

Die Entdeckung von Protactinium von Kasimir Fajans und Oswald Göhring im Jahr 1913

Prof. Dr. habil. Siegfried Niese, Am Silberblick 9, 01723 Wilsdruff
<siegfried@niese-mohorn.de>

Im Jahr 1913 entdeckte Kasimir Fajans mit seinem Doktoranden Oswald Göhring das Protactinium in Form seines kurzlebigen Isotops ^{234m}Pa , dass sie wegen dessen kurzer Lebensdauer Brevium nannten. Hier soll auf die Geschichte der Entdeckung des Protactiniums etwas eingehender eingegangen werden. In diesem Beitrag werden für die radioaktiven Elemente und Isotope der natürlichen Zerfallsreihen die in jener Zeit üblichen Symbole und bei der erstmaligen Nennung dazu die jetzt gültige Nomenklatur in Klammern angegeben.

Im gleichen Jahr machten Physiker und Chemiker, die die anregende Atmosphäre von Ernest Rutherford in Montreal oder Manchester erleben konnten, bedeutende Entdeckungen. Niels Bohr entdeckte das Atommodell, und Frederik Soddy brachte mit dem Begriff der Isotope Ordnung in die vielen seit der Entdeckung des Poloniums durch Marie Curie neu entdeckten radioaktiven Elemente, die keinen Platz mehr im Periodischen System der Elemente (PSE) fanden. Moseley entdeckt die Beziehung zwischen den Wellenlängen von Röntgenstrahlen und den Kernladungszahlen und Georg von Hevesy begründete zusammen mit Fritz Paneth mit der Indikatormethode die Radiochemische Analytik. Nachdem fünf Jahre später Otto Hahn und Lise Meitner das langlebige Isotop ^{231}Pa als Mutternuclid des Actiniums entdeckt hatten, wurden in der Literatur sowohl Fajans und Göhring als auch Otto Hahn und Lise Meitner als Entdecker genannt, obwohl Otto Hahn nie einen Zweifel daran ließ, dass Fajans und Göhring das Element Protactinium entdeckt hatten. Auf einer Nomenklatur-Konferenz der IUPAC 1949 in Amsterdam soll, wie bei Wikipedia steht, nicht nur die Namensgebung sondern auch die Entdeckung des Elementes Hahn und Meitner zugeschrieben worden sein.

Mit der Russell-Soddy-Fajansschen Verschiebungsregel wird die Entdeckung des Elementes 91 vorbereitet

Kasimir Fajans wurde am 27. 5. 1887 in Warschau geboren und studierte nach dem Besuch des Realgymnasiums in Warschau ab 1904 an der Universität Leipzig Biologie. Unter dem Eindruck der großen Persönlichkeit von Wilhelm Ostwald wechselte er zur physikalischen Chemie und setzte sein Studium 1907 in Heidelberg bei Georg Bredig fort, wo er 1909 promovierte. Nach einem Studienaufenthalt in Zürich 1909/10 ging er 1910 nach Manchester zu Ernest Rutherford, um sich mit Radioaktivität zu beschäftigen.

Bei Rutherford in Manchester weilten um das Jahr 1911 Wissenschaftler aus vielen Ländern zu Studienaufenthalten und Besuchen. Fajans traf dort u.a. die Engländer James Chadwick, Charles G. Darwin, Walter Makower, Henry G.-J. Moseley und John Mitchel Nuttal, den Russen George N. Antonoff und den Ungarn Georg von Hevesy. Rutherfords Assistent Hans Geiger leitete den Einführungskurs in die radioaktiven Methoden.¹ Als Fajans nach Manchester kam, war allgemein akzeptiert, dass die Radioaktivität auf der spontanen Umwandlung von Atomen unter Aussendung von positiv geladenen Heliumatomen, den α -Strahlen, und von Elektronen, den β -Strahlen, beruht. Man kannte in den drei radioaktiven Zerfallsreihen, bei denen Uran, Thorium und Actinium über mehrere radioaktive Elemente als Zwischenstufen unterschiedlicher Lebensdauer zerfallen, schon viel mehr Radioelemente als es Plätze im Periodensystem der Elemente gab. Auch wenn sich manche dieser in den Zerfallseigenschaften unterscheidenden Radioelemente chemisch nicht voneinander trennen ließen, wusste man noch nicht, dass es sich um Isotope gleicher Elemente mit unterschiedlichen Massen handelte.

Man kannte in der Uranzerfallsreihe den zweimaligen Betazerfall vom RaB (^{214}Pb) über RaC1 (^{214}Bi) und RaC2 (^{214}Po) und nachfolgenden α -Zerfall zum Betastrahler RaD (^{210}Pb). Fajans untersuchte zusammen mit Makower in Manchester den α -Zerfall des RaC1, wobei sie über dem radioaktiven Präparat eine Platte anordneten, auf der sich durch den α -Zerfall zurückgestoßene Tochterkerne sammelten. Dabei beobachteten sie, dass RaD direkt aus RaC1 zu entstehen schien, weshalb Fajans nach dem α -Zerfall ein für den Ladungsausgleich notwendiges β -strahlendes Zerfallsprodukt RaC' (^{210}Tl) einführte.² Er fand, dass das Verzweigungsverhältnis für diesen zweiten Weg nur $3 \cdot 10^4$ beträgt. Damit hatte Fajans in Manchester eine Verzweigung der Zerfallsarten entdeckt, die auch in der Thorium- und der Aktiniumreihe nachgewiesen wurde. Nach einer solchen Verzweigung wurde später auch gesucht, um die Bildung des Aktiniums aus dem langlebigen Uranium herzuleiten.

Für die Einordnung der Radioelemente in das PSE spielt deren Valenz eine entscheidende Rolle. Hevesy versuchte diese durch Bestimmung von Diffusionskoeffizienten³ und deren Stellung in der Spannungsreihe zu ermitteln.⁴ Hevesy, der von der Elektrochemie zur Radiochemie gekommen war, wies darauf hin, dass sich Radioelemente aus Lösungen auf Metallplatten niederschlagen, wie es Willy Marckwald in Berlin mit RaF (²¹⁰Po) auf Wismut und Friedrich von Lerch in Wien für die Trennung von RaC von RaB auf einer Nickelplatte demonstriert hatten, und schrieb:

„Die Nernstsche Theorie der galvanischen Stromerzeugung verlangt, dass jedes Metall in reinem Wasser gebracht, wasserzersetzend wirken muss, denn andererseits würde die Gleichung $E = RT \ln(C/c)$ für den Potentialsprung den Wert unendlich annehmen“.

Dazu schrieb Fajans⁵ Hevesy⁶ bestätigend zitierend und die ältere Annahme von Richard Lucas, dass „jede radioaktive Umwandlung zu einem Produkt führt, das elektrochemisch edler ist als die unmittelbare Muttersubstanz“ korrigierend,⁷ dass das Zerfallsprodukt eines α -Strahlers positiver und eines β -Strahlers negativer als die Mutter ist.

Der als Nachfolger von Fritz Haber zum Professor für Physikalische Chemie an die TH Karlsruhe berufene Georg Bredig bot 1911 Fajans die Stelle eines Oberassistenten an, der in dem im Krieg 1944 zerstörten und 1950 wieder aufgebauten Laborgebäude in der Englerstraße seine Arbeiten zur Radioaktivität fortsetzte, 1912 über die Verzweigung beim Zerfall des RaC habilitierte⁸ und 1913 Privatdozent für physikalische Chemie wurde.

Die Fragen der später als Isotope bezeichneten chemisch nicht trennbaren Radioelemente und die Bildung neuer Radioelemente beim radioaktiven Zerfall waren Gegenstand vieler Diskussionen in Manchester. Fajans formulierte Ende 1912 in zwei Arbeiten⁹ wie Alexander Smith Russell¹⁰ und unabhängig von und zeitgleich mit Frederick Soddy¹¹ die nach ihnen benannten radioaktiven Verschiebungsgesetze, die beschreiben, wie sich bei einem radioaktiven Zerfall die Stellung des entstehenden Elementes im PSE dahingehend verändert, dass bei einem α -Strahlenübergang der Kern zwei positive Ladungen verliert und deshalb im PSE um zwei Plätze nach hinten rückt und bei einem β -Übergang bei dem ein Elektron den Kern verlässt, die positive Kernladung um 1 zunimmt, und das neugebildete Element in der folgenden Gruppe des periodischen Systems zu finden ist.

Mit der alleinigen Publikation der Verschiebungsgesetze hatte sich Fajans den Unwillen einiger seiner Kollegen zugezogen. Dabei fühlte sich Hevesy ausge-

nutzt, was er auch 50 Jahre später nicht vergessen hatte. In Beantwortung einer Anfrage von Fajans nach Briefen, die er Hevesy seit ihrer Begegnung in der Hochschule in Zürich schrieb, die Hevesy jedoch bei seinen vielen Umzügen nicht aufbewahrt hat, erinnert Hevesy Fajans daran, dass er im Frühjahr 1912 auf Fajans Bitte auf dem Wege von Manchester nach Budapest ihn in Karlsruhe besucht und bei dieser Gelegenheit von Russells Vortrag in Manchester über die „displacement laws“ (Verschiebungsgesetze) berichtet hat.¹² Hevesy hatte ihm dabei bereitwillig nicht nur seine eigenen neuen Ergebnisse und Gedanken mitgeteilt, sondern auch über die Diskussionen berichtet, die er in Manchester mit Russell geführt hatte. Hevesy hatte das auch in einem Brief an Rutherford angedeutet, und Fajans in Briefen an seinen Freund Fritz Paneth mehrfach mit spöttischen Bemerkungen bedacht. In ähnlicher Weise äußerte sich auch der Direktor des Wiener Radiuminstituts Stefan Meyer. In einem Buch schreibt Russell später „Die Verallgemeinerung dieses Gesetzes erfolgte gleichzeitig von Russell, Soddy und Fajans“.¹³ Möglicherweise hat der Unwille einiger seiner Kollegen dazu geführt, dass man seine kurz darauf folgende Entdeckung des Elementes 91 nicht besonders gewürdigt hat.

1871 hatte Dimitri Mendeleev bei der Aufstellung des PSE zwischen Thorium und Uran ein fehlendes Element 91 vorausgesagt.¹⁴ Er nannte es Ekatantal (Et), weil es in seinem System unter dem Element Ta einzuordnen war. Es sollte dem Tantal ähnlich sein, die Atommasse 235 haben und ein Oxid Et_2O_5 bilden. Da sich beim β -Zerfall die Kernladungszahl um 1 erhöht, musste aus dem durch α -Zerfall aus dem Uran (^{238}U) entstandene Thoriumisotop UX1 (^{234}Th) ein Element der Kernladungszahl 91 entstehen, das seinerseits wieder unter Emission von β -Strahlen zerfallen sollte, um zum Uran II (^{234}U) mit der Kernladungszahl 92 zu gelangen. So folgerten sowohl Fajans als auch Russell,¹⁵ dass der β -Strahler UX mit den chemischen Eigenschaften des Thoriums und einer Halbwertszeit von 24,6 Tagen, bei dem bei der Absorption der β -Strahlung zwei Komponenten mit wesentlich unterschiedlichen Energien gemessen wurden, ein Gemisch von zwei Nukliden (UX1 und UX2) sein muss.

Die Entdeckung des Elementes 91 durch Kasimir Fajans und Oswald Göhring im Jahr 1913 in Karlsruhe

Fajans und Göhring suchten daraufhin das Radioelement 91 aus dem als Gemisch zweier Radioelemente angenommenen UX abzutrennen. Aus den Erfahrungen, dass in der Zerfallsreihe des Radiums aus den Radioelementen RaD (^{210}Pb), RaE (^{210}Bi) und RaF (^{210}Po) das durch β -Zerfall entstehende Radioelement jeweils edler als das Mutterelement ist, gingen sie davon aus, dass auch das gesuchte

UX2, das Element 91, edler als das UX1 ist, und es sich deshalb besser als UX1 auf Blei abscheidet. Sie gossen deshalb eine schwach saure Lösung von UX auf eine vom Oxid befreite Bleischale und nach einiger Zeit wieder ab und brachten danach die Schale unter ein Elektrometer. In der durch aufeinanderfolgende Messungen der Radioaktivität erhaltenen Abklingkurve identifizierten sie zwei Komponenten. Am intensivsten war ein kurzlebige Nuklid mit der Halbwertszeit von ca. 1,1 min. Nach dessen Abklingen verblieb ein Rest mit der vom UX1 bekannten Halbwertszeit von 24,6 Tagen. Über den somit erfolgten experimentellen Nachweis des vorausgesagten Elementes 91 schickten sie am 15. März 1913 eine kurze Mitteilung zur Redaktion der Zeitschrift *Naturwissenschaften* mit dem Titel „Über die komplexe Natur des UrX.“, die am 4. April 1913 erschien.¹⁶ Sie schrieben:

„Die Versuche ... führen uns in der Tat zur Auffindung eines neuen Elementes (UrX2) mit einer Halbwertszeit von ca. 1,1 Min. [...] Es sind Versuche im Gange, um zu entscheiden, ob das neue Element in der Tat der Tantalgruppe gehört, wie es Russel und Fajans geschlossen haben.“

Wie der Fajans - Biograf Josef Hurwic schrieb, war die Entdeckung des Protactiniums eine unmittelbare Folge der Verschiebungsregeln.¹⁷ Es bleibt offen, ob Fajans die UX2-Abtrennung von UX zuerst durch elektrolytische Abscheidung und nicht durch Fällung mit Tantal unter dem Eindruck seiner vorangegangenen Experimente zur Elektrochemie der Radioelemente versucht hat oder weil ihm nicht sofort ein Tantalpräparat zur Hand war.

In der zweiten ausführlicheren Publikation „Über das UranX2 – das neue Element der Uranreihe“, die am 9.8.1913 in der Redaktion eingegangen war, und in der sie das UX2 nicht nur im Text sondern auch in der Überschrift als neues Element bezeichneten, beschrieben sie, nachdem sie kurz auf die elektrochemische Trennung von UX1 und UX2 auf Blei eingegangen waren, die zum Element 91 führende vorher angekündigte Abtrennung mit Tantaloxid. Von 500 g Uranylнитrat, das sie von der Fa. Kahlbaum geliehen hatten, trennten sie zuerst Uran durch Schütteln mit Äther ab, fällten Thorium mit dem Isotop UX1 mit Ammoniak, reinigten den Niederschlag von anhaftenden Uranionen durch Waschen mit Ammoniumkarbonat und lösten den Rückstand in Salzsäure. Daraus fällten sie das Thorium mit Oxalsäure und brachten den Niederschlag durch Abrauchen mit Salpetersäure wieder in Lösung. Nach Zugabe von Kalium-Tantal-Hexafluorid fällten sie daraus unter verschiedenen Versuchsbedingungen das sich aus dem UX1 gebildete UX2 (^{234m}Pa) aus. Bei dessen Messung konnten sie die kurze Halbwertszeit bestätigen und eine ziemlich harte β -Strahlung feststellen, während das verbleibende UX1 (²³⁴Th) mit der längeren Halbwertszeit nur eine weiche β -

Strahlung emittiert. Weil das entdeckte UX2 nur eine Halbwertszeit von 1,1 min hat, nannten sie das Element Brevium (Bv).¹⁸

Kurz zuvor beschrieben Hahn und Meitner in einer Publikation, die am 18. Juni 1913 in der Redaktion einging, Versuche, „um die Existenz des von Fajans und Soddy neuentdeckten Urans X2 zu bestätigen und eine einfache Methode zu seiner Herstellung aufzuführen“. Sie hatten zur besseren Abtrennung für das UX1 etwas Thoriumnitrat zugegeben und das UX2 nicht, wie es Fajans und Göhring in der Arbeit in den Naturwissenschaften als ihren nächsten Schritt angekündigt hatten, mit Ta aus der Lösung gefällt, sondern Tantaloxid (Ta_2O_5) in Wasser gekocht und auf diesen Niederschlag die Lösung von UX gegeben, wobei darauf vorwiegend UX2 absorbiert wurde.¹⁹ Hahn und Meitner wiesen in der Arbeit eindeutig auf Fajans und Göhring hin. Dass sie deren Mitteilung in den Naturwissenschaften nicht direkt zitierten, mag daran liegen, dass ihnen bei der Abfassung ihres Manuskriptes die Zeitschrift noch nicht vorlag. Ebenso wird es bei der o.g. Arbeit von Fajans und Göhring gewesen sein, die neun Wochen später bei der Redaktion einging; sowie bei einem Beitrag zur Stellung des Actiniums im Periodischen System.²⁰ In seiner Dissertationsschrift beschreibt Göhring ausführlich die Versuche zur Isolierung des UX2.²¹ Wir können daraus entnehmen, dass Fajans und Göhring als besten Wert für die Abscheidung auf Blei ein Gemisch von 85% UX2 und 15% UX1 erhalten hatten. Bei den folgenden Versuchen zur Mitfällung des UX2 war anfangs auch UX1 mitgefällt worden. Nachdem sie dem UX etwas Thoriumsalz zugesetzt und so das Thoriumisotop UX1 verdünnt hatten, konnte der Anteil an UX1, der mit dem Tantaloxid mitgefällt wurde, auf 0,2 % verringert werden. Somit hatten Fajans und Göhring im Jahr 1913, wenn auch in Form eines kurzlebigen Isotops, das Element 91 entdeckt.

Die Suche nach dem langlebigen radioaktiven Vorgängerelement des Actiniums

Vor dem Ersten Weltkrieg kannte man drei radioaktive Zerfallsreihen, die mit den Elementen Uran, Thorium und Actinium begannen. Da das langlebige Actinium im Gegensatz zu Uran und Thorium nur eine Halbwertszeit von 21,8 Jahren besitzt, musste es ein Vorläuferelement geben, dessen Halbwertszeit so groß war, dass es seit seiner Entstehung im Kosmos nicht schon zerfallen ist.

Es gab viele Versuche, das radioaktive Vorgängerelement des Actiniums aufzufinden. Es sollte dem Tantal ähnlich sein, eine sehr lange Halbwertszeit besitzen und, weil in der Pechblende die Aktivität des Actiniums der des Radiums und des Urans proportional ist, eine genetische Beziehung zum Uran haben. In seiner Dis-

sertation und in einer weiteren Arbeit beschrieb Göhring auch die erfolglose Suche nach einem langlebigen Isotop, das als Ausgangsisotop der Actiniumreihe in Betracht zu ziehen wäre.²²

Lise Meitner und Otto Hahn suchten, indem sie dessen chemische Abtrennung verbesserten, ebenfalls nach einem langlebigen tantalähnlichen Mutterisotop des Actiniums sowohl in einer Uranprobe, die bereits 25 Jahre zuvor aus Pechblende abgetrennt worden war, als auch in der Pechblende selbst. Dabei fanden sie anfangs in der Tantalfraktion lediglich eine Anzahl bereits bekannter Radionuklide.²³

Beim Ausbruch des 1. Weltkrieges 1914 ging Hahn zusammen mit Fritz Haber an die Front, um den militärischen Einsatz von Giftgas zu erproben. Lise Meitner ging als Krankenschwester in ein Lazarett. Sie kehrte bald wieder ins Laboratorium zurück, um Experimente zur Suche nach dem Mutterelement des Actiniums auszuführen. In dieser Zeit hat sie Hahn, der sie auch mehrfach im Labor aufsuchte, über die einzelnen Schritte ausführlich berichtet. Den dazu im Archiv zur Geschichte der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin-Dahlem aufbewahrten Briefwechsel hat Ruth Sime zusammengestellt.²⁴ Ende Februar 1917 isolierte Meitner 2 g SiO₂ aus 21g Pechblende. Nach Zugabe von Kaliumtantalflyorid (KTaF₆) als Träger für das gesuchte langlebige Isotop des Elementes 91 zu 0,5 g des erhaltenen SiO₂, löste sie dieses in Flusssäure auf und isolierte aus der Lösung Ta₂O₅, worin das gesuchte langlebige Protactiniumisotop frei von Actinium enthalten sein sollte. Sie konnte dann durch Messung der Emanation des aus dem Element 91 gebildeten Actiniums nachweisen, dass sich mit der Zeit in der Tantalfraktion Actinium nachgebildet hatte. So fanden Otto Hahn und Lise Meitner 1918 das Protactiniumisotop ²³¹Pa mit einer langen Halbwertszeit als Mutternuclid des Actiniums und überschrieben ihre Publikation „Die Muttersubstanz des Actiniums, ein neues radioactives Element von langer Lebensdauer“.²⁵ Zur gleichen Zeit hatten auch F. Soddy und John Cranston nach einem langlebigen Isotop des Protactiniums gesucht und dieses auch nachgewiesen.²⁶

Hahn und Meitner gehen in ihrer ausführlichen Publikation²⁷ auch auf die Geschichte ihrer Entdeckung ein und wiesen darauf hin, dass Bertrand Boltwood 1908 das Actinium in allen Uranmineralen in einem konstanten Verhältnis zum Urangehalt gefunden und deshalb auf einen genetischen Zusammenhang mit dem Uran geschlossen hat; sowie Russel in die Zerfallsreihe ein hypothetisches UrX₂ eingeführt, das Soddy EkaTa genannt hat. „Fajans und Göhring fanden tatsächlich ein β-strahlendes Umwandlungsprodukt des UrX, das UrX₂ oder Brevium, wie es von Fajans benannt wurde.“ In ihrer Arbeit zogen Hahn und Meitner folgende Schlussfolgerungen:

„Von den 34 bisher bekannten radioaktiven Elementen stellen im chemischen Sinne neue Elemente nur das Radium, Actinium, Polonium, die Radiumemanation und das mit dem Protactinium isotope Brevium vor. ... Hergestellt als chemisch reine Individuen wurden bisher nur Radium und Radiumemanation. Vom Actinium konnte wegen der Seltenen Erden nicht einmal sein Spektrum aufgenommen werden, Po ist zu kurzlebig, desgleichen das Brevium. Beim Pa muß die Bestimmung von Spektrum und Atomgewicht bei der Verarbeitung großer Mengen voraussichtlich gelingen.“

Aus der Reichweite der α -Strahlen haben sie für das langlebige Protactiniumisotop eine Halbwertszeit zwischen 1200 und 180 000 Jahren abgeschätzt. Hahn und Meitner sprechen in der Überschrift ihres Beitrages von einem „neuen radioaktiven Element“. Im Text nennen sie als neue Elemente im chemischen Sinne Radium, Actinium, Polonium, Radiumemanation und das mit dem Brevium isotope Protactinium, wogegen die übrigen 28 bisher bei ihrer Entdeckung als neue Elemente bezeichneten radioaktiven Substanzen später wegen ihrer gleichen chemischen Eigenschaften als Isotope bereits bekannter Elemente erkannt wurden. Da Hahn selbst sehr früh mit dem Radiothor ein „neues Element“ entdeckt hatte, das später als Thoriumisotop erkannt wurde, und die Entwicklung des Isotopiebegriffs mit verfolgt hat, war ihm völlig bewusst, dass sie mit dem Pa ein langlebiges Isotop aber nicht ein neues Element entdeckt hatten.

Rückblickend schreibt Otto Hahn in seiner Autobiografie „*Vom Radiothor zur Uranspaltung*“²⁸, dass ihm bei der Arbeit zur Entdeckung des Protactiniums²⁹ die im gleichen Jahr erschienene Arbeit von Soddy und Cranston³⁰ erst nach dem Kriege bekannt geworden war. Diese hatten die Muttersubstanz des Actiniums durch Sublimation aus der Pechblende abgeschieden und unter Annahme einer quantitativen Abscheidung für Ac eine Halbwertszeit von 3500 Jahren erhalten. Sie hatten zugestimmt, dass Hahn und Meitner dem Ekatantal den Namen Protactinium gegeben haben. Hahn schreibt weiter:

„Ganz korrekt ist dieser Name für das Element zwischen Uran und Thorium, also für das Element mit der Ordnungszahl 91, aber nicht. Die Entdecker des neuen Elementes UX₂ waren ja Fajans und Göhring. Sie hatten das Recht der Namensgebung und nannten es – wie schon mitgeteilt – wegen seiner kurzen Halbwertszeit Brevium. Das von uns entdeckte Protactinium mit einer Halbwertszeit von vielen tausend Jahren zugunsten des Namens Brevium aufzugeben, hat aber auch die Internationale Atomkommission nicht über sich gebracht. Ganz korrekt wäre also die Bezeichnung ‚Protactinium (Pa) das langlebige Isotop des Breviums‘.“

Das ²³¹Pa übersteigt in der Halbwertszeit das ^{234m}Pa um 10 und in der Masse in natürlichen Stoffen um 8 Größenordnungen und kann in wägbaren Mengen zur weiteren Untersuchung der chemischen Eigenschaften isoliert werden. Außerdem

ist es das Mutternuklid des langlebigsten Actiniumisotops. Deshalb hat man mit Zustimmung von Fajans für das Element 91 den Namen Protactinium festgelegt. Das ändert aber nichts an der Tatsache, dass das Element Protactinium von Fajans und Göhring entdeckt worden ist, was auch Otto Hahn in seiner Autobiografie bestätigt.³¹

Die später genauer bestimmte Halbwertszeit des ^{231}Pa von 32760 Jahren ist immer noch kurz im Vergleich zum Alter unseres Sonnensystems. Als Ausgangsnuklid einer Zerfallsreihe wäre auch ^{231}Pa längst zerfallen. Es dauerte dann noch viele Jahre bis man als dessen Mutternuklid das Uranisotop ^{235}U entdeckte, das gegenwärtig im natürlichen Isotopengemisch zu 0,72% vorhanden ist, aber bei der Elementbildung vor ca. 10 Mrd. Jahren das ^{238}U in der Häufigkeit bei weitem übertraf. Dabei hatten Auguste Piccard et al.³² schon 1917 gefragt, ob man als Ausgangsisotop nicht ein noch nicht entdecktes Actinouran ansehen sollte. Das ^{235}U fand dann 1935 Arthur Dempster mit Hilfe der Massenspektrometrie.³³ Das kurzlebige Mutternuklid des ^{231}Pa , das ^{231}Th , war bereits 1911 von George N. Antonoff³⁴ als kurzlebiges thoriumähnliches UY entdeckt worden. Er nahm 1913 an, dass es nach einer Verzweigung das Ausgangsnuklid der Actiniumreihe ist.³⁵

Hahn hatte 1921 in der aus dem UX1/UX2-Gemisch abgetrennten Lösung neben dem kurzlebigen UX2 noch ein längerlebigeres Nuklid (HWZ 6,7 h) mit gleichen chemischen Eigenschaften wie das UX2 abgetrennt, das er UZ (^{234}Pa) nannte. Er hatte damit ein radioaktives Nuklid mit gleicher Kernladungs- und Massenzahl wie UX2 und damit das erste Isomer entdeckt.³⁶ Er schrieb:

„Es wird sich hier um einen dualen Zerfall handeln, bei der beide Äste durch eine β -Strahlungsumwandlung entstehen. Ein solcher Fall ist bis jetzt bei der radioaktiven Umwandlung noch nicht beobachtet worden.“

Die Tragweite dieser Entdeckung, für die Max Planck Hahn für den Nobelpreis nominierte, wurde von den Kernphysikern sehr spät erkannt. In einer Autobiografie nannte Hahn diese Entdeckung später „seine beste Arbeit überhaupt“.³⁷ Das kurzlebige von Fajans und Göhring entdeckte Isomer wird seitdem als $^{234\text{m}}\text{Pa}$ und das längerlebige Isomer mit ^{234}Pa bezeichnet.

Die Entdeckung von Isotopen und der Umgang mit den Begriffen Element und Isotop bei Hahn, Meitner und anderen Wissenschaftlern ihrer Zeit

Für die Beurteilung der Entdeckung des Protactiniums durch Fajans und Göhring spielt auch das Verständnis der Isotopie eine Rolle. Nachdem Frederick Soddy die Radioelemente mit gleichen chemischen Eigenschaften zusammengestellt

hatte,³⁸ prägte er für diese, denen auf Grund der gleichen chemischen Eigenschaften der gleiche Platz im PSE zusteht, den Begriff der Isotope.³⁹ Er erhielt dafür den Nobelpreis und ging in seinem Nobelvortrag ausführlich auf den Erkenntnisprozess ein.⁴⁰ In den natürlichen radioaktiven Zerfallsreihen fand man nach der Entdeckung des Radiums eine wachsende Zahl neuer radioaktiver Elemente, die man nicht auf die wenigen freien Plätze im PSE einordnen konnte und von denen sich mehrere voneinander damals chemisch nicht trennen ließen. So bezeichnete man bald einige Paare und kleine Gruppen als chemisch ähnlich oder chemisch nicht voneinander trennbar. Die Gruppen solcher Elemente nannte Fajans Plejaden.⁴¹ Paneth und Hevesy zeigten, dass sich ThC (^{212}Bi) gemeinsam mit Bismut und RaD (^{210}Pb) gemeinsam mit Blei elektrolytisch abscheiden und erwähnten dabei die Feststellungen der vorgenannten Autoren.⁴² Hevesy entwickelte aus der Tatsache, dass sich RaD nicht von Blei trennen ließ, die Idee der radioaktiven Markierung, die er gemeinsam mit Paneth im Wiener Radiuminstitut bei der Bestimmung der Löslichkeit von Bleichromat demonstrierte.⁴³ Damit begründeten sie die Indikatormethode, und nach deren erfolgreichen Anwendung in Biologie und Medizin wurde Hevesy dafür 1943 mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet.

Zu den Begriffen Element und Isotop hat es im Schrifttum Kontroversen gegeben: Hevesy und Paneth schrieben: „F. Soddy war der erste, der der Ansicht scharf Ausdruck verlieh, das diese Radioelemente „chemisch und physikalisch praktisch identisch“ seien.“⁴⁴ Daraufhin polemisiert Fajans gegen den von Paneth und Hevesy verwendeten zur Begründung der Indikatormethode sinnvollen Begriff der „Vertretbarkeit“, der zu „irrtümlichen Vorstellungen über die wahre Beziehungen zwischen den Isotopen Veranlassung gebe ... streng genommen dürfte man die Nernstsche Formel nur auf jedes Plejadenglied getrennt anwenden“. Man erkennt, dass Fajans sich im Text nicht von seinem Plejadengliedbegriff trennen konnte.⁴⁵ Daraufhin bemerkten Hevesy und Paneth, dass die Meinungsunterschiede nur Ausdruck einer unterschiedlichen Betrachtungsweise sind.⁴⁶ Hevesy war längst davon überzeugt, dass man prinzipiell auch Isotope wegen ihrer unterschiedlichen Masse trennen kann, was er erst mit der Diffusion in Lösungen versuchte, ihm dann später durch Destillation gelang.

Die Würdigung der Entdeckung von Fajans

Vladimir Majer nennt in einem 1982 erschienen Lehrbuch Hahn und Meitner als Entdecker des Protactiniums.⁴⁷ Ruth Lewin Sime geht in ihrer Meitner-Biografie von Hahn und Meitner als Entdecker des Elementes aus, wundert sich nur, dass ungeachtet der gleichberechtigten Stellung von Lise Meitner im Institut und der

Tatsache, dass sie fast die ganze Arbeit geleistet hat, sie Otto Hahn als Autor den Vorrang ließ, und schreibt

„Bei ihrer Arbeit über das Protactinium glaubte sie vielleicht, dass sie ihm den Vorrang schuldete, weil er schließlich als Soldat seinem Vaterland gedient hatte“.⁴⁸

Bei Wikipedia finden wir:

„Protactinium was first identified in 1913 by Kasimir Fajans and Oswald Helmuth Göhring and named brevium because of the short half-life of the specific isotope studied, namely protactinium-234. A more stable isotope (²³¹Pa) of protactinium was discovered in 1917/18 by Otto Hahn and Lise Meitner, and they choose the name proto-actinium, but then the IUPAC named it finally protactinium in 1949 and confirmed Hahn and Meitner as discoverers.“ [Protactinium wurde zuerst 1913 von Fajans und Göhring identifiziert und wegen der kurzen Halbwertszeit des untersuchten Isotops ^{234m}Pa Brevium genannt. Ein stabileres Isotop (²³¹Pa) des Protactiniums wurde in den Jahren 1917/18 von Hahn und Meitner entdeckt. Sie wählten den Namen Proto-actinium, aber die IUPAC nannte es schließlich 1949 Protactinium und bestätigte Hahn und Meitner als dessen Entdecker].⁴⁹

Vom Sekretariat der IUPAC konnte auf meine Anfrage keine Angabe zu dem Amsterdamer Beschluss gemacht werden.⁵⁰

Wir finden bei Wikipedia unter Lise Meitner die Formulierung:

„Von 1917 an arbeitete Lise Meitner erneut gemeinsam mit Otto Hahn. Sie entdeckten im selben Jahr das chemische Isotop Protactinium 231, die langlebige Form des Elements Nr. 91, das mit dem schon 1913 von Kasimir Fajans und Oswald Helmuth Göhring entdeckten kurzlebigen Pa-Isotop Brevium in Konkurrenz stand.“⁵¹

Im Gegensatz dazu werden bei <www.periodensystem-online.de> Fajans und Göhring als Entdecker genannt.⁵² In einer von der BBC-Science eingerichteten Website finden wir unter den an Stelle von Entdeckung gewählten Begriff „Identifizierung“ für Pa:

„Protactinium has been, since 1949, shorthand for „protoactinium“. The name describes its decay to actinium. The element was identified by Kasimir Fajans and Helmuth Otto H. Göhring in 1913.“⁵³

60 Jahre nach seiner Entdeckung schrieben Fajans und Donald Morris einen Beitrag in der Zeitschrift Nature mit dem Titel „*Discovery and naming of the isotopes of element 91*“⁵⁴. Darin stellten sie die chronologische Reihenfolge der Entdeckung der einzelnen Isotope des Pa dar, um Unstimmigkeiten in der Literatur

zu beseitigen. Auch wenn sie in der Überschrift Element 91 statt Protactinium schrieben, verstehe ich den Artikel doch als Aufforderung an die IUPAC, ihn und Göhring als Entdecker des Protactiniums anzuerkennen.

Die verwirrende Situation, dass von einem lange vorausgesagten Element zuerst ein sehr kurzlebiges Nuklid und fünf Jahre später von einem anderen Team ein Isotop mit bedeutend längerer Halbwertszeit entdeckt wurde, führte dazu, dass in verschiedenen Schriften verschiedene Entdecker genannt werden. Das kann etwas mit dem von nicht allen verstandenen Begriff des chemischen Elementes nach der Entdeckung der Isotope zu tun haben. Es kann aber auch daran liegen, dass Fajans nach der für seine Fachkollegen brüskierenden alleinigen Publikation der Verschiebungsgesetze keine Fürsprecher besaß, die seine Entdeckung gebührend würdigten. Das Protactiniumisotop ^{234m}Pa und damit das Element Protactinium wurde als Glied der dem ^{238}U folgenden Zerfallsreihe von Fajans und Göhring entdeckt und an die richtige Stelle des PSE eingeordnet.

Der Karlsruher Radiochemiker Cornelius Keller würdigte in einem Übersichtsartikel zum Protactinium Fajans und Göhring als Entdecker, erwähnte aber nicht, dass die Entdeckung in Karlsruhe erfolgte.⁵⁵ In Karlsruhe war die Entdeckung des Pa weitgehend vergessen. In den offiziellen Mitteilungen des KIT und der Einladung zur Jahrestagung der Bunsengesellschaft, die Anfang Juni in Karlsruhe tagte, war kein Hinweis auf die 100 Jahre zuvor erfolgte Entdeckung zu finden. Nach entsprechenden Informationen durch den Autor, konnte Ulrich Schindewolf erwirken, dass das Ereignis zur Eröffnung gewürdigt und dazu ein Beitrag von ihm in dem Bunsen-Magazin erschien.⁵⁶

Fajans in München

In Karlsruhe hatte Fajans aus den Verschiebungsgesetzen auch den Gedanken entwickelt, dass es mehrere stabile Bleisotope geben müsse, mit denen die radioaktiven Reihen von Uranium, Protactinium und Thorium abgeschlossen werden. Dazu versuchte er aus Uran- und Thoriummineralen das Blei abzutrennen, damit deren Atomgewichte über die Halogenide zu bestimmen und mit dem Atomgewicht des bekannten Bleis zu vergleichen.⁵⁷ Die Annahme Fajans, dass sich das Gewicht von natürlichem Blei von dem durch radioaktiven Zerfall erhaltenen unterscheidet, wurde durch den führenden Atomgewichtsforscher Theodore W. Richards in Harvard, der das sich vorher nicht vorstellen konnte, und den von Fajans dorthin entsandten Doktoranden Max Lemberg bestätigt.

1917 nahm Fajans eine Einladung Richard Willstätters an, an der Universität in München die bisher unterbewertete physikalische Chemie zu vertreten, und wurde am 1. 10. 1917 Privatdozent mit Titel und Rang eines a.o. Professors und Vorstand der physikalisch-chemischen Abteilung am Chemischen Laboratorium des Staates. Am 1. 8. 1923 erhielt er das neugeschaffene planmäßige Extraordinariat für physikalische Chemie an der Universität, zum 1. 8. 1925 Titel und Rang eines o. Professors, am 2. 1. 1928 auch die Rechte eines o. Professors an der Univ. München verliehen und 1932 wurde er Leiter eines eigenständigen Instituts für physikalische Chemie an der Univ. München, das mit von ihm eingeworbenen Mitteln der Rockefeller-Foundation erbaut worden war.

In Karlsruhe begonnene Untersuchungen führten zu Angaben über die Bedingungen, unter denen ein in sehr geringen Mengen vorliegendes radioaktives Element an einem ausgefallten Niederschlag adsorbiert wird (Fajans-Paneth-Hahn-Regel) und zur Entwicklung des bekannten Fajanschen Verfahren der Fällungstitration mit Adsorptionsindikatoren. In München befasste sich Fajans hauptsächlich mit Fragen der Molekül- und Kristallchemie und der chemischen Bindung. Anfänglich lag der Schwerpunkt auf der Thermochemie (Born-Fajans-Haber-Korrelation), dann entwickelte er seine Vorstellungen zur Polarisierung (Deformation) der Ionen als zusätzlichen Faktor neben der Coulomb-Anziehung mit Anwendungen auf Photochemie und Maßanalyse. Er behandelte danach die Hydratationswärmen gasförmiger Atomionen und beschäftigte sich mit energetischen Fragen der chemischen Bindung. Dabei entdeckte er die Polarisierbarkeit großer Ionen.

1933 und 1934 konnte die Universität Fajans noch unter Hinweis auf die Institutsgründung und sein großes Ansehen gegen Entlassungsversuche schützen. Am 15. 7. 1935 widerrief jedoch die Regierung von Oberbayern seine 1921 erfolgte Einbürgerung, da sie als unerwünscht zu betrachten sei. In einer juristisch selbst damals umstrittenen Entscheidung beschloss das Bayerische Kultusministerium, ihn am 30. 10. 1935 in den Ruhestand zu versetzen, da dieser Widerruf der Einbürgerung, obwohl unfreiwillig und von Fajans angefochten, als "Stellungnahme gegen den Staat" zu betrachten sei. 1936 ging Fajans mit einem Rockefeller-Stipendium nach England und wurde noch im gleichen Jahr an die University of Michigan in Ann Arbor berufen, an der er 1957 emeritiert wurde.⁵⁸ 1936 wurde er aus Deutschland ausgebürgert.

In Ann Arbor kehrte Fajans anfangs wieder zur Kernchemie zurück, da er dort Zugang zu einem Zyklotron hatte. Dass er in den USA als Entdecker des Protactiniums anerkannt wurde, zeigt ein Bild auf dem Glenn T. Seaborg neben Fajans stehend auf das Element Nr. 91 im PSE zeigt, vor dem eine handschriftliche

Widmung von ihm mit dem Text: „To Kasimir Fajans – the codiscoverer of the element 91 – with esteem – Glenn T. Seaborg“ aufgestellt ist.⁵⁹

Bedeutung des Protactiniums und seiner Isotope

Nachdem Hahn und Meitner das langlebige Isotop ^{231}Pa entdeckt hatten, führte der Assistent von Otto Hahn, Astrid von Grosse dessen Abtrennung aus Rückständen der Urangeinnung aus und gewann genügend Material, um einige chemische und physikalische Eigenschaften zu bestimmen.⁶⁰ Eine Übersicht über die Chemie des Protactiniums haben Boris Myasoedov, Harald Kirby und Ivan Tanaev zusammengestellt.⁶¹

In den letzten Jahren des zweiten Weltkrieges und danach wurden für die Herstellung von Kernwaffen und die Erzeugung von Kernenergie größere Mengen Uran aus Erzen gewonnen, wobei die protactiniumhaltigen Rückstände der Aufbereitung meist in der Nähe der Fabriken in Senken abgelagert und mit Bodenschichten abgedeckt wurden. Auf Grund seiner kernphysikalischen und chemischen Eigenschaften wird ^{231}Pa als radiotoxischstes Nuklid noch vor den Isotopen des Plutonium, Americium, Actiniums und Radiums eingestuft, aber wegen seiner etwas komplizierten chemischen Abtrennung selten in Umgebungsproben bestimmt.

Das beim Neutroneinfang von Thorium über die Reaktion $^{232}\text{Th}(n,\gamma) ^{233}\text{Th}$ entstehende Thoriumisotop hat eine kurze Halbwertszeit von 22,2 min und zerfällt in das leicht messbare ^{233}Pa mit einer Halbwertszeit von 27 Tagen, welches erstmals von Meitner, Fritz Strassmann und Hahn durch Bestrahlung von Thorium mit Neutronen erhalten wurde.⁶² Dieses erste künstlich erzeugte Protactiniumisotop wird bei der neutronenaktivierungsanalytischen Bestimmung von Thorium genutzt; insbesondere bei der Bestimmung von Spurenelementen in kosmischen und geologischen Proben.

Das ^{233}Pa zerfällt in das langlebige spaltbare Uranisotop ^{233}U , das in Thoriumbrutreaktoren eingesetzt werden kann. Das ist ein denkbarer Weg, um das im Vergleich zum Uran häufigere Thorium zur Energiegewinnung zu nutzen. Auch bei dem in Deutschland kurze Zeit betriebenen Hochtemperaturreaktor wurde neben der Spaltung von ^{235}U auch das aus Thorium erbrütete ^{233}U zur Energieerzeugung genutzt.⁶³ Da hierbei eine aufwendige Abtrennung des erbrüteten Spaltstoffs vom Thorium notwendig ist, wird dieser Weg, solange es noch ausreichende Uranvorkommen gibt, weltweit nicht gegangen.

Bei Verteilungsuntersuchungen von Thorium wird gelegentlich ^{234}Th als Indikator nuklid eingesetzt. Dabei wird die β -Strahlung dessen Tochternuklids $^{234\text{m}}\text{Pa}$ wegen seiner höheren Energie gemessen. Für die Bestimmung des ^{238}U kann nach Einstellung des radioaktiven Gleichgewichts das Gammaspektrum von $^{234\text{m}}\text{Pa}$ gemessen werden. Das mit $^{234\text{m}}\text{Pa}$ isomere ^{234}Pa wurde wegen seiner längeren Halbwertszeit von 6,7 h gelegentlich als Indikator bei der Abtrennung von Pa – Isotopen eingesetzt. Es gibt noch eine größere Zahl künstlich erzeugter radioaktiver Isotope des Protactiniums, die aber nur wissenschaftliches Interesse besitzen.

Summary: The Discovery of Protactinium by Kasimir Fajans and Oswald Göhring in 1913

In 1913 Kasimir Fajans and Oswald Göhring discovered the element protactinium as UX2 ($^{234\text{m}}\text{Pa}$), the short lived decay product of UX1 (^{234}Th) in the Physical Chemical Institute in Karlsruhe basing on Russel-Soddy-Fajan`s displacement law. Because of the short half-life, they named it Brevium (Bv). In 1918 Otto Hahn and Lise Meitner found as mother of the ^{227}Ac the long-living isotope of Brevium, which they named protactinium (^{231}Pa). Fajans has than accepted the name protactinium for the element. In some papers, books, and documents is written, that Hahn and Meitner had discovered the element protactinium. The details of the investigations leading to the discovering of protactinium isotopes and the discussions between scientists about isotopes, elements, and displacement law are described.

- ¹ Jozef Hurwic, Kasimir Fajans, Lebensbild eines Wissenschaftlers (Berlin 2000).
- ² Kasimir Fajans, „Über die komplexe Natur von Radium C“, Physikalische Zeitschrift, 12 (1911), S. 369-378.
Kasimir Fajans, Walter Makower, „Über den Rückstoß des RaC₂ im Vakuum“, Physikalische Zeitschrift, 12 (1911), S. 378.
Kasimir Fajans, Walter Makower, „The grows of Radium C from Radium B“, Philosophical Magazin, 23 (1912), S. 292-301.
Kasimir Fajans, „Über die Verzweigung der Radiumzerfallsreihe“, Physikalische Zeitschrift, 13 (1912), S. 699-705.
- ³ Georg v. Hevesy, „Die Valenz der Radioelemente“, Physikalische Zeitschrift, 14 (1913), S. 49-62.
Georg v. Hevesy, „Die Eigenschaften der Emanationen“, Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik, 10 (1913), S.198.

- Georg v. Hevesy, „Die Spannungsreihe der Radioelemente“, Zeitschrift für Elektrochemie, 19 (1913), S. 29.
- ⁴ Georg v. Hevesy, „Radioaktive Methoden in der Elektrochemie“, Physikalische Zeitschrift, 13 (1912), S. 715-719.
Georg v. Hevesy, „Die Spannungsreihe der Radioelemente“, Zeitschrift für Elektrochemie, 19 (1913), S. 29.
- ⁵ Kasimir Fajans, „Über eine Beziehung zwischen der Art einer radioaktiven Umwandlung und dem elektrochemischen Verhalten des betreffenden Radioelements“, Physikalische Zeitschrift, 14 (1913), S.131-136.
- ⁶ Georg v. Hevesy, „The diffusion of uranium“, Philosophical Magazine, 28 (1912), S. 628.
- ⁷ Richard Lucas, „Über das elektrochemische Verhalten der Elemente“, Physikalische Zeitschrift, 7 (1906), S. 340.
- ⁸ Kasimir Fajans, Die Verzweigung der Radiumszerfallsreihe, Habilitationsschrift (Karlsruhe 1913); Kasimir Fajans, „Die Verzweigung der Radiumzerfallsreihe“, Physikalische Zeitschrift, 13 (1912), S. 173-240.
- ⁹ Kasimir Fajans, „Über eine Beziehung zwischen der Art einer radioaktiven Umwandlung und dem elektrochemischen Verhalten des betreffenden Radioelementes“, Physikalische Zeitschrift, 14 (1913), S. 131-136.
Kasimir Fajans, „Die Stellung der Radioelemente im periodischen System“, Physikalische Zeitschrift, 14 (1913), S. 136-142.
- ¹⁰ Alexander Smith Russell, „The Periodic System and the Radio-Elements“, Chemical News, 107 (1913), S. 49-52.
- ¹¹ Frederick Soddy, „Radioactive Elements and the Periodic Law“, Chemical News, 107 (1913), S. 97-99. – Frederick Soddy, „The Origin of Actinium“, Nature, 91 (1913), S. 634-635.
- ¹² Hevesy an Fajans 19.1.1963, Niels Bohr Archiv, Kopenhagen, George Hevesy, Scientific Correspondence.
- ¹³ Alexander Smith Russell, John Andrews Benn, „Discovery of the Popular Knowledge“, Discovery 1.1 (Cambridge 1938), S. 231.
- ¹⁴ Dimitrii Mendeleev, „Die periodische Gesetzmäßigkeit der chemischen Elemente“, Liebigs Annalen der Chemie, Supplementband VIII (1871), S. 133-232, hier S. 191.
- ¹⁵ Alexander Smith Russell, Periodic System.
- ¹⁶ Kasimir Fajans, Oswald Göhring: „Über die komplexe Natur des UrX.“, Naturwissenschaften, 1 (1913), S. 339.
- ¹⁷ Jozef Hurwic, „La decouverte du brevium (protactinium 234) a partir de la loi des déplacements radioactifs“, Revue d'histoire des sciences, 34 (1981), S. 359-361.
- ¹⁸ Kasimir Fajans, Oswald Göhring, „Über das UranX₂ – das neue Element der Uranreihe“, Physikalische Zeitschrift, 14 (1913), S. 877-884.

- ¹⁹ Otto Hahn, Lise Meitner, „Über das UX₂“, *Physikalische Zeitschrift*, 14 (1913), S. 758-759.
- ²⁰ Kasimir Fajans, Oswald Göhring, „Zur Frage nach der komplexen Natur des Radioactiniums und der Stellung des Actiniums im Periodischen System“, *Physikalische Zeitschrift*, 14 (1913), S. 742-758.
- ²¹ Oswald Helmuth Göhring, *Über das neue Element Brevium und Versuche zur Auffindung seiner Isotopen*, Dissertation (Karlsruhe 1914).
- ²² Oswald Göhring, „Einige Versuche zur Frage des Aktiniumursprunges“, *Zeitschrift für Physik*, 15 (1914), S. 642-645.
- ²³ Otto Hahn, Lise Meitner, „Über das UX₂“, *Physikalische Zeitschrift*, 14 (1913), S. 758-759.
- ²⁴ Ruth Sime, „The Discovery of Protactinium“, *Journal of Chemical Education*, 63 (1986), S. 653-657.
- ²⁵ Otto Hahn, Lise Meitner, „Die Muttersubstanz des Actiniums, ein neues radioactives Element von langer Lebensdauer“, *Physikalische Zeitschrift*, 19 (1918), S. 208-218; *Naturwissenschaften*, 6 (1918), S. 324.
- ²⁶ Frederik Soddy, John A. Cranston, „The parent of actinium“, *Nature*, 100 (1918), S. 498; auch in: *Proceedings of the Royal Society (London)*, A94 (1918), S. 384-404.
- ²⁷ Hahn, Muttersubstanz, S. 208-209.
- ²⁸ Otto Hahn, *Vom Radiothor zur Uranspaltung*, Reprint der 1. Auflage (Braunschweig 1962), S. 77-78.
- ²⁹ Hahn, Muttersubstanz, S. 208-218.
- ³⁰ Frederick Soddy, J. A. Cranston, „The parent of actinium“, S. 498.
- ³¹ Otto Hahn, *Vom Radiothor*, S. 79.
- ³² Auguste Piccard et al., *Acta Sciences Physique et Naturelle Geneve*, 41 (1917), S. 161-164, zitiert bei: Otto Hahn, „Über eine neue radioaktive Substanz im Uran“, *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 54 (1921), S. 1131.
- ³³ Arthur Jeffrey Dempster, „Isotopic Composition of Uranium“, *Nature*, 136 (1935), S. 186.
- ³⁴ George N. Antonoff, „The disintegration products of uranium“, *Philosophical Magazine*, 22 (1911), S. 419-432.
- ³⁵ George N. Antonoff, „The existence of uranium Y“, *Philosophical Magazine*, 26 (1913), S. 1058.
- ³⁶ Otto Hahn, „Über eine neue radioaktive Substanz im Uran“, *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 54 (1921), S. 1131-1142.
- ³⁷ Klaus Hoffmann, *Otto Hahn – Stationen aus dem Leben eines Atomforschers* (Berlin 1978), S. 132.
- ³⁸ Frederick Soddy, „The Radioelements and the Periodic Law“, *Chemical News*, 107 (1913), S. 97-99.

- ³⁹ Frederick Soddy, „The chemistry of mesothorium“, Journal of the Chemical Society, 99 (1911), S. 72-83.
- ⁴⁰ Frederick Soddy, „The origins of the conceptions of isotopes“, Nobel Lecture, December 12, in http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1921/soddy-lecture.pdf (07.10.2012).
- ⁴¹ Kasimir Fajans, „Die Valenz der Radioelemente“, Physikalische Zeitschrift, 14 (1913), S. 47.
- ⁴² Fritz Paneth, Georg v. Hevesy, „Über die elektrochemische Vertretbarkeit von Radioelementen“, Mitteilungen aus dem Institut für Radiumforschung, Nr. 44 (Juni 1913), S. 1-11.
- ⁴³ Georg v. Hevesy, Fritz Paneth, „Die Löslichkeit des Bleisulfids und Bleichromats“, Zeitschrift für anorganische Chemie, 82 (1913), S. 322.
- ⁴⁴ Georg v. Hevesy, Fritz Paneth, „Zur Frage der isotopen Elemente“, Physikalische Zeitschrift, 15 (1914), S. 797.
- ⁴⁵ Kasimir Fajans, „Zur Frage der isotopen Elemente“, Physikalische Zeitschrift, 16 (1915), S. 45.
- ⁴⁶ Georg v. Hevesy, Fritz Paneth, „Zur Frage der isotopen Elemente, Erwiderung auf die gleichnamige Abhandlung von K. Fajans“, Physikalische Zeitschrift, 17 (1916), S. 4.
- ⁴⁷ Vladimir Majer, Grundlagen der Radiochemie (Leipzig 1982), S. 413.
- ⁴⁸ Ruth Lewin Sime, Lise Meitner – Ein Leben für die Physik (Frankfurt a.M. und Leipzig 2001), S. 97.
- ⁴⁹ <http://en.wikipedia.org/wiki/Protactinium> (22.09.2012).
- ⁵⁰ Mrs. Enid Wetherwax beantwortete meine Anfrage mit einem E-Mail vom 04.02.13, „Regrettably, the files that we maintain here at the IUPAC Secretariat pertaining to our journal Pure and Applied Chemistry in which proceeding of conferences are published only go back as far as 1960.“
- ⁵¹ http://de.wikipedia.org/wiki/Lise_Meitner, (13.09.2012).
- ⁵² <http://www.periodensystem-online.de/index.php?id=history&el=91> (12.09.2012)
- ⁵³ <http://www.bbc.co.uk/dna/place-lancashire/plain/A3768861> (02.07.2014)
- ⁵⁴ Kasimir Fajans, Donald D F C Morris, Discovery and naming of the Element 91, Nature, 244 (1973), S.137-138.
- ⁵⁵ Cornelius Keller, „Die Chemie des Protactiniums“, Report des Kernforschungszentrums Karlsruhe, KFK, 405 (1966), S. 85-97.
- ⁵⁶ Ulrich Schindewolf, „Vor 100 Jahren im Karlsruher Institut für Physikalische Chemie: Kasimir Fajans entdeckte ein neues Element, das Protactinium“, Bunsen-Magazin, 15 (2013), S.181-183.

- ⁵⁷ Kasimir Fajans, „Über die Endprodukte radioaktiver Zerfallsreihen“, Zeitschrift für Elektrochemie, 20 (1914), S. 319 u. S. 449-452.
- ⁵⁸ Freddy Litten, „Kasimir Fajans – Kurzbiographie“, <http://litten.de/fulltext/fajans.htm>, (13.07.2013).
- ⁵⁹ Josef Hurwic, Kasimir Fajans (Berlin 2000), S. 128.
- ⁶⁰ Aristid von Grosse, „Das Element 91; seine Eigenschaften und seine Gewinnung“, Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft, 61 (1928), S. 233–245.
Aristid von Grosse, „Element 91“, Science, 80 (1934), S. 512–516.
Aristid V. Grosse, „Zur Herstellung von Protactinium“, Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft, 68 (1935), S. 307.
- ⁶¹ Boris F. Myasoedov, Harald W. Kirby, Ivan G. Tananaev, Protactinium, hrsg. von Lester R. Morss, Norman M. Edelstein, Jean Fuger, The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements (Dortrecht 2006), S. 161-252.
- ⁶² Lise Meitner, Fritz Straßmann, Otto Hahn, „Künstliche Umwandlungsprozesse bei Bestrahlung des Thoriums mit Neutronen: Auftreten von isomeren Reihen bei Abspaltung von α -Strahlen“, Zeitschrift für Physik, 109 (1938), S. 538-552.
- ⁶³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Kernkraftwerk_THTR-300, (08.02.2013)>