Fission and a Nuclear Physics Paradigm“, in [11], S. 91–133.
- [11] W. R. Shea (Hrsg.): *Otto Hahn and the Rise of Nuclear Physics*, Reidel, Dordrecht 1983.
- [12] G. Gamow, „Zur Quantentheorie des Atomkerns“, *Z. Phys.* 51 (1928) 204–212.
- [13] S. Flügge, „Zur Entdeckung der Uranspaltung vor zehn Jahren“, *Z. Naturforsch.* A4 (1949) 82–84.
- [14] H. J. Rose, G. A. Jones, „A New Kind of Natural Radioactivity“, *Nature (London)* 307 (1984) 245–247.
- [15] N. Bohr, „The Structure of the Atom“, *Nature (London)* 112 (1923) 30–44.
- [16] G. T. Seaborg, „Electronic Structure of the Heaviest Elements“, in G. T. Seaborg, I. J. Katz, W. M. Manning (Hrsg.): *The Transuranium Elements*, McGraw-Hill, New York 1949, S. 1492–1524.
- [17] G. T. Seaborg, „Place in the Periodic System and Electronic Structure of the Heaviest Elements“, *Nucleonics* 5 (5) (1949) 16–36.
- [18] M. Haissinsky, „The Position of the Cis- and Transuranic Elements in the Periodic System: Uranides or Actinides?“, *J. Chem. Soc. (London)* 1949, S. 241–243.
- [19] M. Haissinsky, „La place des éléments transuraniens dans le système périodique“, *Experientia* 9 (1953) 117–120.
- [20] A. von Grosse, „The Chemical Properties of Elements 93 and 94“, *J. Am. Chem. Soc.* 57 (1935) 440–441 (11. Dez. 1934).
- [21] W. Noddack, I. Tacke, O. Berg, „Zwei neue Elemente der Mangangruppe“, *Sitzungsber. Preuß. Akad. Wiss. Phys.-Math. Kl.* 19 (1925) 400–409.
- [22] W. Noddack, I. Tacke, O. Berg, „Die Ekamangane“, *Naturwissenschaften* 13 (1925) 567–574.
- [23] E. Amaldi, in [24], S. 275.
- [24] E. Amaldi, „From the Discovery of the Neutron to the Discovery of Nuclear Fission“, *Phys. Rep.* 111 (1984) 1–332.
- [25] A. von Grosse, M. S. Agruss, „The Chemistry of Element 93 and Fermi's Discovery“, *Phys. Rev.* 46 (1934) 241 (7. Juli 1934).
- [26] A. von Grosse, M. S. Agruss, „Fermi's Element 93“, *Nature (London)* 134 (1934) 773 (12. Okt. 1934).
- [27] A. von Grosse, M. S. Agruss, „The Identity of Fermi's Reactions of Element 93 with Element 91“, *J. Am. Chem. Soc.* 57 (1935) 438–439 (11. Dez. 1934).
- [28] O. Hahn, L. Meitner, „Die Muttersubstanz des Actiniums, ein neues radioactives Element von langer Lebensdauer“, *Phys. Z.* 19 (1918) 208–218.
- [29] O. Hahn, „Über das Uran Z und seine Muttersubstanz“, *Z. Phys. Chem.* 103 (1923) 461–480.
- [30] L. Meitner, „Über die Erregung künstlicher Radioaktivität in verschiedenen Elementen“, *Naturwissenschaften* 22 (1934) 420 (erschienen 1. Juni 1934).
- [31] L. Meitner, „Über die Umwandlung der Elemente durch Neutronen“, *Naturwissenschaften* 22 (1934) 759 (Okt. 1934).
- [32] L. Meitner, Brief an M. von Laue vom 4. Sept. 1944, in [33], S. 128–129, dort fälschlich unter dem Datum vom 4. Sept. 1941 abgedruckt.
- [33] J. Lemmerich: *Die Geschichte der Entdeckung der Kernspaltung*, Katalog zur Ausstellung im Deutschen Museum München, Universitätsbibliothek Technische Universität Berlin, Berlin 1988.
- [34] L. Meitner, „Wege und Irrwege zur Kernenergie“, *Naturwiss. Rundsch.* 16 (1963) 167–169; „Right and Wrong Roads to the Discovery of Nuclear Energy“, *Adv. Sci.* 1963, 363–365.
- [35] O. Hahn, L. Meitner, „Über die künstliche Umwandlung des Urans durch Neutronen“, *Naturwissenschaften* 23 (1935) 37 (22. Dez. 1934).
- [36] E. Amaldi, O. D'Agostino, E. Fermi, B. Pontecorvo, F. Rasetti, E. Segrè, „Artificial Radioactivity Produced by Neutron Bombardment II“, *Proc. R. Soc. London* 149 (1935) 522–558 (15. Febr. 1935).
- [37] E. Amaldi, O. D'Agostino, E. Fermi, B. Pontecorvo, E. Segrè, „Radioattività indotta da bombardamento di neutroni IX“, *Ric. Sci.* 6 (1) (1935) 435–437 (3. Apr. 1935). Englische Übersetzung in [5], S. 693–696.
- [38] E. Amaldi, in [24], S. 278.
- [39] I. Noddack, „Über das Element 93“, *Angew. Chem.* 47 (1934) 653–655 (10. Sept. 1934).
- [40] I. Noddack, „Das Periodische System der Elemente und seine Lücken“, *Angew. Chem.* 47 (1934) 301–305 (25. Apr. 1934).
- [41] O. Kobic, „Bohemium“, *Chem.-Ztg.* 58 (1934) 581.
- [42] H. G. Graetzer, D. J. Anderson: *The Discovery of Fission, a Documentary History*, Van Nostrand, New York 1971, S. 15.
- [43] P. H. M. Van Assche, „The Ignored Discovery of the Element  $Z = 43$ “, *Nucl. Phys. A480* (1988) 205–214.
- [44] L. A. Turner, „Nuclear Fission“, *Rev. Mod. Phys.* 12 (1940) 1–29 (abgeschlossen 6. Dez. 1939).
- [45] E. Amaldi, in [24], S. 277.
- [46] O. Hahn, „Von den natürlichen Umwandlungen des Urans zu seiner künstlichen Zerspaltung“, Nobel-Vortrag am 13. Dez. 1946, abgedruckt in [47], S. 247–267.
- [47] O. Hahn: *Mein Leben*, Bruckmann, München 1968.
- [48] F. Straßmann: *Kernspaltung – Berlin Dezember 1938*, Privatdruck, Mainz 1978, Text ohne die Bilder auch in [49], S. 203–211.
- [49] F. Krafft: *Im Schatten der Sensation – Leben und Wirken von Fritz Straßmann*, Verlag Chemie, Weinheim 1981.
- [50] F. Krafft, in [49], S. 314–322.
- [51] K.-E. Zimen, „Die Saga des Urans und der Januskopf des Fortschritts“, *Atomwirtschaft* 1988, 578–584.
- [52] I. Noddack, „Bemerkung zu den Untersuchungen von O. Hahn, L. Meitner und F. Straßmann über die Produkte, die bei der Bestrahlung von Uran mit Neutronen entstehen“, *Naturwissenschaften* 27 (1939) 212–213 (10. März 1939).
- [53] Anmerkung der Redaktion zu [52], *Naturwissenschaften* 27 (1939) 213.
- [54] I. Straßmann, M. Straßmann: *In Memoriam Fritz Straßmann*, Privatdruck, Mainz 1980.
- [55] F. Krafft, in [49], S. 219.
- [56] W. Seelmann-Eggebert, „Über die Entdeckung der Kernspaltung – ein historischer Rückblick“, *Chimia* 33 (1979) 275–282.
- [57] O. Hahn, L. Meitner, F. Straßmann, „Neue Umwandlungs-Prozesse bei Neutronen-Bestrahlung des Urans; Elemente jenseits Uran“, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* 69 (1936) 905–919 (14. März 1936).
- [58] O. Hahn, L. Meitner, „Über die künstliche Umwandlung des Urans durch Neutronen II“, *Naturwissenschaften* 23 (1935) 230–231 (2. März 1935).
- [59] O. Hahn, L. Meitner, F. Straßmann, „Einige weitere Bemerkungen über die künstlichen Umwandlungsprodukte beim Uran“, *Naturwissenschaften* 23 (1935) 544–545 (15. Juli 1935).
- [60] L. Meitner, O. Hahn, „Neue Umwandlungsprozesse bei Bestrahlung des Urans mit Neutronen“, *Naturwissenschaften* 24 (1936) 158–159 (10. Febr. 1936).
- [61] L. Meitner, O. Hahn, F. Straßmann, „Über die Umwandlungsreihen des Urans, die durch Neutronenbestrahlung erzeugt werden“, *Z. Phys.* 106 (1937) 249–270 (14. Mai 1937).
- [62] L. Meitner, „Über die  $\beta$ - und  $\alpha$ -Strahlen der Transurane“, *Ann. Phys.* 29 (1937) 246–250 (15. Apr. 1937).
- [63] O. Hahn, L. Meitner, F. Straßmann, „Über die Transurane und ihr chemisches Verhalten“, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* 70 (1937) 1374–1392 (15. Mai 1937).
- [64] O. Hahn, L. Meitner, F. Straßmann, „Ein neues langlebiges Umwandlungsprodukt in den Trans-Uranreihen“, *Naturwissenschaften* 26 (1938) 475–476 (12. Juli 1938).
- [65] P. Abelson, „Neutron Produced Activities in Uranium“, *Phys. Rev.* 53 (1938) 211–212 (Kurzfassung eines Vortrags vom 17. Dez. 1937).
- [66] W. Wefelmeier, „Ein Modell der Transurane“, *Naturwissenschaften* 27 (1939) 110–111 (28. Jan. 1939).
- [67] M. L. Pool, J. M. Cork, R. L. Thornton, „A Survey of Radioactivity Produced by High Energy Neutron Bombardment“, *Phys. Rev.* 52 (1937) 239–240 (3. Juli 1937).
- [68] O. M. Corbino, „Il radio artificiale: l'Ausonio e l'Esperio“, *Nuova Antologia* 71 (1936) 454–456, zitiert nach [24], S. 284.
- [69] E. Fermi, „Artificial Radioactivity Produced by Neutron Bombardment“, in: *The Nobel Foundation (Hrsg.): Les Prix Nobel en 1938*, Norsted, Stockholm 1939, S. 1–8.

- [70] L. L. Quill, „The Transuranium Elements“, *Chem. Rev.* 23 (1938) 87–155 (27. Juni 1938).
- [71] H. Hulubei, Y. Cauchois, „Existence probable de l'élément 93 à l'état naturel“, *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.* 207 (1938) 333–335 (1. Aug. 1938).
- [72] H. Hulubei, Y. Cauchois, „Nouvelles recherches sur l'élément 93 naturel“, *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.* 209 (1939) 476–479 (4. Sept. 1939).
- [73] O. Hahn, L. Meitner, „Die künstliche Umwandlung des Thoriums durch Neutronen: Bildung der bisher fehlenden radioaktiven 4n + 1 Reihe“, *Naturwissenschaften* 23 (1935) 320 (2. Mai 1935).
- [74] I. Curie, H. von Halban, P. Preiswerk, „Sur la création artificielle des éléments d'une famille radioactive inconnue, lors de l'irradiation du thorium par les neutrons“, *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.* 200 (1935) 1841–1843 (27. Mai 1935).
- [75] L. Meitner, F. Straßmann, O. Hahn, „Künstliche Umwandlungsprozesse bei Bestrahlung des Thoriums mit Neutronen: Auftreten isomerer Reihen durch Abspaltung von  $\alpha$ -Strahlen“, *Z. Phys.* 109 (1938) 538–552 (16. Mai 1938).
- [76] O. Hahn: *Erinnerungen 1901–1945*, aufgeschrieben im Juni 1945 und abgedruckt in [77], S. 15–73.
- [77] D. Hahn (Hrsg.): *Otto Hahn, Erlebnisse und Erkenntnisse*, Econ, Düsseldorf 1975.
- [78] E. Rona, E. Neuninger, „Weitere Beiträge zur Frage der künstlichen Aktivität des Thoriums durch Neutronen“, *Naturwissenschaften* 24 (1936) 491 (1. Juli 1936).
- [79] I. Curie, H. von Halban, P. Preiswerk, „Sur les éléments radioactifs formés lors de l'irradiation du thorium par les neutrons“, *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.* 200 (1935) 2079–2080 (17. Juni 1935).
- [80] I. Curie, H. von Halban, P. Preiswerk, „Sur la création artificielle d'éléments appartenant à une famille radioactive inconnue, lors de l'irradiation du thorium par les neutrons“, *J. Phys. Radium* (7) 6 (1935) 361–364 (15. Juli 1935).
- [81] A. Braun, P. Preiswerk, P. Scherrer, „Detection of  $\alpha$ -Particles in the Disintegration of Thorium“, *Nature (London)* 140 (1937) 682 (31. Aug. 1937).
- [82] G. von Droste, „Über Versuche eines Nachweises von  $\alpha$ -Strahlen während der Bestrahlung von Thorium und Uran mit Radium + Beryllium-Neutronen“, *Z. Phys.* 110 (1938) 84–94 (25. Mai 1938).
- [83] Y. Nishina, T. Yasaki, K. Kimura, M. Ikawa, „Artificial Production of Uranium Y from Thorium“, *Nature (London)* 142 (1938) 874 (13. Sept. 1938).
- [84] G. Friedlander, J. W. Kennedy, E. S. Macias, J. M. Miller: *Nuclear and Radiochemistry*, Wiley, New York 1981, S. 13–14.
- [85] I. Curie, P. Savitch, „Sur les radioéléments formés dans l'uranium irradié par les neutrons“, *J. Phys. Radium* (7) 8 (1937) 385–387 (1. Aug. 1937).
- [86] I. Curie, P. Savitch, „Sur les radioéléments formés dans l'uranium irradié par les neutrons II“, *J. Phys. Radium* (7) 9 (1938) 355–359 (12. Juli 1938).
- [87] L. Meitner, O. Hahn, Brief an I. Curie vom 20. Jan. 1938, Archiv des Institut Curie, Paris; *Monique Bordry* sei für die Klärung dieses und anderer Punkte gedankt.
- [88] I. Curie, P. Savitch, „Sur le radioélément de période 3,5 heures formé dans l'uranium irradié par les neutrons“, *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.* 206 (1938) 906–908 (21. März 1938).
- [89] I. Curie, P. Savitch, „Sur la nature du radioélément de période 3,5 heures formé dans l'uranium irradié par les neutrons“, *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.* 206 (1938) 1643–1644 (30. Mai 1938).
- [90] I. Curie, P. Savitch, A. Marques da Silva, „Sur le rayonnement du corps de période 3,5 heures formé par irradiation de l'uranium par les neutrons“, *J. Phys. Radium* (7) 9 (1938) 440 (20. Juli 1938).
- [91] I. Curie, P. Savitch, „Sur les radioéléments formés dans l'uranium et le thorium irradiés par les neutrons“, *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.* 208 (1939) 343–346 (30. Jan. 1939).
- [92] P. Biquard: *Frédéric Joliot-Curie et l'Énergie Atomique*, Seghers, Paris 1961, zitiert nach [24], S. 285–286.
- [93] O. Hahn, Brief an L. Meitner am 25. Okt. 1938, in [49], S. 236.
- [94] O. Hahn: *Die Auffindung der Uranspaltung, FIAT Review of German Science 1939–1946, Nuclear Physics and Cosmic Rays, Part 1*, Dieterich, Wiesbaden 1948, S. 171–178, abgedruckt in [95], S. 304–311.
- [95] H. Wohlfarth (Hrsg.): *40 Jahre Kernspaltung – Eine Einführung in die Originalliteratur*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1979.
- [96] O. Hahn, F. Straßmann, Protokollheft „Chem. II“, 1. Nov. 1938 – 14. Jan. 1939, Deutsches Museum München; kommentierte Transkription der Texte ohne die Meßdaten in [49], S. 234–280.
- [97] D. Hahn (Hrsg.): *Briefwechsel mit Lise Meitner November 1938–April 1939*, in [77], S. 75–129.
- [98] F. Krafft (Hrsg.): *Briefwechsel Otto Hahn – Lise Meitner 11. Aug. 1938–25. März 1945*, in [49], S. 74–135 und 228–337.
- [99] O. Hahn, Taschenkalender 1938, wiedergegeben, zum Teil als Faksimile, in [100].
- [100] P. Brix, „Die folgenreiche Entdeckung der Uranspaltung – und wie es dazu kam“, *Phys. Bl.* 45 (1989) 1–10; *Naturwiss. Rundsch.* 42 (1989) 1–9.
- [101] L. G. Cook, „Personal Reminiscences of the Kaiser Wilhelm Institute, Berlin, 1937/38, and of the Nuclear Project in Canada, 1944/45“, in [102], S. 69–72.
- [102] J. W. Behrens, A. D. Carlson (Hrsg.): *50 Years with Nuclear Fission*, 2 Bände, American Nuclear Society, La Grange Park, IL 1989.
- [103] „Chem. II“ [96], S. 2v.
- [104] O. Hahn, F. Straßmann, „Über die Entstehung von Radiumisotopen aus Uran durch Bestrahlen mit schnellen und verlangsamten Neutronen“, *Naturwissenschaften* 26 (1938) 755–756 (8. Nov. 1938).
- [105] O. Hahn, F. Straßmann, „Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle“, *Naturwissenschaften* 27 (1939) 11–15 (22. Dez. 1938).
- [106] [M.] S. Curie: *Untersuchungen über die radioaktiven Substanzen*, deutsche Ausg., 3. Aufl., Vieweg, Braunschweig 1904, S. 29–33.
- [107] O. Hahn, in [108], S. 15–19.
- [108] O. Hahn: *Vom Radiothor zur Uranspaltung – Eine wissenschaftliche Selbstbiographie*, Nachdruck der 1. Aufl. 1962 (D. Hahn, Hrsg.), Vieweg, Braunschweig 1989.
- [109] O. Hahn, „Ein neues radioaktives Element, das Thorium-Emanation aussendet“, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* 38 (1905) 3371–3375.
- [110] C. F. von Weizsäcker, „Metastabile Zustände der Atomkerne“, *Naturwissenschaften* 24 (1936) 813–814 (28. Nov. 1936).
- [111] C. F. von Weizsäcker, „Zum Wefelmeierschen Modell der Transurane“, *Naturwissenschaften* 27 (1939) 133 (9. Febr. 1939).
- [112] S. M. Polikanov, V. A. Druin, V. A. Karnaukhov, V. L. Mikheev, A. A. Pleve, N. K. Skobelev, V. G. Subbotin, G. M. Ter-Akopian, V. A. Fomichev, „Spontannoe delenie s anomalno korotkim periodom poluraspada“, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 42 (1962) 1464–1471; „Spontaneous Fission with Anomalously Short Period“, *Sov. Phys. JETP Engl. Transl.* 15 (1962) 1016–1021.
- [113] V. M. Strutinsky, „Shell Effects in Nuclear Masses and Deformation Energies“, *Nucl. Phys. A* 95 (1967) 420–442.
- [114] S. M. Polikanov, „Spontanno deljaschtschesja isomery“, *Usp. Fiz. Nauk* 94 (1968) 43–62; „Spontaneously Fissioning Isomers“, *Sov. Phys. Usp. Engl. Transl.* 11 (1968) 22–33.
- [115] S. M. Polikanov, „Jadernye isomery formy“, *Usp. Fiz. Nauk* 107 (1972) 685–704; „Nuclear Shape Isomers“, *Sov. Phys. Usp. Engl. Transl.* 15 (1973) 486–496.
- [116] O. Hahn, Brief an N. Feather vom 2. Juni 1939, in [49], S. 330–331.
- [117] O. Hahn, „Die ‚falschen‘ Transurane“, *Naturwiss. Rundsch.* 15 (1962) 43–47.
- [118] S. Flügge, „How Fission was Discovered“, in [102], S. 26–29.
- [119] „Chem. II“ [96], S. 40r–42r.
- [120] „Chem. II“ [96], S. 48r–50r.
- [121] „Chem. II“ [96], S. 64v, 68r–70v.
- [122] „Chem. II“ [96], S. 75r–77v.
- [123] O. Hahn, „Ein neues Zwischenprodukt im Thorium“, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* 40 (1907) 1462–1469.
- [124] O. Hahn, „Ein kurzlebiges Zwischenprodukt zwischen Mesothor und Radiothor“, *Phys. Z.* 9 (1908) 246–248.
- [125] O. Hahn, in [108], S. 39–44.
- [126] „Chem. II“ [96], S. 75r.
- [127] „Chem. II“ [96], S. 76v.
- [128] F. Krafft, in [49], S. 262.
- [129] „Chem. II“ [96], S. 77v.
- [130] O. Hahn, Brief an L. Meitner vom 19. Dez. 1938, Faksimile entnommen aus [131], S. 152; Transkription in [77], S. 77–79, und [49], S. 263–265.
- [131] D. Hahn (Hrsg.): *Otto Hahn – Begründer des Atomzeitalters*, List, München 1979.
- [132] „Chem. II“ [96], S. 79r–81v.
- [133] W. Seelmann-Eggebert, G. Pfennig, H. Münzel, H. Klewe-Nebenius: *Karlsruher Nuklidkarte*, 5. Aufl., Gersbach, München 1981.
- [134] R. L. Sime, „Lise Meitner and the Discovery of Fission“, *J. Chem. Educ.* 66 (1989) 373–376.
- [135] O. Hahn, in [108], S. 131–132.
- [136] O. Hahn, Brief an L. Meitner vom 21. Dez. 1938, in [77], S. 80–82, und [49], S. 265.
- [137] L. Meitner, Brief an O. Hahn vom 21. Dez. 1938, in [77], S. 79–80, und [49], S. 264–265.
- [138] O. Hahn, Brief an E. von Bahr-Bergius vom 23. Dez. 1938, in [49], S. 267.
- [139] Nach [49], S. 254, 267, dort auch Hinweise auf weitere Korrekturen; siehe dazu auch den Brief von O. Hahn an L. Meitner vom 28. Dez. 1938, in [49], S. 267.
- [140] O. Hahn, F. Straßmann, „Nachweis der Entstehung aktiver Bariumisotope aus Uran und Thorium durch Neutronenbestrahlung; Nachweis weiterer aktiver Bruchstücke bei der Uranspaltung“, *Naturwissenschaften* 27 (1939) 89–95 (28. Jan. 1939).
- [141] E. K. Hyde: *The Nuclear Properties of the Heavy Elements, Vol. III, Fission Phenomena*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs 1964, S. 4.
- [142] „Chem. II“ [96], S. 81r.
- [143] L. Meitner, Brief an O. Hahn vom 5. Febr. 1939, in [77], S. 98–100, und [49], S. 295.
- [144] L. Meitner, O. R. Frisch, „Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction“, *Nature (London)* 143 (1939) 239–240 (16. Jan. 1939).
- [145] O. Hahn, Brief an L. Meitner vom 24. Jan. 1939, in [77], S. 94, und [49], S. 282–283.

- [146] Y. Nishina, T. Yasaki, H. Ezoe, K. Kimura, M. Ikawa, „Fission of Thorium by Neutrons“, *Nature (London)* 144 (1939) 547–548 (29. Juli 1939).
- [147] O. R. Frisch, „The Discovery of Fission: How It All Began“, *Phys. Today* 20 (11) (1967) 43–48.
- [148] G. Gamow, „Mass Defect Curve and Nuclear Constitution“, *Proc. R. Soc. London A* 126 (1930) 632–644.
- [149] O. R. Frisch, Briefe an L. Meitner vom 3. Jan. 1939, in [150], und an O. Hahn vom 4. Jan. 1939, in [49], S. 271–272.
- [150] R. H. Stuewer, „Bringing the News of Fission to America“, *Phys. Today* 38 (10) (1985) 49–51.
- [151] O. R. Frisch, Brief an L. Meitner vom 8. Jan. 1939, in [33], S. 179, 182.
- [152] O. R. Frisch, Laborprotokoll vom 13. Jan. 1939, Blatt 2, oberer Teil, entnommen aus [33], S. 181; dort sind Blatt „Uran 1“ und „Uran 2“ vollständig wiedergegeben.
- [153] Entnommen aus [33], S. 174.
- [154] O. R. Frisch, „Physical Evidence for the Division of Heavy Nuclei under Neutron Bombardment“, *Nature (London)* 143 (1939) 276 (16. Jan. 1939).
- [155] H. L. Anderson, E. T. Booth, J. R. Dunning, E. Fermi, G. N. Glasoe, F. G. Slack, „The Fission of Uranium“, *Phys. Rev.* 55 (1939) 509–510 (16. Febr. 1939); Abbildung 25 ist nicht dort, sondern in [156] enthalten.
- [156] S. Glasstone: *Sourcebook on Atomic Energy*, 3. Aufl., Van Nostrand, New York 1967, S. 477.
- [157] H. L. Anderson, „The Legacy of Fermi and Szilard“, *Bull. At. Sci.* 30 (9) (1974) 56–62.
- [158] M. A. Tuve, „Droplet Fission of Uranium and Thorium Nuclei“, *Science (Washington DC)* 89 (1939) 202–203.
- [159] D. R. Corson, R. L. Thornton, „Disintegration of Uranium“, *Phys. Rev.* 55 (1939) 509 (15. Febr. 1939).
- [160] F. Joliot, „Observation par la méthode de Wilson des trajectoires de brouillard des produits de l'explosion des noyaux d'uranium“, *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.* 208 (1939) 647–649 (27. Febr. 1939).
- [161] S. Flügge, G. von Droste, „Energetische Betrachtungen zu der Entstehung von Barium bei der Neutronenbestrahlung von Uran“, *Z. Phys. Chem. B* 42 (1939) 274–280 (22. Jan. 1939).
- [162] G. K. Green, L. W. Alvarez, „Heavily Ionizing Particles from Uranium“, *Phys. Rev.* 55 (1939) 417 (31. Jan. 1939).
- [163] R. D. Fowler, R. W. Dodson, „Intensely Ionizing Particles Produced by Neutron Bombardment of Uranium and Thorium“, *Phys. Rev.* 55 (1939) 417–418 (3. Febr. 1939).
- [164] R. B. Roberts, R. C. Meyer, L. R. Hafstad, „Droplet Fission of Uranium and Thorium Nuclei“, *Phys. Rev.* 55 (1939) 416–417 (4. Febr. 1939).
- [165] W. Jentschke, F. Prankl, „Untersuchung der schweren Kernbruchstücke beim Zerfall von neutronenbestrahltem Uran und Thorium“, *Naturwissenschaften* 27 (1939) 134–135 (14. Febr. 1939).
- [166] G. von Droste, „Über die Energieverteilung der bei Bestrahlung von Uran mit Neutronen entstehenden Bruchstücke“, *Naturwissenschaften* 27 (1939) 198 (17. März 1939).
- [167] F. Joliot, „Preuve expérimentale de la rupture explosive des noyaux d'uranium et de thorium sous l'action des neutrons“, *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.* 208 (1939) 341–343 (30. Jan. 1939).
- [168] P. Radvanyi, M. Bordry: *La radioactivité artificielle et son histoire*, Seuil/CNRS, Paris 1984, S. 149.
- [169] P. Radvanyi, persönliche Mitteilung, Nov. 1989.
- [170] S. R. Weart: *Scientists in Power*, Harvard University Press, Cambridge 1979, S. 64.
- [171] E. McMillan, „Radioactive Recoils from Uranium Activated by Neutrons“, *Phys. Rev.* 55 (1939) 510 (17. Febr. 1939).
- [172] L. Badash, E. Hodes, A. Tiddens, „Nuclear Fission: Reaction to the Discovery in 1939“, *Proc. Am. Philos. Soc.* 130 (1986) 196–231.
- [173] J. A. Wheeler, „Fission in 1939: The Puzzle and the Promise“, in [102], S. 45–52; ebenfalls in *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 39 (1989) XIII–XXVIII.
- [174] N. Bohr, „Disintegration of Heavy Nuclei“, *Nature (London)* 143 (1939) 330 (20. Jan. 1939).
- [175] C. F. Squire, F. G. Brickwedde, E. Teller, M. A. Tuve, „The Fifth Washington Conference on Theoretical Physics“, *Science (Washington, DC)* 89 (1939) 180–182.
- [176] „Atom Explosion Frees 200 000 000 Volts – New Physics Phenomenon Credited to Hahn“, *New York Times* vom 28. Jan. 1939, abgedruckt in [108], S. 145.
- [177] N. Bohr, „Resonance in Uranium and Thorium Disintegrations and the Phenomenon of Nuclear Fission“, *Phys. Rev.* 55 (1939) 418–419 (7. Febr. 1939).
- [178] A. J. Dempster, „Isotopic Constitution of Uranium“, *Nature (London)* 136 (1939) 180 (12. Juli 1935).
- [179] E. Feenberg, „On the Shape and Stability of Heavy Nuclei“, *Phys. Rev.* 55 (1939) 504–505 (14. Febr. 1939).
- [180] J. Frenkel, „On the Splitting of Heavy Nuclei by Slow Neutrons“, *Phys. Rev.* 55 (1939) 987 (12. März 1939).
- [181] N. Bohr, J. A. Wheeler, „The Mechanism of Nuclear Fission“, *Phys. Rev.* 56 (1939) 426–450 (28. Juni 1939).
- [182] H. von Halban, F. Joliot, L. Kowarski, „Liberation of Neutrons in the Nuclear Explosion of Uranium“, *Nature (London)* 143 (1939) 470–471 (8. März 1939).
- [183] H. L. Anderson, E. Fermi, H. B. Hanstein, „Production of Neutrons in Uranium Bombarded by Neutrons“, *Phys. Rev.* 55 (1939) 797–798 (16. März 1939).
- [184] S. Flügge, „Kann der Energieinhalt der Atomkerne technisch nutzbar gemacht werden?“, *Naturwissenschaften* 27 (1939) 402–410 (erschieden 9. Juni 1939).
- [185] E. Fermi, „Experimental Production of a Divergent Chain Reaction“, *Am. J. Phys.* 20 (1952) 536–558.
- [186] L. Meitner, O. R. Frisch, „Products of the Fission of the Uranium Nucleus“, *Nature (London)* 143 (1939) 471–472 (6. März 1939).
- [187] N. Feather, „Fission of Heavy Nuclei: a New Type of Nuclear Disintegration“, *Nature (London)* 143 (1939) 877–879 (erschieden 27. Mai 1939).
- [188] N. Feather, „Fission of Heavy Nuclei“, *Nature (London)* 143 (1939) 1027 (erschieden 17. Juni 1939).
- [189] L. W. Alvarez: *Alvarez – Adventures of a Physicist*, Basic Books, New York 1988, S. 75.
- [190] S. Curran, zitiert in G. N. Walton, „Nuclear Fission“, *Q. Rev. Chem. Soc. (London)* 15 (1961) 74.
- [191] H. Maier-Leibnitz (1937), zitiert nach A.-L. Edingshaus: *Heinz Maier-Leibnitz – Ein halbes Jahrhundert experimentelle Physik*, Piper, München 1986, S. 66.
- [192] E. Segrè, „Fermi and Neutron Physics“, *Rev. Mod. Phys.* 27 (1955) 257–263.
- [193] P. H. Abelson, „Products of Neutron Irradiation“, *J. Chem. Educ.* 66 (1989) 364–366.
- [194] P. Abelson, „Cleavage of the Uranium Nucleus“, *Phys. Rev.* 55 (1939) 418 (3. Febr. 1939).
- [195] P. Abelson, „An Investigation of the Products of the Disintegration of Uranium by Neutrons“, *Phys. Rev.* 56 (1939) 1 (11. Mai 1939).
- [196] F. Straßmann, persönliche Mitteilung, ca. 1950, und handschriftliche Notiz 1969, in [49], S. 221.
- [197] B. Goldschmidt: *Pionniers de l'atome*, Stock, Paris 1987, S. 39–40.
- [198] G. Herrmann, „Technetium or Masurium – a Comment on the History of Element 43“, *Nucl. Phys. A* 505 (1989) 352–360.
- [199] N. Feather, E. Bretscher, „Atomic Numbers of the So-called Transuranic Elements“, *Nature (London)* 143 (1939) 516 (9. März 1939).
- [200] O. Hahn, F. Straßmann, „Zur Frage nach der Existenz der ‚Trans-Urane‘. I. Endgültige Streichung von Eka-Platin und Eka-Iridium“, *Naturwissenschaften* 27 (1939) 451–453 (19. Juni. 1939).
- [201] L. Meitner, „New Products of the Fission of the Thorium Nucleus“, *Nature (London)* 143 (1939) 637 (26. März 1939).
- [202] E. Bretscher, L. G. Cook, „Transmutations of Uranium and Thorium Nuclei by Neutrons“, *Nature (London)* 143 (1939) 559–560 (11. März 1939).
- [203] V. G. Khlopin, M. A. Pasvick-Khlopina, N. F. Volkov, „Division of Uranium Nuclei under the Action of Neutrons and the Problem of the Existence of Transuraniums“, *C. R. (Dokl.) Acad. Sci. URSS* 24 (1939) 118–121 (9. Mai 1939).
- [204] O. Hahn, in [108], S. 144–149.
- [205] F. Straßmann, Brief an O. Hahn vom 5. Okt. 1960, basierend auf einer Studie des Autors, in [49], S. 228–232.
- [206] H. Menke, G. Herrmann, „Was waren die ‚Transurane‘ der dreißiger Jahre in Wirklichkeit?“, *Radiochim. Acta* 16 (1971) 119–123.
- [207] F. Baroncelli, „Che cosa erano i ‚Transuranici‘ studiati a Roma nel 1934“, *Atti Accad. Naz. Lincei Cl. Sci. Fis. Mat. Nat. Rend.* 78 (1985) 29–33.
- [208] W. Seelmann-Eggebert, F. Straßmann, „Über die bei der Uranspaltung noch zu erwartenden Bruchstücke“, *Z. Naturforsch. A* 2 (1947) 80–86 (31. Okt. 1946).
- [209] E. P. Steinberg, „Radiochemistry of the Fission Products“, *J. Chem. Educ.* 66 (1989) 367–372.
- [210] J. M. Siegel (Hrsg.), „Nuclei Formed in Fission: Decay Characteristics, Fission Yields, and Chain Relationships“, *J. Am. Chem. Soc.* 68 (1946) 2411–2442 (29. Aug. 1946); gleichzeitig in *Rev. Mod. Phys.* 18 (1946) 513–544.
- [211] C. D. Coryell, N. Sugarman (Hrsg.): *Radiochemical Studies: The Fission Products*, 3 Bände, McGraw-Hill, New York 1951.
- [212] G. Herrmann, „Über einige Strontiumisotope in der Uranspaltung“, *Z. Elektrochem.* 58 (1954) 626–629.
- [213] O. Hahn, F. Straßmann, „Weitere Spaltprodukte aus der Bestrahlung des Urans mit Neutronen“, *Naturwissenschaften* 27 (1939) 529–534 (22. Juli 1939).
- [214] A. C. Wahl, „Nuclear Charge Distribution in Fission“, in N. Metropolis, D. M. Kerr, G.-C. Rotta (Hrsg.): *New Directions in Physics*, Academic Press, New York 1987, S. 163–189.
- [215] E. Segrè, „An Unsuccessful Search for Transuranic Elements“, *Phys. Rev.* 55 (1939) 1104–1105 (10. Mai 1939).
- [216] E. Segrè, „The Discovery of Nuclear Fission“, *Phys. Today* 42 (7) (1989) 38–43.
- [217] C. Perrier, E. Segrè, „Some Chemical Properties of Element 43“, *J. Chem. Phys.* 5 (1937) 712–716.
- [218] J. W. Irvine, „Concentrating the Uranium Isotope of Twenty-Three-Minute Half-Life“, *Phys. Rev.* 55 (1939) 1105 (16. Mai 1939).
- [219] E. McMillan, P. H. Abelson, „Radioactive Element 93“, *Phys. Rev.* 57 (1940) 1185–1186 (27. Mai 1940).

- [220] O. Hahn, Briefe an Lise Meitner vom 10. und 16. Mai 1939, in [49], S. 307.
- [221] K. Starke, „Abtrennung des Elements 93“, *Naturwissenschaften* 30 (1942) 107–108 (19. Jan. 1942).
- [222] K. Starke, „Anreicherung des künstlich radioaktiven Uran-Isotops  $^{239}_{92}\text{U}$  und seines Folgeprodukts  $^{239}_{93}\text{Pu}$  (Element 93)“, *Naturwissenschaften* 30 (1942) 577–582 (erschienen 18. Sept. 1942).
- [223] L. Szilard, T. A. Chalmers, „Chemical Separation of the Radioactive Element from its Bombarded Isotope in the Fermi Effect“, *Nature (London)* 134 (1934) 462.
- [224] K. Starke, „Transuranium Research in Germany 1939 to 1945“, *Atomkernenergie* 41 (1982) 264–266.
- [225] K. Starke, „Zur Frühgeschichte des Neptuniums“, *Isotopenpraxis*, im Druck.
- [226] O. Hahn, Brief an L. Meitner vom 31. Aug. 1940, in [49], S. 125–126.
- [227] O. Hahn, Briefe an L. Meitner vom 16. Sept. und 17. Okt. 1940, in [49], S. 126.
- [228] F. Straßmann, O. Hahn, „Über die Isolierung und einige Eigenschaften des Elements 93“, *Naturwissenschaften* 30 (1942) 256–260 (2. Apr. 1942).
- [229] G. T. Seaborg, „The Chemical and Radioactive Properties of the Heavy Elements“, *Chem. Eng. News* 23 (1945) 2190–2193 (10. Dez. 1945).
- [230] G. Herrmann, „Synthese schwerster chemischer Elemente – Ergebnisse und Perspektiven“, *Angew. Chem.* 100 (1988) 1471–1491; „Synthesis of the Heaviest Chemical Elements – Results and Perspectives“, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 27 (1988) 1417–1436.
- [231] G. Münzenberg, S. Hofmann, F. P. Heßberger, W. Reisdorf, K. H. Schmidt, J. H. R. Schneider, P. Armbruster, C. C. Sahm, B. Thuma, „Identification of Element 107 by  $\alpha$  Correlation Chains“, *Z. Phys. A* 300 (1981) 107–108.
- [232] E. K. Hulet, „Chemistry of the Elements Einsteinium through Element 105“, *Radiochim. Acta* 32 (1983) 7–23.
- [233] O. L. Keller, „Chemistry of the Heavy Actinides and Light Transactinides“, *Radiochim. Acta* 37 (1984) 169–180.
- [234] R. J. Silva, „Transeinsteinium Elements“, in [235], Bd. 2, S. 1086–1117.
- [235] J. J. Katz, G. T. Seaborg, L. R. Morss (Hrsg.): *The Chemistry of the Actinide Elements*, 2. Aufl., Chapman and Hall, New York 1986.
- [236] K. E. Gregorich, R. A. Henderson, D. M. Lee, M. J. Nurmiä, R. M. Chasteler, H. L. Hall, D. A. Bennett, C. M. Gannett, R. B. Chadwick, J. D. Leyba, D. C. Hoffman, G. Herrmann, „Aqueous Chemistry of Element 105“, *Radiochim. Acta* 43 (1988) 223–231.
- [237] J. V. Kratz, H. P. Zimmermann, U. W. Scherer, M. Schädel, W. Brühle, K. E. Gregorich, C. M. Gannett, H. L. Hall, R. A. Henderson, D. M. Lee, J. D. Leyba, M. J. Nurmiä, D. C. Hoffman, H. Gäggeler, D. Jost, U. Baltensperger, Ya Nai-Qi, A. Türler, C. Lienert, „Chemical Properties of Element 105 in Aqueous Solutions: Halide Complex Formation and Anion Exchange into Triisooctyl Amine“, *Radiochim. Acta* 48 (1989) 121–133.
- [238] B. L. Zhuikov, Yu. T. Chuburkov, S. N. Timokhin, Kim U Jin, I. Zvara, „Is Element 104 (Kurchatovium) a p-Element?“, *Radiochim. Acta* 46 (1989) 113–116.
- [239] [G. N.] Flerov, [K. A.] Petrjak [Petrzhak], „Spontaneous Fission of Uranium“, *Phys. Rev.* 58 (1940) 89 (14. Juni 1940).
- [240] K. A. Petrzhak, G. N. Flerov, „Über die spontane Teilung von Uran“, *C. R. (Dokl.) Acad. Sci. URSS* 28 (1940) 500–501 (15. Juni 1940).
- [241] G. N. Flerov, K. A. Petrzhak, „Spontaneous Fission of Uranium“, *J. Phys.* 3 (1940) 275–280, abgedruckt in [95], S. 196–204.
- [242] O. R. Frisch: *What Little I Remember*, Cambridge University Press, Cambridge 1979, S. 118.
- [243] P. K. Kuroda, „On the Nuclear Physical Stability of the Uranium Minerals“, *J. Chem. Phys.* 25 (1956) 781–782.
- [244] H. Bouzigues, R. J. M. Boyer, C. Seyve, P. Teulière (1972), in [245], S. 237–243.
- [245] Le Phenomene D'Oklo, Comptes Rendus d'un Colloque, Libreville, 23 au 27 Juin 1975, Int. Atomic Energy Agency, Wien 1975.
- [246] M. Maurette, „Fossil Nuclear Reactors“, *Annu. Rev. Nucl. Sci.* 26 (1976) 319–350.
- [247] O. Hahn, in [108], S. 122–123.