

Isomere zu stabilen Kernen durch Neutroneneinfang bei Dysprosium und Hafnium

Von ARNOLD FLAMMERSFELD

Aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie, Tailfingen

(Z. Naturforschg. **1**, 190—196 [1946]; eingegangen am 4. April 1946)

Beim Bestrahlen von Dysprosium mit verlangsamen D + D-Neutronen wurde eine neue Aktivität der Halbwertszeit $T = 1,25$ Min. gefunden, die eine ungewöhnlich kleine Energie der ausgesandten Elektronen (130 KeV) aufweist. Aus Betrachtungen im Sargent-Diagramm ließ sich zeigen, daß kein β -Zerfall, sondern ein Isomerenübergang vorliegt. Der angeregte Dysprosiumkern entsteht durch Neutroneneinfang aus dem nächstniedrigeren Dysprosium-Isotop. Mit Hilfe der Häufigkeiten der Dysprosium-Isotope und der Mattauchschen Regeln für Kernisomerie wurde die neue Halbwertszeit dem $^{163}\text{Dy}^*$ zugeordnet. Beim Hafnium ergab sich mit langsamen Neutronen eine ebenfalls noch nicht bekannte Aktivität der Halbwertszeit $T = 19$ Sek. Hier liegt ein Isomeren-Übergang vor, der dem beim Dy völlig analog ist und dem angeregten $^{177,179}\text{Hf}^*$ zugeordnet wurde.

Dysprosium

Herstellung der Präparate¹

Verwendet wurde Dy_2O_3 , das von der Auer A.-G. bezogen wurde und nach Angaben der Hersteller 99,5% reines Dysprosium enthielt. Die Verunreinigungen waren nicht näher bekannt. Da die Präparate möglichst reproduzierbar bestrahlt werden sollten, konnten sie nicht in Pulverform verwendet werden, sondern mußten in definierter Lage auf einer nicht aktivierbaren Unterlage aufgebracht werden. Als geeignet hierzu erwies sich Bleiblech der Dicke 0,5 mm, das bei den zur Verfügung stehenden Neutronenintensitäten praktisch nicht aktiv wurde. Ca. 200 mg Dy_2O_3 wurden dann in Chloroform aufgeschüttelt, auf das Bleiblech ein viereckiger Rahmen von 40×35 mm aufgestellt und das Chloroform-Dysprosium-Gemisch schnell, ohne zu tropfen, in einem Zuge darüber ausgegossen. Nach dem Verdunsten des Chloroforms blieb eine sehr gleichmäßige Schicht zurück, die aber noch mechanisch empfindlich war. Der Rahmen wurde abgenommen und dann das Präparat mit Hilfe eines Zerstäubers vorsichtig mit verdünntem Zaponlack bestäubt. Nach dem Trocknen der Za-

ponschicht wurden so sehr haltbare Dy_2O_3 -Schichten der Dicke 14 mg/cm² erhalten, wozu noch etwa 1 mg/cm² Zaponlack hinzukam. Besondere Versuche hatten ergeben, daß auch der Zaponlack keinen Beitrag zur Aktivität lieferte. Außer diesen Präparaten, die in bezug auf Neutronenabsorption bereits als dünn zu bezeichnen sind, wurde noch eine besonders dünne Schicht hergestellt, die 1 mg/cm² Dy_2O_3 enthielt und nicht zaponiert wurde.

Bisher bekannte Aktivitäten des Dysprosiums

Dysprosium besitzt folgende stabile Isotope:

158 (Spuren), 160 (0,1%), 161 (21,1%), 162 (26,6%), 163 (24,8%), 164 (27,3%)². Es wird von langsamen Neutronen sehr stark aktiviert. Da das Isotop 158 aus Intensitätsgründen nicht in Frage kommt, wurde die auftretende Halbwertszeit von 2,5 Stdn. dem ^{165}Dy aus ^{164}Dy (n, γ) zugeordnet³. Ferner wird noch eine Aktivität von 2,2 Min. angegeben, die mit sehr energiereichen Neutronen aus ^{160}Dy durch einen ($n, 2n$)-Prozeß entsteht und daher dem ^{159}Dy zugeordnet worden ist⁴. Diese Aktivität kann außer Betracht bleiben, da die hier verwendeten D + D-Neutronen keine ($n, 2n$)-Prozesse anregen können.

¹ Für apparative Einzelheiten s.: A. Flammersfeld, Z. Naturforschg. **1**, 3 [1946]. Vorläuf. Mitteil. in Naturwiss. **32**, 36 u. 68 [1944].

² Häufigkeiten nach W. Wahl, Suomen Kemistiseuran Tiedonantoja **51**, 64 [1942].

³ G. v. Hevesy u. H. Levy, Kong. danske Vidensk. Selsk., mat.-fysiske Medd. **14**, Nr. 5 [1936].

⁴ M. L. Pool u. L. L. Quill, Physic. Rev. **53**, 437 [1938].



Bestrahlung mit schnellen Neutronen

Zunächst wurde versucht, Dysprosium mit schnellen, unverlangsamten Neutronen zu bestrahlen. Bei kurzer Bestrahlung von 0,5–5 Min. ergab sich keine mit Sicherheit nachweisbare kurzlebige Aktivität. Bei Bestrahlung von 1 Stde. und mehr ergab sich mit geringer Intensität (auf unendlich umgerechnet 90 Teilchen/Min.) die 2,5-Stdn.-Aktivität. Da eine eventuell vermutete Aktivität mit großer Halbwertszeit wesentlich längere Bestrahlungen und Messungen erfordert hätte, wurde nach einer solchen nicht gesucht. Es konnte also beim Dysprosium kein (n,n)-Prozeß nachgewiesen werden.

Bestrahlung mit langsamen Neutronen

Bei der Bestrahlung des Dysprosioms mit verlangsamt Neutronen und Messung derselben im 10- μ -Zähler¹ ergab sich aber außer der sehr starken 2,5-Stdn.-Aktivität eine ebenfalls sehr starke kurzlebige Aktivität, die besonders bei kurzen Bestrahlungszeiten die lange Komponente bei weitem überwog. Abb. 1a zeigt eine Abfallkurve, die bei 0,5 Min. Bestrahlungszeit erhalten wurde. Sie ist zur Erhöhung der Genauigkeit aus zahlreichen identischen Versuchen addiert¹. Nach Abzug der langen Halbwertszeit ergibt sich für die kurze Halbwertszeit $T = 1,25 \pm 0,05$ Min. Eine entsprechende Messung mit normalem 100- μ -Zähler ergab, daß in diesem nur noch Andeutungen von dieser Komponente nachweisbar sind, so daß die Strahlung des 1,2-Min.-Körpers sehr weich sein muß. Zur Bestimmung der Strahlenhärte wurde dann so vorgegangen: Die verschiedenen Dysprosiumpräparate wurden je 30 Sek. bestrahlt, so daß immer ein bestimmtes, genau bekanntes Verhältnis von 1,2-Min.-Körper zum 2,5-Stdn.-Körper bestand. Diese Präparate wurden dann möglichst schnell mit Folien von 10, 20 usw. μ Aluminium bedeckt und gemessen. Nach Abzug des fast ungeschwächten 2,5-Stdn.-Anteils wurde eine Abfallkurve der 1,2-Min.-Aktivität erhalten, die auf Bestrahlungsende extrapoliert den hinter der betreffenden Folie noch meßbaren Teil 1,2-

Min.-Körper ergab. Die mit verschiedenen Folien erhaltenen Anfangsaktivitäten, immer bezogen auf gleiche, ungeschwächte 2,5-Stdn.-Aktivität, ergaben die Absorptionskurve der Strahlung. Aus ihr ergab sich eine maximale Reichweite von 16 mg/cm² entsprechend einer Energie der Strahlung von 130 KeV. Die große Absorbierbarkeit der Strahlung zeigt eindeutig, daß es sich um eine β - bzw. e-Strahlung handeln muß. Ob außer der Korpuskularstrahlung noch ein geringer Anteil γ -Strahlen mitwirkt, konnte noch nicht entschieden werden.

Da die Halbwertsdicke der Strahlung des 1,2-Min.-Körpers rund 10 μ Al beträgt, waren für Ausbeutangaben die 14 mg pro cm²-Präparate bereits zu dick. Es wurde daher für diese Zwecke das oben besprochene Präparat von 1 mg pro cm² benutzt. Unter Berücksichtigung der geringen Selbstabsorption und der Absorption in der Zählerfolie ergab sich, daß die Intensitäten der beiden 1,2-Min.- und 2,5-Stdn.-Körper, umgerechnet auf unendlich lange Bestrahlung, sich verhalten wie 1 : 1,25, so daß der kurze fast ebenso stark angeregt wird wie der sehr starke 2,5-Stdn.-Körper.

Von Interesse war auch die Energie der den 1,2-Min.-Körper anregenden Neutronen. Umstellen der Neutronenquelle mit Paraffin bringt ebenso wie beim 2,5-Stdn.-Körper gegenüber Bestrahlungen ohne Paraffin eine Verstärkung um das etwa 10³-fache. Die 1,2-Min.-Aktivität wird also sehr stark durch thermische Neutronen angeregt. Weiter wurden Bestrahlungen mit Paraffin, aber innerhalb 0,5 mm Cadmium vorgenommen. Dabei ging

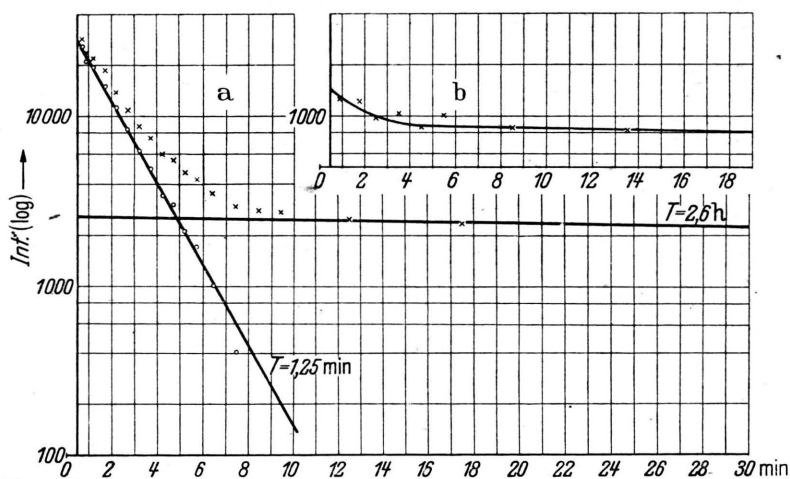


Abb. 1a. Dysprosium mit verlangsamt D + D-Neutronen 0,5 Min. aktiviert, gemessen im 10- μ -Zähler. b. Dasselbe, gemessen mit 100- μ -Al-Absorptionsfolie vor dem Zählerfenster.

die Intensität auf etwa $\frac{1}{300}$ der ohne Cadmium in Paraffin gemessenen zurück, was beweist, daß keine Resonanzstellen oberhalb des thermischen Gebietes vorhanden sind, so daß sich in diesem Punkte die kurze Aktivität ähnlich verhält wie die 2,5-Stdn.-Aktivität.

Es war noch von Wichtigkeit, zu untersuchen, ob die kurze Aktivität möglicherweise auf eine Verunreinigung des Dy zurückzuführen war. Wegen der großen Reinheit des verwendeten Dy (99,5%) schien dies bei der großen Intensität des 1,2-Min.-Körpers von vornherein unwahrscheinlich. Über die Art der Verunreinigung war nichts bekannt; doch kommen wohl hauptsächlich andere seltene Erden in Betracht. Auf Grund der bekannten Halbwertszeiten der übrigen seltenen Erden brauchte nur Erbium ausgeschlossen zu werden, für das eine Halbwertszeit von 7 Min. angegeben wird⁵. Es wurde daher aus 100 mg Erbium in derselben Weise wie beim Dy ein Präparat auf einer 0,5 mm dicken Bleiunterlage hergestellt. Bestrahlungen dieses Präparates mit langsamen Neutronen ergaben bei unseren Neutronenquellen keinerlei Andeutung einer solchen Halbwertszeit, so daß eine Zurückführung der kurzen Dy-Aktivität auf eine Erbiumverunreinigung ausgeschlossen ist.

Zuordnung der neuen Aktivität

Wie die oben besprochenen Absorptionsversuche ergeben haben, ist die Energie der Strahlung des 1,2-Min.-Körpers nur 130 KeV. Eine derart geringe Energie für einen β -Strahler von 1,2-Min.-Halbwertszeit wäre natürlich ganz ungewöhnlich, wie eine Betrachtung des Sargent-Diagramms erkennen läßt. Abb. 2 zeigt nach den neuesten Daten den Zusammenhang zwischen der Halbwertszeit T und der β -Zerfallsenergie E für alle derzeit bekannten β -Strahler. Als Ordinate ist aufgetragen der Logarithmus der Halbwertszeit, als Abszisse der Logarithmus der Energie der β -Strahlen. In die Abb. sind keine Positronenstrahler aufgenommen. Jeder künstlich radioaktive β -Strahler ist durch einen Kreis dargestellt, der mit dem chemischen Symbol der betreffenden Atomart bezeichnet ist; die „natürlichen“ Aktivitäten sind durch Kreuze gekennzeichnet. Es zeigt sich deutlich die bekannte Tatsache, daß zwar ein eindeutiger Zusammen-

hang zwischen T und E nicht besteht, daß aber doch nur ein gewisser Streifen in diesem Diagramm von Punkten erfüllt ist, und daß alle Elemente in oder oberhalb einer geraden Linie liegen, die etwa durch die beiden Punkte RaD und ^{12}B definiert ist. In Abb. 2 ist auch der Punkt für die kurzlebige Dysprosiumaktivität eingetragen, und man sieht sofort, daß er weit außerhalb der für den β -Zerfall üblichen Regionen liegt. Daraus muß geschlossen werden, daß es sich bei der beobachteten Aktivität um einen Anregungszustand eines Dysprosiumkerns handelt, der größtenteils unter Aussendung eines Sekundärelektrons (e^- -Strahlung) ohne Änderung der Kernladungszahl in den Grundzustand übergeht. Man hätte dann für die Anregungsenergie 180 KeV ($130 + 54$) anzunehmen, was bei der gemessenen Halbwertszeit mit den theoretischen Vorstellungen durchaus im Einklang steht.

Die naheliegende Annahme, daß es sich bei der 1,2-Min.-Aktivität um ein Isomer zum 2,5-Stdn.-Körper handle, läßt sich auf folgende Art ausschließen: Die kurze Aktivität ist bei Sättigungsbestrahlung fast ebenso aktiv wie der 2,5-Stdn.-Körper (1 : 1,25). Wenn nun der langlebige das Folgeprodukt des kurzlebigen wäre, so müßte bei kurzer Bestrahlung und sofortiger Messung in dem Maße, wie der kurze zerfällt, ein Anstieg des langlebigen zu beobachten sein, der normalerweise durch den viel intensiveren kurzlebigen Körper verdeckt wäre. Nun kann man aber wegen der geringen Strahlenhärte des kurzlebigen mit einer 100- μ -Folie diesen ausschalten und praktisch die 2,5-Stdn.-Aktivität allein messen. Das Ergebnis solcher Versuche, bei denen Dysprosium 30 Sek. mit langsamen Neutronen bestrahlt und mit einer 100- μ -Al-Folie bedeckt gemessen wurde, zeigt Abb. 1 b. Die Aktivität des 2,5-Stdn.-Körpers setzt sofort mit ihrer vollen Stärke ein, so daß diese nicht aus einem 1,2-Min.-Körper gebildet sein kann. Da auch das Umgekehrte (1,2-Min.-Körper Folgeprodukt des 2,5-Stdn.-Körpers) aus leicht ersichtlichen Gründen nicht in Frage kommt, kann also die kurze Aktivität kein Isomer zur langlebigen darstellen. Nun hat L. Meitner⁶ direkt gezeigt, daß die starke Absorption langsamer Neutronen durch Dysprosium nur zum Teil darauf zurückzuführen ist, daß aus ^{164}Dy durch Neutroneneinfang das aktive ^{165}Dy entsteht, ein anderer Teil vielmehr auch darauf, daß andere Isotope gleichfalls Neutronen absorbieren, wobei aber dann wieder sta-

⁵ J. K. Marsh u. S. Sugden, *Nature* [London] **136**, 102 [1935], u. J. C. McLennan u. W. H. Rann, ebenda **136**, 831 [1935].

⁶ *Ark. Mat. Astron. Fysik* **27**, Nr. 17 [1940].

bile Isotope entstehen. Diese Tatsache konnte bereits, wenn auch nicht so beweiskräftig, durch Betrachtung der Wirkungsquerschnitte für Neutronenabsorption gefolgert werden, die 700–870 $\cdot 10^{-24}$ cm² betragen⁷, während der Wirkungsquerschnitt für Bildung des 2,5-Stdn.-Körpers zu 250–450⁸ angegeben wird. Da oben gezeigt worden ist, daß die 1,2-Min.-Aktivität kein Isomer zum ¹⁶⁵Dy darstellt, andererseits aber mit praktisch derselben Häufigkeit durch Einfang langsamer Neutronen entsteht, muß der Schluß gezogen werden, daß es sich bei der Erzeugung um einen (n, γ)-Prozeß handelt, der von einem stabilen Dysprosium-Isotop 160, 161, 162 oder 163 ausgeht (die Masse 158 soll wieder wegen der geringen Häufigkeit außer Betracht bleiben) und normalerweise zu einem nächsthöheren stabilen Isotop führen würde. Da beim Einbau eines Neutrons in den Kern ein großer Energiebetrag frei wird, der in Form von γ -Energie abgestrahlt werden muß, entsteht also der Dysprosiumfolgekern zunächst hochangeregt und strahlt praktisch momentan seine γ -Energie entweder auf einmal oder in Kaskaden ab. Dabei muß es offenbar vorkommen, daß der metastabile Zustand von 180 KeV erreicht wird, der dann erst mit beobachtbarer Halbwertszeit unter Aussendung eines e-Teilchens in den Grundzustand übergeht. Wir glauben also, gezeigt zu haben, daß die Aktivität von 1,2 Min. einen isomeren Zustand zu einem stabilen Dysprosiumkern darstellt.

Über die Zuordnung der Aktivität zu einer bestimmten Massenzahl läßt sich auf Grund der Mattauchschen Regeln für Kernisomerie⁹ etwas aussagen. Wenn diese Regeln auch noch nicht den Charakter allgemeiner Gesetze angenommen haben, so scheinen sie sich doch durchweg zu bewäh-

⁷ H. Volz, Z. Physik **121**, 201 [1943]; J. R. Dunning, G. B. Pegram, G. A. Fink, P. P. Mitchell, Physic. Rev. **48**, 265 [1936]; L. Meitner⁸, W. Riezler, Ann. Physik **41**, 476 [1942].

ren, und wir wollen von ihnen versuchsweise Gebrauch machen. Die erste Kernisomeren-Regel lautet: Kerne vom Typus g-g (gerade Protonenzahl und gerade Neutronenzahl) haben keine isomeren

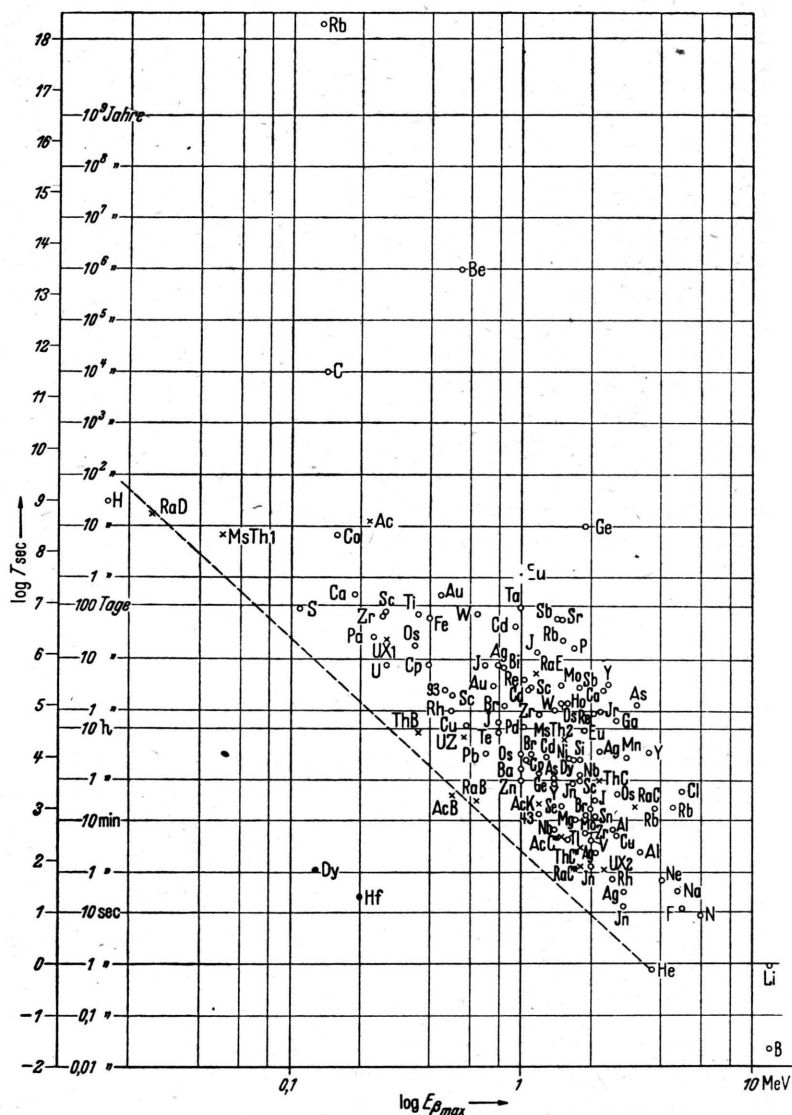


Abb. 2. Sargent-Diagramm.

o = künstlich radioaktive,

x = natürlich radioaktive negative β -Strahler.

Zustände. Danach scheiden also die Massenzahlen 158, 160, 162 und 164 aus. Es kommen nur noch die Massen 161 und 163 in Frage. Eine Auswahl

⁸ F. G. Houtermans, Z. Physik **118**, 424 [1941]; K. Sinma u. F. Yamasaki, Physic. Rev. **59**, 402 [1941].

⁹ J. Mattauch, Z. Physik **117**, 246 [1941].

unter diesen ist durch Betrachtung der Wirkungsquerschnitte möglich. Da der Wirkungsquerschnitt für die Bildung des 2,5-Stdn.-Körpers etwa $270 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$ beträgt, so folgt aus dem Vergleich der Intensitäten für den 1,2-Min.-Körper $215 \cdot 10^{-24}$, beide Werte bezogen auf Isotopengemisch. Wäre die Massenzahl des aktiven Isotops 161, so wäre das seltene ^{160}Dy (0,1%) Ausgangsisotop und der Wirkungsquerschnitt bezogen auf das Reinisotop $215 000 \cdot 10^{-24}$. Hingegen erfordert die Massenzahl 163 nur einen Wirkungsquerschnitt des Reinisotops 162 von $900 \cdot 10^{-24}$, was in derselben Größenordnung liegt wie für den 2,5-Stdn.-Körper. Wir wollen daher versuchsweise die 1,2-Min.-Aktivität dem $^{163}\text{Dy}^*$ zuordnen.

Hafnium

Zur Untersuchung des Hf wurden, genau wie bereits beim Dy beschrieben, Präparate hergestellt, die etwa 200 mg Hafniumoxyd in homogener Schicht auf 0,5 mm Bleiblech enthielten. Zur Verfügung standen uns 2 verschiedene Hf-Präparate¹⁰. Der Reinheitsgrad betrug beim ersten etwa 92%, beim zweiten 97% Hf, der Rest war in beiden Fällen vorwiegend Zr. Zur Untersuchung der Wirkungen der Zr-Verunreinigung wurde noch ein in derselben Weise hergestelltes Präparat von 200 mg Zirkonoxyd benutzt.

Bisher bekannte Aktivität

Hf gibt mit langsamen Neutronen eine Halbwertszeit von $T = 55 \text{ Tgn.}^{11}$, welche aber nicht sehr intensiv ist. Da es die folgenden stabilen Isotope besitzt: 174 (0,18%), 176 (5,30%), 177 (18,47%), 178 (27,10%), 179 (13,84%), 180 (35,11%)¹², von denen wieder 174 wegen der geringen Häufigkeit außer Betracht bleibt, wurde die Aktivität dem ^{181}Hf zugeordnet, das nach $^{180}\text{Hf} (n\gamma) ^{181}\text{Hf}$ entsteht.

Bestrahlung mit schnellen und langsamen Neutronen

Zunächst wurde untersucht, ob Hf beim Bestrahlen mit unverlangsamten D + D-Neutronen einen (n,n)-Prozeß zeigt. Bestrahlungszeiten von eini-

¹⁰ Für die freundliche Überlassung der Hf-Präparate sind wir Hrn. Prof. v. Hevesy zu Dank verpflichtet.

¹¹ G. v. Hevesy u. H. Levy, Nature [London] **135**, 580 [1935]; Kong. dansk. Vidensk. Selsk., mat.-fysiske Medd. **15**, Nr. 11 [1938].

gen Sek. bis zu einer Stunde ergaben nichts außer einer schwachen kurzlebigen Aktivität, die sich aber als verstärkbar erwies, so daß über das Vorliegen eines (n,n)-Prozesses nichts ausgesagt werden kann. Das Umgeben von Neutronenquelle und Präparat mit Paraffin ergab dann diese kurzlebige Aktivität in wesentlich größerer Intensität, so daß deren Halbwertszeit aus zahlreichen Versuchen zu $T = 19 \pm 0,5 \text{ Sek.}$ bestimmt werden konnte. Abb. 3 zeigt zwei der erhaltenen Abfallskurven, die sich

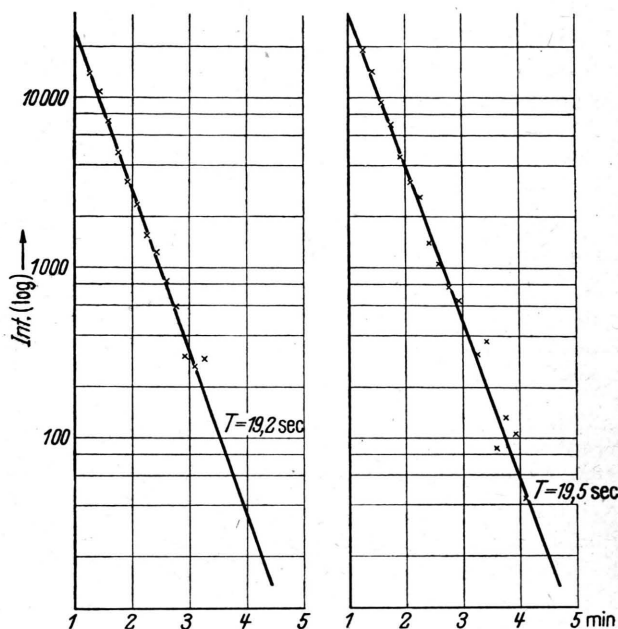


Abb. 3. Hafnium mit verlangsamen D + D-Neutronen aktiviert.

durch Addition von zahlreichen gleichartigen Versuchen ergaben. Die Präparate verschiedener Reinheit zeigten diese Halbwertszeit in etwa gleicher Intensität, was mit der Annahme verträglich ist, daß die Intensität dem Hf-Gehalt proportional ist, da natürlich Intensitätsunterschiede von 92:97 nicht beobachtet werden konnten. Hingegen wären Intensitätsunterschiede von etwa 3:8, wie sie hätten auftreten müssen, wenn die Aktivität auf die Verunreinigung zurückzuführen sein sollte, nicht der Beobachtung entgangen. Zur Kontrolle wurde noch das Präparat aus 200 mg Zirkon in derselben Weise mit Neutronen bestrahlt. Es ergab sich, daß höchstens $3 \cdot 10^{-4}$ der beim Hf gemessenen Aktivität auf die Zr-Verunreinigungen zurückzuführen

¹² Häufigkeiten nach J. Mattaucah u. H. Ewald, Naturwiss. **31**, 487 [1943], u. Z. Physik **122**, 314 [1944].

sein können, so daß die beobachtete Aktivität des Zr wohl auf einer Hf-Verunreinigung desselben beruht.

Die Strahlung des 19-Sek.-Körpers ist sehr weich. Zur Bestimmung der Reichweite mußte beim kurzlebigen Körper besonders schnell verfahren werden. Zu diesem Zweck wurden die Hf-Präparate bereits vor dem Bestrahlen mit einer steigenden Zahl von dünnen Cellophanfolien bedeckt, zusammen mit Neutronen bestrahlt und mit den Folien gemessen. Die Folien wurden nicht aktiv und absorbierten während der Messung die Strahlung. Auf diese Weise konnte sehr schnell gearbeitet werden. Zur Kontrolle wurden aber ferner auch Absorptionsversuche unternommen, bei denen die Absorptionsfolien aus Al am Zählerfenster angebracht waren. Beide Versuche ergaben übereinstimmend eine maximale Reichweite der Strahlung von 30 mg/cm^2 entsprechend einer Energie $E = 190 \text{ KeV}$. Von Interesse war auch die Energie der den 19-Sek.-Körper anregenden Neutronen. Die Verstärkbarkeit, d. h. das Verhältnis der Intensitäten mit und ohne Paraffin, betrug 35. Die Aktivität wird demnach stark von thermischen Neutronen angeregt. Der im Verhältnis zum Dy kleine Wert des Verstärkungsfaktors ließ eine Resonanzstelle vermuten; Bestrahlungen mit Paraffin, aber innerhalb Cd, ergaben 32% von der Intensität mit Paraffin ohne Cd. Dieses Verhalten läßt also darauf schließen, daß oberhalb der thermischen Energie noch eine Resonanzstelle für Neutronen vorhanden ist.

Zuordnung der kurzen Halbwertszeit

Von Interesse ist wieder die auffallend geringe Energie der ausgesandten Strahlung im Verein mit der kurzen Halbwertszeit. Trägt man entsprechend wie beim Dy die Daten in das Sargent-Diagramm, Abb. 2, ein, so bekommt man wieder einen Wert, der völlig herausfällt. Dieselben Gründe, die bereits beim Dy dargelegt worden sind, machen es also wahrscheinlich, daß die Aktivität nicht auf β -Zerfall, sondern auf Isomerenübergang eines angeregten Zustandes eines Hf-Isotops zurückzuführen ist, der unter Aussendung von Umwandlungselektronen anstelle von γ -Strahlung in den Grundzustand übergeht.

Es ergibt sich nun die Frage, ob es sich um einen isomeren Zustand zur bekannten 55-Tage-Aktivität handelt. Sollte dies der Fall sein, so müßte der 55-Tage-Körper das Folgeprodukt des kurzlebigen

sein, wie man daraus schließen muß, daß bei kurzer Bestrahlung der kurzlebige erheblich mehr als 10^5 -mal so stark wie der langlebige auftritt. Es müßte sich also ein etwaiger genetischer Zusammenhang aus dem Anstieg des 55-Tage-Körpers ermitteln lassen. Für die direkte Beobachtung eines Anstiegs aus dem 19-Sek.-Körper liegen hier die Verhältnisse aber sehr ungünstig, da eine innerhalb weniger Sekunden aus dem 19-Sek.-Körper entstehende 55-Tage-Aktivität viel zu schwach ist. Es ließ sich aber aus einem Vergleich der Intensitäten beider Körper eine Aussage machen. Wäre nämlich der 55-Tage-Körper das Folgeprodukt des 19-Sek.-Körpers, so müßten beide Körper bei unendlich langer Bestrahlung dieselbe Sättigungsaktivität zeigen, wobei natürlich auf Absorption im Zähler u. dgl. zu korrigieren ist. Mit unserer Neutronenquelle waren Bestrahlungen bis zur Sättigung des 55-Tage-Körpers nicht durchführbar; es wurde daher eine wesentlich kürzere Bestrahlung vorgenommen und auf Sättigungsaktivität umgerechnet. Für diesen Versuch wurde ein Hf-Präparat 4 Stdn. mit langsamen Neutronen bestrahlt. Zur Kontrolle wurden gleichzeitig ein leeres Bleiblech und ein Zr-Präparat mitbestrahlt. Alle Präparate waren vorher sorgfältig über längere Zeit gemessen. Sofort nach dem Abschalten der Neutronen wurde die kurze Komponente des Hf sorgfältig gemessen und dann die Aktivität aller Präparate viele Tage verfolgt, um die Intensität der langlebigen Hf-Komponente zu bestimmen. Die Kontrollpräparate zeigten schwache Aktivität, die aber 20 % der langlebigen Hf-Komponente nicht überstieg. Die Neutronenquelle lieferte für den 19-Sek.-Körper eine Sättigungsaktivität, die, auf Zählerfolienabsorption und endliche Schichtdicke korrigiert, $15000 \pm 1000/\text{Min.}$ betrug. Da eine D+D-Neutronenquelle bei langen Bestrahlungen im Laufe der Zeit etwas schwächer wird, liegen also die mittleren Aktivitäten der kurzen Periode noch höher. Für den 55-Tage-Körper ergab sich nach Berücksichtigung derselben Korrekturen die Sättigungsaktivität zu nur $5100 \pm 400/\text{Min.}$ Das heißt also, daß bei unendlicher Bestrahlung der 19-Sek.-Körper dreimal so aktiv wie der langlebige wird, und dieser kann daher nicht das Folgeprodukt des ersten sein. Da andererseits das Umgekehrte — 19-Sek.-Körper das Folgeprodukt des 55-Tage-Körpers — aus klar ersichtlichen Gründen nicht der Fall sein kann, ist also keiner ein Isomer des anderen.

Eine Betrachtung der Isotopentabelle zeigt ferner, daß keine Möglichkeit besteht, etwa ein K-Einfang zeigendes Hf-Isotop für die 19-Sek.-Aktivität verantwortlich zu machen, da entsprechende Cp-Isotope fehlen bzw. als Folgeprodukte durch ihre Aktivität auffallen müßten.

Es muß daher geschlossen werden, daß es sich bei der Aktivierung des kurzlebigen Körpers um einen (n, γ) -Prozeß eines Hf-Isotops handelt, der zum nächsthöheren stabilen Isotop führt und dieses in einen angeregten Zustand versetzt, dessen Anregungsenergie $250 (190 + 65)$ KeV beträgt und der mit einer Halbwertszeit von 19 Sek. in den Grundzustand übergeht. Zur Frage der Zuordnung zu einer Massenzahl müssen wir wieder die Mattausche Kernisomeren-Regel heranziehen. Die Massenzahl 174 soll wegen der geringen Häufigkeit des

Isotops außer Betracht bleiben. Wegen der Mattauschen Regel sind die Kerne 176, 178, 180, die sämtlich dem Typus g-g angehören, auszuschließen, so daß nur 177 und 179 übrig bleiben. Da beide gleicher Häufigkeit sind, können wir keine Wahl zwischen ihnen treffen. Wir wollen daher die beobachtete Aktivität von 19 Sek. versuchsweise dem $^{177, 179}\text{Hf}^*$ zuordnen.

Für beide Isotope liegen auch Angaben über den Kernspin vor¹³. Er beträgt bei beiden $\leq 3/2$. Sollte der Kernspin $i = 3/2$ zutreffen, so wäre dies das erstmal, daß für einen solchen Fall ein Isomer existierte, während der Spin $i = 1/2$ ausgezeichnet zu den anderen kernphysikalischen Erfahrungen passen würde.

¹³ E. Rasmussen, Naturwiss. 23, 69 [1935].

Quantentheorie der Feldmechanik

Von FRITZ BOPP

Aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik, Hechingen

(Z. Naturforschg. 1, 196—203 [1946]; eingegangen am 2. März 1946)

Die früher abgeleiteten Bewegungsgleichungen der Feldmechanik werden — zunächst ohne Berücksichtigung der Strahlungskraft — nach dem Retardierungsparameter entwickelt, und zwar einen Schritt weiter als in der Lorentzschen Theorie des Elektrons. Die resultierenden Bewegungsgleichungen enthalten neue Freiheitsgrade, die eine Zitterbewegung beschreiben und bereits im klassischen Bereich zu spinartigen Drehimpulszusätzen Anlaß geben. Der formale Übergang zur Quantenmechanik macht keine Schwierigkeit und führt zu einer Wellengleichung vom Diracschen Typ allerdings derart, daß zunächst nur Lösungen mit ganzzahligem Spin möglich sind und daß im allgemeinen eine starke Kopplung besteht zwischen Lösungen, die zu verschiedenem Spin gehören. Der Spezialfall des kräfte- und impulsfreien Teilchens wird besonders untersucht. Die Wellengleichung vereinfacht sich, wird aber keineswegs trivial. Ihre Eigenlösungen geben Zustände des Elementarteilchens, die zu verschiedenen Massen- und Spinwerten gehören, fassen also prinzipiell die Gesamtheit der Elementarteilchen in einer Wellengleichung zusammen. Quantitativ sind die Ergebnisse in der vorliegenden Näherung noch unbefriedigend. Die Art der Abweichung von den wirklichen Verhältnissen liegt nach früheren Untersuchungen an der Näherung und ist von vornherein zu erwarten.

§ 1. Zur Quantelung der Feldmechanik

Dem Versuch, die Singularitätenschwierigkeit in der Quantentheorie der Wellenfelder durch Abänderung der Maxwell'schen Gleichungen zu lösen, begegnet man im allgemeinen mit Vorbehalt. Es ist die Meinung verbreitet, daß die Annahme spezieller Struktureigenschaften unterhalb endlicher Grenzdimensionen ebenso sinnlos sei wie die

von gleichzeitigen Orts- und Impulsmessungen, deren Genauigkeit die Heisenbergsche Unschärferelation übersteigt. C. F. Weizsäcker¹ glaubt sogar, daß man die Notwendigkeit einer solchen Annahme mindestens in speziellen Fällen aus der Unschärferelation ableiten kann. Er zeigt, daß

¹ „Theorie des Mesons“ in Heisenbergs „Vorträge über kosmische Strahlung“, Springer 1943, 10, 7, S. 108.