

# Die Aktivierung der seltenen Erden durch thermische Neutronen I<sup>1</sup>

Von WALTHER BOTHE

Aus dem Institut für Physik am Kaiser-Wilhelm-Institut für medizin. Forschung, Heidelberg

(Z. Naturforschg. 1, 173—179 [1946]; eingegangen am 14. Dezember 1945)

Die Aktivitäten, die mit thermischen Neutronen in Thulium, Ytterbium und Cassiopeium erhalten wurden, und ihre Kennzeichen sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

Aktives Isotop	Halbwertszeit	Zerfall	$\beta$ -Str. eMV	$\gamma$ -Str. eMV	K-Str. von	Zerfallsprodukt
Tm <sup>170</sup>	127 $\pm$ 5 d	$\beta_-$	1	keine	keine	Yb <sup>170</sup>
Yb <sup>169</sup>	33 $\pm$ 1,5 d	K	keine	0,2; 0,4	Tm	Tm <sup>169</sup>
Yb <sup>175,177</sup>	99 $\pm$ 3 h	$\beta_-$	0,13; 0,50	0,35	Cp (inn. Umw.)	Cp <sup>175,177</sup>
Yb <sup>175,177</sup>	2,4 $\pm$ 0,2 h	$\beta_-$	1,3	?	?	Cp <sup>175,177</sup>
*Cp <sup>176</sup>	163 $\pm$ 4 h	$\beta_-$	0,52	keine?	keine?	Hf <sup>176</sup>
		K	keine	0,2	Yb	Yb <sup>176</sup>
Cp <sup>177</sup>	220 $\pm$ 10 min	$\beta_-$	1,15	keine	keine	Hf <sup>177</sup>

Die kernphysikalische Stoffanalyse wird sicherer und einfacher, wenn man außer dem zeitlichen Aktivitätsverlauf auch die Absorption der Strahlen verfolgt. Für die Ermittlung eines kleinen Tm- oder Cp-Gehalts werden Beispiele gebracht.

1. Ziel der Untersuchung. Im Gebiet der seltenen Erden sind die bisherigen Kenntnisse über künstliche Radioaktivität spärlicher als in anderen Teilen des periodischen Systems, hauptsächlich wegen der Schwierigkeit, genügend reine Präparate oder wenigstens solche von gut bekannter Zusammensetzung zu erhalten. Im allgemeinen stehen nur angereicherte Gemische zur Verfügung, deshalb muß man möglichst alle seltenen Erden im Zusammenhang untersuchen. Dies wurde in der vorliegenden Untersuchung bezüglich der Aktivierung durch thermische Neutronen durchgeführt. Yttrium und Scandium wurden als mögliche Verunreinigungen

<sup>1</sup> Dieser I. Teil wurde (in etwas ausführlicherer Fassung) April 1944 der Z. Physik eingesandt, kam aber bisher nicht zur Veröffentlichung. Er ist Hrn. Prof. R. W. Pohl zu seinem 60. Geburtstag am 10. August 1944 gewidmet.

<sup>2</sup> Die Gesamtergebnisse wurden schon in Tabellenform mitgeteilt in Nachr. Ges. Wiss., Göttingen, Math.-physik. Kl., Okt. 1944.

mit einbezogen. Das Hauptgewicht wurde auf die langlebigen Aktivitäten (> einige Stunden) gelegt<sup>2</sup>. Über die kürzeren Halbwertszeiten liegt schon eine größere Zahl von mehr oder weniger systematischen Untersuchungen vor<sup>3</sup>.

Außer den Halbwertszeiten wurden auch Naturabsorptionskurven und Ursprung der Strahlungen untersucht, wobei teilweise auch Koinzidenzmessungen hinzugezogen wurden, die H. Maier-Leibnitz ausführte. Die Absorptionskurven sind auch von praktischer Wichtigkeit für die kernphysikalische Stoffanalyse. In mehreren Fällen reicht nämlich die Halbwertszeit allein nicht zur eindeutigen Kennzeichnung des Elementes aus<sup>4</sup>, die Absorbierbarkeit der Strahlen ist dann

<sup>3</sup> Vergl. insbesondere G. Hevesy u. H. Levi, Danske Videnskab. Selskab. 14, Nr. 5 [1936].

<sup>4</sup> Ordnet man z. B. die im ganzen periodischen System bekannten Halbwertszeiten, die zwischen 1 h und 100 d liegen, nach ihrer Größe, so beträgt der mittlere relative Abstand nur rund 4%.



ein weiteres bequemes Unterscheidungsmerkmal. Beispiele liefern die vorliegenden Untersuchungen.

Einzelne Lücken in der Untersuchungsreihe sind durch die Zeitverhältnisse bedingt. Auch die Literaturhinweise erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit<sup>5</sup>.

**2. Ausführung der Messungen.** Die Präparate bestanden meist aus 0,2–0,6 g des betreffenden Oxyds, die in Aluminiumschälchen von 2 cm Durchmesser eben gepreßt und mit Cellophan von 4 mg/cm<sup>2</sup> bedeckt wurden. Nur Terbium- und Holmiumoxyd mußten wegen Materialmangels in dünner Schicht untersucht werden. Wo es nötig war, wurde die Substanz erst nach der Bestrahlung in das Schälchen gebracht, damit die Messung nicht durch Aktivitäten des Aluminiums und seiner Verunreinigungen gestört wurde. Gemessen wurde mit einem gepanzerten Aluminium-Zählrohr von 2 cm Durchmesser, 3 cm wirksamer Länge und 0,1 mm Wandstärke, in Verbindung mit einer einfachen und daher zuverlässigen Neher-Harper-Schaltung und einem hochauflösenden Zählwerk. Empfindlichkeit, Auflösekurve und Nulleffekt der Meßapparatur wurden dauernd kontrolliert und blieben über viele Monate konstant. Durch eine Schlitten-einrichtung, in die das Präparat gespannt wurde, war für genau reproduzierbare Meßgeometrie gesorgt. Es wurden nie mehr als 1000 Stöße/min gezählt, um die Auflösekorrektur klein zu halten. Nötigenfalls wurde die Stoßzahl durch großen Abstand reduziert und sorgfältige Anschlußmessungen gemacht. Blenden und Absorber sind im allgemeinen hierfür ungeeignet, weil dabei leicht Filtereffekte auftreten.

Die Neutronen, mit denen bestrahlt wurde, wurden meist im Zyklotron durch Beschießen von Beryllium mit Deuteronen erzeugt. Die Bestrahlung erfolgte stets zwischen je 5 cm Paraffin vorn und hinten. Die maximale Bestrahlungsdosis, die auf höchstens 2 Tage verteilt wurde, entsprach etwa 30 kg Ra + Be während einer Stunde, Präparat und Quelle zusammen in einem Paraffinblock angenommen. Die Dosis wurde immer, so gut es anging, in einem Relativmaß mitgemessen. Vor der Bestrahlung wurde stets die Eigenaktivität der Präparate gemessen, die (vom natürlich aktiven Cp abgesehen) von minimalen radioaktiven Verunreinigungen herrührte.

<sup>5</sup> Wegen der Gesamtliteratur bis 1941 vergl. J. Mat-tauch u. S. Flügg e, Kernphysikal. Tabellen, Berlin 1942.

Bei den Absorptionsmessungen wurden die Absorber unmittelbar auf das Präparat gelegt. Häufig zeigte sich, daß man das Vorliegen einer komplexen Aktivität leichter und früher an der Änderung der Absorptionskurve als an der Abfallskurve selbst erkennt. In einigen Fällen wurden auch vollständige Abfallskurven mit und ohne Filter aufgenommen, was die Analyse der Abfallskurven sehr erleichterte (vergl. Yb). Alle hier wiedergegebenen Absorptionskurven gelten für eine Vorschalt-dicke von 31 mg/cm<sup>2</sup>, die sich aus der Zählrohrwand und der Cellophanfolie des Präparates zusammensetzte. Das Ladungsvorzeichen der Teilchen wurde mit einer früher beschriebenen einfachen Einrichtung<sup>6</sup> bestimmt. In allen Fällen wurden nur negative Elektronen gefunden.

In diesem I. Teil werden Thulium, Ytterbium und Cassiopeium zusammenhängend behandelt, weil gewöhnlich jedes dieser Elemente mit den beiden anderen, und nur mit diesen verunreinigt ist.

### Thulium

3. Zwei Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Präparate verschiedener Herkunft zeigten, abgesehen von den Aktivitäten der Yb- und Cp-Verunreinigungen, nur die schon von

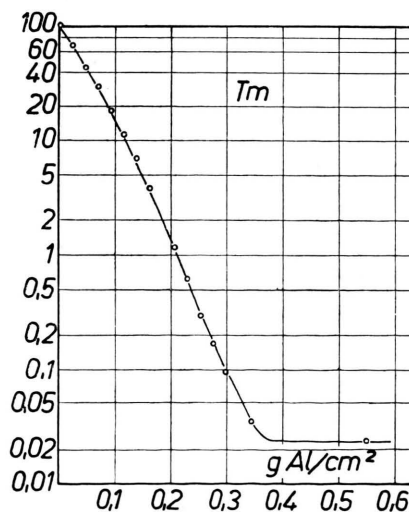


Abb. 1. Absorptionskurve der Tm<sup>170</sup>-Strahlen in Al.

E. Neuninger u. E. Rona<sup>7</sup> aufgefundene Halbwertszeit von  $T = 4 \pm \frac{1}{2}$  Monaten. Eine Meßreihe

<sup>6</sup> W. Bothe u. A. Flammersfeld, Naturwiss. **29**, 194 [1941].

<sup>7</sup> Wien. Anz. **73**, 159 [1936].

von etwa 1 Jahr ergab den genaueren Wert<sup>8</sup>  $T = 127 \pm 5$  d. Die Zuordnung zu  $Tm^{170}$  ist eindeutig. Die Absorptionskurve der Strahlen zeigt Abb. 1. Aus der Reichweite der  $\beta$ -Strahlen kann man auf eine Grenzenergie von rd. 1 eMV schließen. Die  $\gamma$ -Strahlung beträgt, auf dünne Präparatschicht und Zählrohrwand umgerechnet, nur etwa  $5 \cdot 10^{-5}$  der  $\beta$ -Ausschläge und ist daher als Bremsstrahlung zu deuten. Da somit eine Kern- $\gamma$ -Strahlung fehlt, muß diese  $\beta$ -Strahlung aus einer einzigen Gruppe bestehen. Dem entspricht die stark konvexe Form der Absorptionskurve Abb. 1. Auch eine K-Strahlung tritt nicht auf, obwohl sie an sich möglich wäre, da  $Er^{170}$  stabil ist.

Der Tm-Nachweis mittels der 127-d-Aktivität ist wegen des großen Aktivierungsquerschnittes ( $\approx 100 \cdot 10^{-24}$  cm<sup>2</sup>) sehr empfindlich. Die Unterscheidung von anderen Aktivitäten ähnlicher Halbwertszeit (Tb, Sc) ist leicht möglich an Hand der Absorptionskurve und durch das Fehlen einer  $\gamma$ -Strahlung. Tm-Verunreinigungen bis zu wenigen 0,01% herab wurden in den hier benutzten Präparaten leicht nachgewiesen.

#### Cassiopeium

4. Halbwertszeit und  $\beta$ -Strahlen. Das benutzte  $Cp_2O_3$  sollte nach Angabe des Herstellers 9% Yb und 1% Tm enthalten. Es wurden zwei Proben bestrahlt und ihr Abfall gemessen, bei der einen über mehr als 100 Tage. Von dieser Probe wurden gleichzeitig drei Abfallskurven aufgenommen, nämlich eine mit unbedecktem Präparat, die zweite mit 1 mm Al-Filter, die dritte mit 1 mm Pb + 1 mm Al-Filter (Al außen). Die ersten beiden Kurven zeigten im Endabfall die Tm-Aktivität nach Halbwertszeit (127 d; s. o.) und Absorption; es konnte auf einen Tm-Gehalt von rd. 2% geschlossen werden. Nach Abzug dieser Komponente zeigten alle Abfallskurven vom dritten Tage ab exponentiellen Verlauf mit einer Halbwertszeit von  $163 \pm 4$  h. Dies ist eine schon bekannte Cp-Aktivität<sup>9</sup>. Der Yb-Gehalt machte sich in den Abfallskurven nicht bemerkbar, weil Yb bedeutend schwächer aktiviert wird und ähnliche Halbwertszeit und Absorption in Aluminium hat (s. w. u.). Eine kleine Korrektur hierfür ist bei dem angegebenen Wert der Halb-

wertszeit schon berücksichtigt. Ohne diese Korrektur haben Flammersfeld u. Mattauch an einem Präparat gleicher Zusammensetzung 6,6 d gemessen, in guter Übereinstimmung.

Die Absorptionskurve der Strahlen in Aluminium wurde mehrmals im Verlauf des Zerfalls gemessen; sie änderte sich wegen des Tm-Gehaltes (Abb. 2). Die letzte Kurve zeigt wieder die reine Tm-Aktivität. Korrigiert man von dieser aus die übrigen Absorptionskurven, so erhält man die des reinen Cp, die ebenfalls in Abb. 2 eingetragen ist. Der Tm-Gehalt macht sich in der Absorptions-

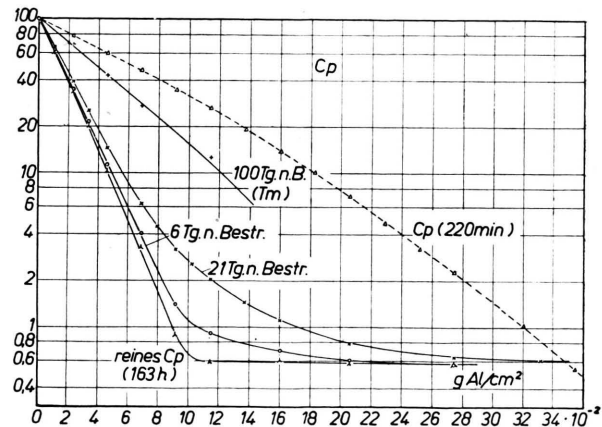


Abb. 2. Absorptionskurven der Cp-Strahlungen in Al (unreines Präparat).

kurve viel früher bemerkbar als in der Abfallskurve.

Die Absorptionskurve zeigt eine durchdringende Komponente, die etwa 0,02% zu den Zähleraus-schlägen beiträgt, auf dünne Schicht und Zählrohrwand umgerechnet. Aus der Reichweite der  $\beta$ -Strahlen kann auf eine Grenzenergie von etwa 520 ekV geschlossen werden (Flammersfeld u. Mattauch geben, bei praktisch übereinstimmender Reichweite, 440 ekV an).

5. Die durchdringenden Strahlungen. In Abb. 6 ist die Absorptionskurve des durchdringenden Strahlungsanteils der 163-h-Aktivität in Blei eingezeichnet. Die Bleiabsorber waren dabei stets mit 1 mm Al zur Absorption der  $\beta$ -Strahlen bedeckt. Für den Yb-Gehalt sind kleine Korrekturen angebracht; der Tm-Beitrag ist zu vernachlässigen. Die Kurve zeigt eine härtere Komponente von rd. 200 ekV und eine weichere, die in 1 mm Pb vollständig absorbiert wird. Entsprechende Absorptionsmessungen in Kupfer ergaben für letztere

<sup>8</sup> Die im folgenden angegebenen Fehler bedeuten stets Fehler-Grenzen.

<sup>9</sup> G. Hevesy u. H. Levi<sup>3</sup>; A. Flammersfeld u. J. Mattauch, Naturwiss. 31, 66 [1943].

eine Energie von ungefähr 60 ekV. Diese Komponente ist ungefähr ebenso durchdringend wie eine entsprechende, die bei Yb auftritt und sicher die Tm-K-Strahlung darstellt (s. w. u.). Daher kann man auch beim Cp auf eine K-Strahlung aus der Nachbarschaft dieses Elementes schließen.

Über den Ursprung dieser K-Strahlung geben Koinzidenzmessungen Aufschluß, die H. Maier-Leibnitz ausgeführt hat. Diese ergaben, daß die K-Strahlung mit der  $\gamma$ -Strahlung von 200 ekV gekoppelt ist, dagegen nicht erkennbar mit der  $\beta$ -Strahlung. *Hiernach liegt K-Einfang vor, zum Teil in einem um rd. 200 ekV angeregten Zustand des entstehenden Yb-Kernes*, entsprechend dem Schema Abb. 3, linke Seite. Mit dieser Deutung ist im Einklang der relativ große Anteil der K-Strah-

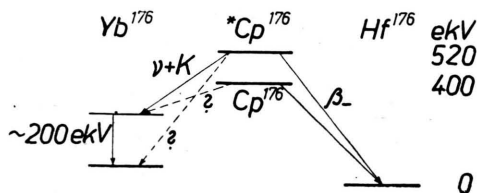


Abb. 3. Zerfallsschema des  $^{176}\text{Cp}^*$ .

lung an der ganzen durchdringenden Strahlung sowie die Tatsache, daß ungefähr jedes  $\gamma$ -Quant mit einem K-Quant gekoppelt ist. Die 163-h-Aktivität des Cp beruht also auf einem dualen  $\beta$ - und K-Zerfall.

6. Die kurzlebige und die natürliche Cp-Aktivität. Zuordnungen. Beim Cp ist noch eine weitere Aktivität von  $T = 3$  bis 4 h bekannt<sup>10</sup>. Diese wurde durch eine schwache Bestrahlung bestätigt. Als Halbwertszeit ergab sich  $220 \pm 10$  min, in befriedigender Übereinstimmung mit Flammersfeld u. Mattauch, die 3,4 h fanden. Die Absorptionskurve dieser  $\beta$ -Strahlung, korrigiert für die 163-h-Aktivität, ist in Abb. 2 gestrichelt eingezeichnet. Die Grenzenergie haben schon Flammersfeld u. Mattauch recht genau zu 1150 ekV bestimmt. Eine zugehörige  $\gamma$ -Strahlung scheint zu fehlen, in Übereinstimmung mit den genannten Autoren.

J. Mattauch<sup>11</sup> hatte schon vermutet, daß eine der beiden künstlichen Cp-Aktivitäten einem Isomer  $^{176}\text{Cp}^*$  des natürlich aktiven<sup>12</sup>  $^{176}\text{Cp}$  zukommt, weil dieses einen besonders hohen Spin hat

( $\geq 7$ ). Flammersfeld u. Mattauch (a. a. O.) nehmen weiter an, daß dies die 6,8-d-Aktivität ist, wegen der Ähnlichkeit der  $\beta$ -Strahlung mit der des natürlichen  $^{176}\text{Cp}$ . Diese Deutung ist nunmehr sichergestellt, da  $^{176}\text{Cp}$  das einzige Isotop ist, bei dem der hier beobachtete duale  $\beta$ -K-Zerfall mit  $T = 6,8$  d möglich ist.

In das Schema Abb. 3 ist das natürliche  $^{176}\text{Cp}$  mit eingezeichnet. Seine  $\beta$ -Grenze wird von W. F. Libby<sup>13</sup> zu 215 ekV, von Flammersfeld u. Mattauch zu 400 ekV angegeben. Außerdem sendet es nach letzteren Autoren eine  $\gamma$ -Strahlung von 260 ekV aus. Diese könnte identisch sein mit der  $\gamma$ -Strahlung von rd. 200 ekV, die den K-Zerfall des 163-h-Isomers begleitet (s. o.). Das würde bedeuten, daß auch das natürliche  $^{176}\text{Cp}$  dualen  $\beta$ -K-Zerfall aufweist, wie in Abb. 3 gestrichelt eingezeichnet ist (Hinweis von Hrn. Mattauch). So lange jedoch eine K-Strahlung des natürlichen Cp nicht direkt nachgewiesen ist, bleibt noch die andere Deutungsmöglichkeit, daß die natürliche 260-ekV-Strahlung mit dem  $\beta$ -Zerfall gekoppelt ist.

Die 220-min-Aktivität ist hiernach mit Flammersfeld u. Mattauch dem  $^{177}\text{Cp}$  zuzuschreiben, das aus dem natürlichen  $^{176}\text{Cp}$  durch Neutroneinfang entsteht.

## Ytterbium

7. Halbwertszeiten und  $\beta$ -Strahlen. Es wurden zwei  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ -Präparate verschiedener Herkunft untersucht. Für das reinere, mit angeblich 1% Cp als einziger Verunreinigung, zeigt Abb. 4 drei Abfallskurven, nämlich die der Gesamtstrahlung, mit 1 mm Al-Filter und mit 1 mm Pb unter 1 mm Al; die Ordinatenmaßstäbe sind nicht vergleichbar. Die beiden Kurven mit Filter lassen sich vollständig darstellen durch zwei Komponenten mit  $T = 99 \pm 3$  h bzw.  $33 \pm 1,5$  d. Beide Aktivitäten waren vorher nicht bekannt. Die Kurve „ohne Filter“ ist komplizierter, ihre Analyse gelingt einwandfrei nur unter Zuhilfenahme der Absorptionskurven.

In Abb. 5 sind die Absorptionskurven in Al in den verschiedenen Stadien des Abfalls dargestellt. 103 Tage nach der Bestrahlung besteht die Strahlung des Präparates aus einer durchdringenden Komponente, die nach Abb. 4 mit  $T = 33$  d abfällt,

<sup>10</sup> I. C. McLennan u. W. H. Rann, Nature **163**, 102 [1935]; G. Hevesy u. H. Levi<sup>3</sup>; A. Flammersfeld u. J. Mattauch<sup>9</sup>.

<sup>11</sup> Z. Physik **117**, 246 [1941].

<sup>12</sup> J. Mattauch, Naturwiss. **25**, 812 [1937]; M. Heyden u. W. Wefelmeier, ebd. **26**, 612 [1938]; J. Mattauch u. H. Lichtblau, Z. Physik **111**, 514 [1939].

<sup>13</sup> Physic. Rev. **56**, 21 [1939].

und einer verhältnismäßig schwachen  $\beta$ -Komponente, deren Absorptionskurve mit der der Tm-Strahlung (Abb. 1) übereinstimmt. Man kann daher schließen, daß erstens das Präparat etwas Tm enthält, und daß zweitens die 33-d-Aktivität nur aus durchdringenden ( $\gamma$ - oder K-) Strahlen, ohne  $\beta$ -Strahlen, besteht.

Die Beiträge des Tm und der 33-d-Aktivität des Yb zur Gesamtaktivität sind nun bekannt und können von der Abfallskurve „ohne Filter“ (Abb. 4) abgezogen werden. Die eingezeichnete Restkurve ist immer noch nicht exponentiell, läßt sich aber durch zwei Komponenten darstellen, nämlich die 99-h-Aktivität des Yb und die 163-h-Aktivität des Cp.

Jetzt lassen sich wieder alle Absorptionskurven Abb. 5 für Tm, Cp und Yb (33 d) korrigieren, und man erhält die reine Absorptionskurve des Yb (99 h) (unterste Kurve). Diese ist sehr ähnlich der des Cp (163 h), aber doch deutlich von ihr verschieden. Der durchdringende Anteil macht 0,07% der Zählereauschläge, auf unendlich dünne Schicht und Zählrohrwand umgerechnet. Die  $\beta$ -Strahlung ist um rd. 10% weicher als die des Cp. Ihre Grenzenergie beträgt etwa 500 ekV. Andeutungen einer weiteren  $\beta$ -Komponente von rd. 130 ekV, ebenfalls zum 99-h-Abfall gehörend, konnten mittels eines anderen Zählrohres mit einem Glimmerfenster von nur 6 mg/cm<sup>2</sup> gefunden werden.

Hiernach setzt sich die Gesamtstrahlung des Präparates aus folgenden vier Anteilen zusammen: einer Yb-Aktivität von  $T = 99$  h ( $\beta$ - und  $\gamma$ - oder K-Strahlung); einer Yb-Aktivität von  $T = 33$  d ( $\gamma$ - oder K-Strahlung); Cp-Aktivität in einer Stärke entsprechend einem Cp-Gehalt von 2%; Tm-Aktivität entsprechend 0,05% Tm. Dieser kleine Tm-Gehalt war offenbar der spektroskopischen Analyse des Präparates entgangen.

Diese Messungen zeigen an einem etwas schwierigeren Fall die Vorteile der kombinierten Abfalls- und Absorptionsanalyse.

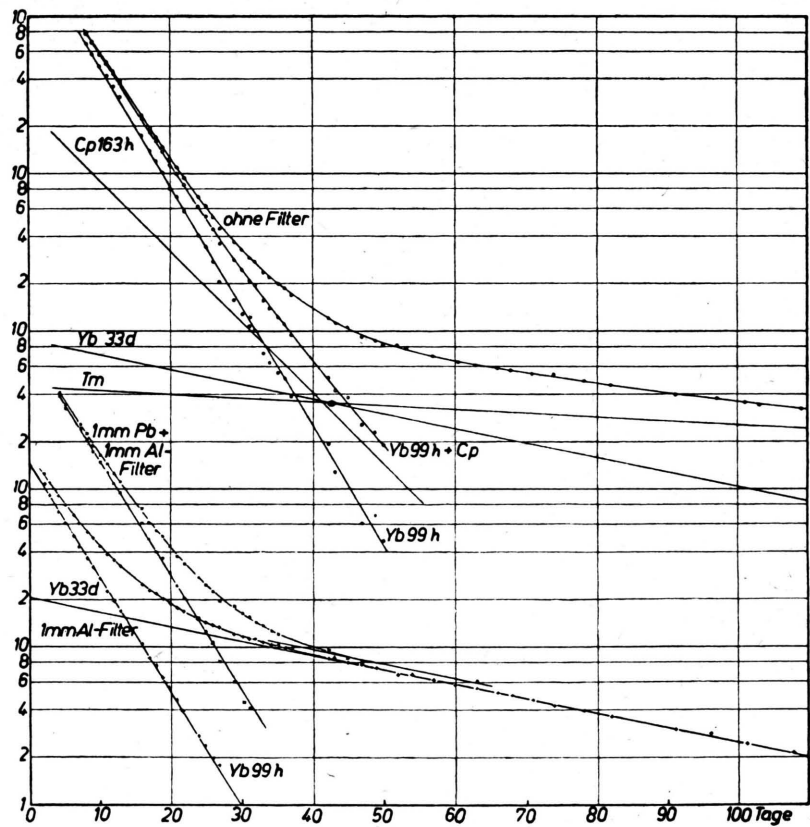


Abb. 4. Abfall eines unreinen Yb-Präparates.

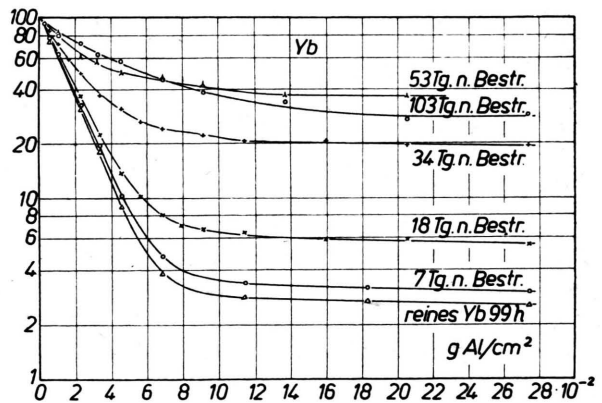


Abb. 5. Absorptionskurven der Yb-Strahlung in Al (unreines Präparat).

8. Die Strahlungen von Yb (33 d). Die Absorptionskurven der von 1 mm Al durchgelassenen Strahlen in Blei zeigt Abb. 6. Die Kurve ist wiederum veränderlich, d. h. beide Yb-Aktivitäten sind mit durchdringender Strahlung verbunden. Die

letzte Kurve (63 Tage nach Bestrahlung) ist schon stationär geworden, sie gehört zur reinen 33-d-Aktivität. Diese Kurve zeigt zwei Komponenten, von denen die weichere innerhalb der Meßgenauigkeit mit der K-Strahlung des Tm übereinstimmt. Dasselbe zeigten entsprechende Absorptionsmessungen in Kupfer. Zur genaueren Prüfung dieser Frage wurden Absorptionsmessungen in Selektivfiltern vorgenommen. Als solche wurden die übr-

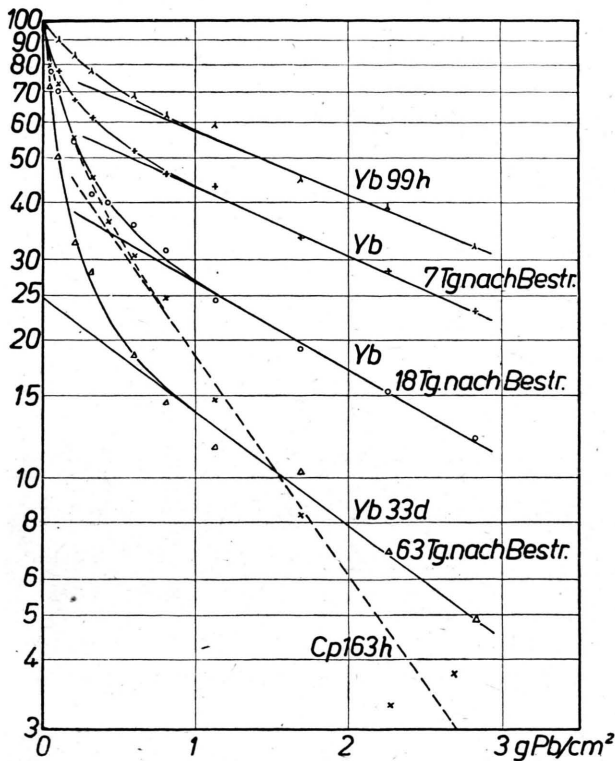


Abb. 6. Absorptionskurven der durchdringenden Strahlungsanteile von Yb und Cp in Pb.

gen Präparate seltener Erden mitbenutzt. Über den Filtern lag stets 1 mm Al, um Übergangseffekte zu vermeiden und die  $\beta$ -Strahlen zu absorbieren. In Abb. 7 sind die Massenabsorptionskoeffizienten in den betreffenden Elementen für die gesamte durchdringende Strahlung des Yb (33 d) aufgetragen. Die eingezeichnete Kurve ist berechnet unter der Annahme, daß die weiche Komponente aus TmK-Strahlung besteht. Bei der Berechnung war zu beachten, daß wegen des kleinen Abstandes des Filters vom Zählrohr ein großer Teil der im Filter erregten K-Strahlung mitgemessen wurde; deshalb wurde der K-Absorptionssprung summarisch nur mit der Hälfte seines Wertes eingesetzt. Die Gd-K-

Kante fällt gerade zwischen die beiden TmK $\alpha$ -Linien, so daß zwei K-Sprünge zwischen Eu-Gd und Gd-Tb zu erwarten sind. Die Übereinstimmung mit den Messungen dürfte ausreichen, um die Deutung der weichen Komponente als TmK-Strahlung sicherzustellen. Hiernach *beruht die 33-d-Aktivität auf K-Einfang*; sie ist nicht mit  $\beta$ -Strahlung verbunden, wie oben gezeigt. *Damit ist die Zuordnung zu Yb<sup>169</sup> eindeutig.*

Die harte Komponente der 33-d-Strahlung erwies sich bei ausgedehnten Messungen (bis 0,7 cm Pb-Absorber) als inhomogen, sie kann dargestellt werden durch zwei Linien von etwa 200 und 400 ekV. H. Maier-Leibnitz konnte auch durch Koinzidenzmessungen nachweisen, daß diese  $\gamma$ -

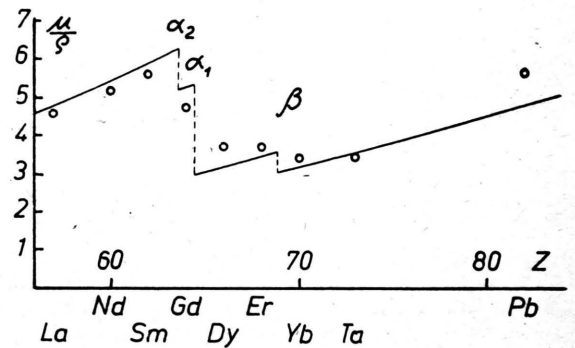


Abb. 7. Absorption der Strahlung des Yb (33 d) in verschiedenen Elementen.

Strahlung mit der K-Strahlung gekoppelt ist, und zwar ist ungefähr jedes  $\gamma$ -Quant gekoppelt, nicht aber jedes K-Quant. Ferner zeigt Abb. 6, daß mehr K-Quanten als  $\gamma$ -Quanten auftreten. Alle diese Tatsachen sind im Einklang mit der Deutung, daß *beim K-Einfang nicht nur der Grundzustand, sondern auch mindestens zwei angeregte Zustände von etwa 200 und 400 ekV des Produktes Tm<sup>169</sup> entstehen können.*

9. Die durchdringenden Strahlungen des Yb (99 h). Aus der zeitlichen Änderung der Pb-Absorptionskurve (Abb. 6) läßt sich nun durch Berücksichtigung des jeweiligen Beitrages der 33-d-Aktivität die Absorptionskurve der reinen 99-h-Aktivität errechnen. Diese ist als oberste Kurve eingetragen; dabei sind schon kleine Korrekturen für den Cp-Gehalt des Präparates angebracht. Man sieht, daß auch diese Strahlung sich aus einer K- und einer  $\gamma$ -Strahlung zusammensetzt. Die  $\gamma$ -Strahlung hat eine Energie von etwa 350 ekV. Die Energie der K-Strahlung konnte leider nicht durch selek-

tive Filterversuche genauer bestimmt werden. Da jedoch das Isotopenbild des Yb keinen weiteren K-Strahler außer  $\text{Yb}^{169}$  (33 d) zuläßt, muß diese K-Strahlung mit dem  $\beta$ -Zerfall des Yb (99 h) zusammenhängen. Die einfachste Deutung ist folgende. *Beim  $\beta$ -Zerfall des Yb (99 h) werden teilweise angeregte Zustände von durchschnittlich etwa 350 ekV gebildet. Die hieraus entstehende  $\gamma$ -Strahlung stellt z. Tl. die harte Komponente dar, z. Tl. erleidet sie innere Umwandlung in der K-Schale, so daß Cp-K-Strahlung entsteht.* Hiermit sind folgende Tatsachen im Einklang. Die K-Strahlung ist vergleichsweise schwach. Die Energiedifferenz der beiden  $\beta$ -Gruppen (500–130 ekV; Ziff. 7) stimmt ungefähr mit der gemessenen  $\gamma$ -Energie überein. Koinzidenzmessungen von H. Maier-Leibnitz zeigten, daß diese  $\gamma$ -Strahlung mit der 130-ekV-Komponente, nicht aber mit der 500-ekV-Kom-

ponente der  $\beta$ -Strahlung gekoppelt ist. Die Aussendung der 500-ekV-Elektronengruppe führt also unmittelbar zum Grundzustand des Endkerns.

10. *Die kurzlebige Yb-Aktivität. Zuordnungen.* Ein kurzer Versuch mit schwacher Bestrahlung ergab eine weitere Yb-Aktivität von  $2,4 \pm 0,2$  h, was mit früheren Angaben<sup>14</sup> in Einklang ist. Die Absorptionskurve läßt auf eine Grenzenergie von schätzungsweise 1,3 eMV schließen. Dagegen konnte für eine von Pool u. Quill (l. c.<sup>14</sup>) angegebene 41-h-Aktivität keine Andeutung gefunden werden.

Es sind somit drei radioaktive Yb-Isotope einzuordnen. Der K-Strahler von 33 d kann nur  $\text{Yb}^{169}$  sein. Für die  $\beta$ -Strahler von 2,4 h und 99 h kommen dann nur die Plätze  $\text{Yb}^{175}$  oder  $\text{Yb}^{177}$  in Betracht.

<sup>14</sup> G. Hevesy u. H. Levi<sup>3</sup>; N. L. Pool u. L. I. Quill, Physic. Rev. **53**, 437 [1938].

## Die Aktivierung der seltenen Erden durch thermische Neutronen II<sup>1</sup>

Von WALTHER BOTHE

Aus dem Institut für Physik am Kaiser-Wilhelm-Institut für medizin. Forschung, Heidelberg

(Z. Naturforschg. **1**, 179–189 [1946]; eingegangen am 14. Dezember 1945)

Entsprechende Untersuchungen, wie früher für Tm, Yb und Cp beschrieben<sup>2</sup>, wurden an folgenden Elementen angestellt: Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er. Die erhaltenen Aktivitäten sind in Tab. 1 verzeichnet. Praktische Intensitätsangaben und rohe Werte der Aktivierungsquerschnitte mit thermischen Neutronen für alle Erden (außer Gd) finden sich am Schluß in Tab. 2.

1. *Scandium und Yttrium.* Diese beiden Elemente mußten in die Untersuchung einbezogen werden, weil sie als Verunreinigungen der seltenen Erden in Betracht kommen. Ein kräftig mit thermischen Neutronen bestrahltes Präparat von  $\text{Y}_2\text{O}_3$  („rein bis auf 0,2% Ho + Er“, wozu noch 0,05% Dy gefunden wurde) zeigte einheitlichen Abfall bis zu einigen  $10^{-5}$  der Anfangsaktivität. Als Halbwertszeit des  $\text{Y}^{90}$  ergab sich  $T = 61 \pm 1$  h, in Übereinstimmung mit dem von D. W. Stewart, J. L. Lawson und J. M. Cork<sup>3</sup> angegebenen Wert ( $60,5 \pm 2$  h). Die Absorptionskurve der Elektronen zeigt Abb. 1. Die  $\beta$ -Grenze liegt nach anderwei-

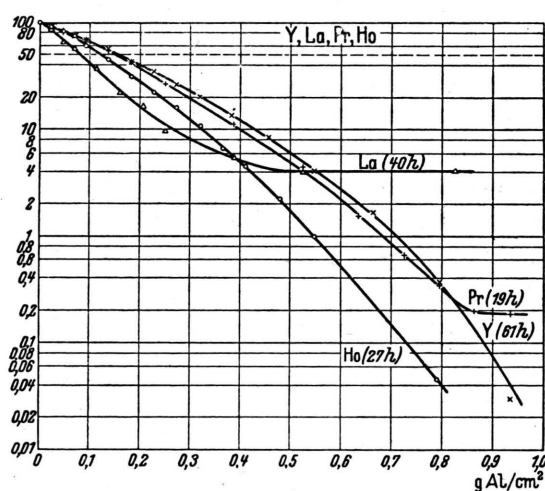


Abb. 1. Absorptionskurven der Y-, La-, Pr- und Ho-Strahlungen in Aluminium.

<sup>1</sup> Dieser II. Teil wurde (in etwas ausführlicherer Fassung) im September 1944 der Z. Physik eingereicht, kam aber bisher nicht zur Veröffentlichung.

<sup>2</sup> Diese Z. 173–179 (im folgenden als I angeführt).

<sup>3</sup> Physic. Rev. **52**, 901 [1937].