

Über einige Strontium- und Yttriumisotope bei der Uranspaltung

Von GÜNTER HERRMANN * und FRITZ STRASSMANN

Aus dem Anorganisch-Chemischen Institut der Universität Mainz
(Z. Naturforsch. 11 a, 946—954 [1956]; eingegangen am 9. September 1956)

Die Suche nach einem $6 - 10 \text{ d Sr} \rightarrow > 100 \text{ d Y}$ bei der Uranspaltung war ohne Erfolg, die Ausbeute dieser vermuteten Spaltkette ist $< 3 \cdot 10^{-5}\%$. Die früher beobachtete schwache Nachbildung beim Zerfall des $50,5 \text{ d } ^{89}\text{Sr}$ konnte nicht bestätigt werden. Im ^{89}Sr wurde mit $\sim 0,01\%$ Anteil am Zerfall eine γ -Strahlung nachgewiesen, die von einem Übergang $^{89}\text{Sr} \rightarrow 13 \text{ sec } ^{89m}\text{Y}$ herrührt. Nach einer schnellen chemischen Trennung von Yttrium aus Strontium wurde das ^{89m}Y durch seine Halbwertszeit und γ -Energie ($0,95 \pm 0,05 \text{ MeV}$) identifiziert. Für das ^{92}Sr wurde eine Halbwertszeit von $2,60 \pm 0,04 \text{ h}$ und durch Absorptionsmessungen β -Strahlen von $0,55 \pm 0,05$ (β_1 , 90%) und $1,5 \pm 0,1 \text{ MeV}$ (β_2 , 10%) und γ -Strahlen von etwa $1,5 \text{ MeV}$ Energie gemessen. Da von anderer Seite γ -Strahlen von $1,38$ (γ_1) und $0,44 \text{ MeV}$ (γ_2) mit einer relativen Häufigkeit von etwa $10 : 1$ beobachtet wurden, ist anzunehmen, daß der Zerfall zu 90% über $\beta_1 - \gamma_1$ und zu 10% über $\beta_2 - \gamma_2$ erfolgt. Die Zerfallsenergie des ^{92}Sr beträgt demnach $1,9 \pm 0,1 \text{ MeV}$. Für die $1,2 \text{ MeV } \gamma$ -Strahlung im Yttrium aus der Spaltung wurde die Zuordnung zum ^{91}Y bestätigt, ihr Anteil am Zerfall des ^{91}Y beträgt $0,4 \pm 0,2\%$. Die relativen Spaltausbeuten von ^{89}Sr , ^{90}Sr und ^{91}Sr bei der Spaltung von natürlichem Uran mit langsamem Neutronen wurden bestimmt und mit einer Ausbeute von 5,77% für ^{90}Sr daraus absolute Ausbeuten von $4,50 \pm 0,16\%$ für ^{89}Sr und $5,2 \pm 0,4\%$ für ^{91}Sr berechnet. Die Halbwertszeiten von ^{90}Y , ^{91}Y , ^{85}Sr und ^{87m}Sr wurden zu $64,8 \pm 0,2 \text{ h}$, $58,3 \pm 0,8 \text{ d}$, $65,0 \pm 0,7 \text{ d}$ und $2,90 \pm 0,08 \text{ h}$ bestimmt.

In einer früheren Mitteilung¹ hatten wir über die Suche nach einer $6 - 10 \text{ d} \rightarrow > 100 \text{ d Y}$ -Spaltkette berichtet. Hinweise auf diese Spaltkette waren bei der Verarbeitung von relativ stark und lange mit langsamem Neutronen bestrahltem Uran auf folgende Weise erhalten worden²: Nach dem Zerfall des $10 \text{ h } ^{91}\text{Sr}$ war die Strontiumfraktion nochmals gereinigt worden und dadurch zugleich das $58 \text{ d } ^{91}\text{Y}$ entfernt worden. Nach einigen Wochen wurde aus diesem Strontium das nachgebildete Yttrium abgetrennt, es enthielt neben dem $65 \text{ h } ^{90}\text{Y}$ aus $28 \text{ a } ^{90}\text{Sr}$ eine weitere Aktivität, die mit etwa 160 d Halbwertszeit und mit einer β -Strahlung von etwa $2,2 \text{ MeV}$ zerfiel. Spätere Yttriumfällungen aus denselben Strontiumpräparaten enthielten diese langlebige Aktivität nicht, so daß die Halbwertszeit ihrer Muttersubstanz auf $6 - 10 \text{ d}$ geschätzt werden konnte. Chemische Versuche stützten die Zuordnung der 160 d -Aktivität zum Yttrium. Die Überprüfung der Beobachtungen nach demselben Verfahren¹ war jedoch ohne Erfolg und ergab eine Spaltausbeute von $< 0,02\%$ für diese Kette, während für Strontium- und Yttriumisotope Ausbeuten von $4 - 6\%$ zu erwarten sind³. Nun ist es nicht ausgeschlossen,

dass diese Kette bei den früheren Versuchen ebenfalls nur mit einer Ausbeute dieser Größenordnung entstanden war, wenn auch eine genaue Auswertung der Versuche in dieser Hinsicht nicht möglich ist. Es schien uns daher notwendig, die Suche nach dem $6 - 10 \text{ d } \text{Sr} \rightarrow 160 \text{ d Y}$ mit stärkeren und sorgfältiger gereinigten Präparaten fortzusetzen. Neben den Ergebnissen dieser Versuche sollen nachstehend noch einige Beobachtungen an anderen Strontium- und Yttriumisotopen mitgeteilt werden.

Methodik

Die Bestrahlungen erfolgten zum Teil mit verlangsamten Be-D-Neutronen des Mainzer 1,2 MV Kaskadenbeschleunigers, zum Teil unter verschiedenen Bedingungen im Reaktor in Harwell. Die Messungen von β -Strahlen wurden mit Glockenzählrohren mit $1,5$ bis $2,0 \text{ mg/cm}^2$ dicken Glimmerfenstern durchgeführt. Zur Energiebestimmung von β -Strahlen wurden Absorptionskurven in Aluminium aufgenommen und nach BLEULER und ZÜNTER⁴ ausgewertet. Absolute β -Aktivitäten wurden in einer Anordnung mit bekanntem Geometriefaktor bestimmt und um die Absorption der β -Strahlen im Zählrohrfenster und in der Luftsicht zwischen Präparat und Zählrohr, um die Selbstabsorp-

* Dissertation Universität Mainz 1956.

¹ G. HERRMANN u. F. STRASSMANN, Z. Naturforsch. 10 a, 146 [1955].

² F. STRASSMANN, unveröffentlichte Arbeiten; vgl. W. SEELMANN-EGGEBERT u. F. STRASSMANN, Z. Naturforsch. 2 a, 80 [1947].

³ E. P. STEINBERG u. L. E. GLENDENIN, Proc. Intern. Conf. Peaceful Uses Atom. Energy, Genf 1955, Bd. 7, S. 3 ff.

⁴ E. BLEULER u. W. ZÜNTER, Helv. Phys. Acta 19, 375 [1946].



tion im Präparat und die Rückstreuung vom Präparaträger⁵ korrigiert. Zur Messung von γ -Strahlen stand für einen Teil der Versuche ein Szintillationspektrometer mit einem NaJ(Tl)-Kristall von 2,5 cm Dicke und 5 cm Durchmesser und einem Einkanal-Impuls-höhenanalysator zur Verfügung. Da die Hochspannungsversorgung des Photomultipliers noch nicht genügend stabilisiert war, waren bei diesen Messungen teilweise relativ große Schwankungen zu beobachten. Zur Bestimmung der absoluten Aktivität einzelner Linien eines γ -Spektrums wurde die Fläche unter dem charakteristischen Maximum der Linie im Spektrum ermittelt. Aus einer unter gleichen Bedingungen erhaltenen Eichkurve wurde entnommen, welcher Bruchteil einer γ -Strahlung dieser Energie im charakteristischen Maximum gemessen wird. Für diese Eichkurve wurde das γ -Spektrum eines ^{140}Ba — ^{140}La -Präparates aufgenommen, dessen absolute Aktivität durch β -Messung bekannt war, während die Anteile der sechs stärksten γ -Linien am Zerfall Literaturangaben^{6,7} entnommen wurden⁸. Dieses Verfahren ist zweifellos weniger genau als die Eichung mit verschiedenen γ -Strahlern, die nur eine γ -Strahlung aussenden, es reicht aber für unsere Zwecke aus.

Die Isolierung und Reinigung der Strontiumisotope aus bestrahlten Uranverbindungen wurde bereits beschrieben¹, ebenso die zur Messung von Zerfallskurven der Strontiumisotope teilweise benutzte Methode mit laufender Entfernung der Tochtersubstanzen. Bei diesem Verfahren wird für jeden Meßpunkt der Zerfallskurve ein neues Strontiumpräparat hergestellt, das kurz vor der Messung von den nachgebildeten Yttrium-isotopen befreit wird. Störungen der Zerfallsmessungen durch Nachbildungseffekte werden dadurch vermieden. Die für die Suche nach dem 160 d Y verwendeten Yttriumpräparate wurden aus Strontium durch Fällung an Fe(OH)₃ mit karbonatfreiem Ammoniak abgetrennt und durch mehrfache Umfällung neben inaktivem Sr²⁺ gereinigt (Methode A). Dieses Verfahren hat den Nachteil, daß alle im Strontium noch vorhandenen, mit Ammoniak fällbaren Verunreinigungen nicht vom Yttrium abgetrennt werden. Deshalb wurde ein zweites Verfahren benutzt (Methode B). Die Reinigung des Ytriums vom Strontium erfolgt durch zwei Fe(OH)₃-Fällungen und dreimalige kathodische Abscheidung des Ytriums aus schwach saurer wäßriger Lösung⁹. Anschließend wurde aus der salzauren Lösung des Ytriums eine Schwefelwasserstofffällung mit Cu²⁺ als Träger durchgeführt. Das Yttrium wurde dann auf eine Kationenaustauschersäule (Dowex 50 in der Ammoniumform, 20 cm lang, 4 mm Durchmesser) gegeben und bei 90° mit Ammoniumlactatlösung von pH 3,0 bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 10—12 ml/h eluiert¹⁰. Um

den Durchbruch des Ytriums durch die Säule zu verzögern, wurde die Konzentration der Ammoniumlactatlösung bei konstantem pH-Wert in 10 ml Anteilen von 0,60, 0,65, 0,70... bis auf 1,0 mol/l gesteigert. Der Durchbruch des Ytriums erfolgt bei diesem Verfahren erst nach dem Durchfluß von 50 ml, so daß eine gute Reinigung von leicht eluierbaren Verunreinigungen erwartet werden kann. Die durch das 65 h ^{80}Y markierte Yttriumfraktion wurde in drei Teile geteilt, den Vorlauf mit 40%, die Mittelfraktion mit 50% und den Nachlauf mit 10% der Gesamtmenge, und jede Fraktion durch CuS-Fällung aus saurer Lösung, durch Fe(OH)₃-Fällung neben Ba²⁺, Sr²⁺, Rb⁺ und Cs⁺ und durch YF₃-Fällung neben (ZrO)²⁺ nochmals gereinigt.

Suche nach dem 160 d Yttrium

In Tab. 1 sind diejenigen der Versuche zum Nachweis des 160 d Y zusammengestellt, bei denen die stärksten Strontiumpräparate verarbeitet wurden. Neben den Versuchsbedingungen (Spalten 2—7) sind die Eigenschaften der im Yttrium aus Strontium aufgefundenen Aktivitäten (Spalten 8—10) aufgeführt. Nur in zwei Fällen (Versuche 2 und 4a) wurde eine Halbwertszeit von 160 d beobachtet, bei allen anderen Präparaten wurde die maximal mögliche Aktivität eines 160 d Ytriums aus den Zerfallskurven abgeschätzt (Spalte 11). Um einen Anhalt über die Spaltausbeute der gesuchten Spaltkette zu erhalten, wurde aus der Aktivität der 160 d-Komponente die der 6—10 d Muttersubstanz berechnet und mit der Aktivität des 50,5 d ^{89}Sr (Spalte 12) verglichen, dessen Ausbeute 4,5% beträgt (vgl. Tab. 7). Tab. 1 zeigt, daß die Eigenschaften der im Yttrium aus Strontium beobachteten Aktivitäten (Spalten 8 und 9) ebenso wie die Spaltausbeuten (Spalte 13) sehr verschieden waren. Die 160 d Aktivität der Versuche 2 und 4a kann nicht das gesuchte Yttrium sein, denn die für diese Versuche errechnete Spaltausbeute wird bei den Präparaten 4b und 4c noch um eine Größenordnung unterschritten. Zudem stammen diese beiden Präparate aus demselben Versuch wie das Präparat 4a. Die im Yttrium aus Strontium beobachteten Aktivitäten müssen als Verunreinigungen angesehen werden, die

⁵ L. YAFFE u. K. M. JUSTUS, J. Chem. Soc. **1949**, Suppl., 341. — B. P. BURTT, Nucleonics **5**, No. 2, 28 [1949].

⁶ J. M. HOLLANDER, I. PERLMAN u. G. T. SEABORG, Rev. Mod. Phys. **25**, 469 [1953].

⁷ Nuclear Data, Circular of the National Bureau of Standards No. 499, mit Supplementen, Washington 1950/51. Fortgesetzt in New Nuclear Data, laufende Zusammenstellungen in Nucl. Sci. Abstr. und in Nuclear Data Cards.

⁸ Näheres in der Dissertation von G. HERRMANN, Mainz 1956.

⁹ G. LANGE, Diplomarbeit Mainz 1956.

¹⁰ S. W. MAYER u. E. C. FREILING, J. Amer. Chem. Soc. **75**, 5647 [1953]. — E. C. FREILING u. L. R. BUNNEY, J. Amer. Chem. Soc. **76**, 1021 [1954]. — J. G. CUNNINGHAM, M. L. SIZELAND, H. H. WILLIS, J. EAKINS u. E. R. MERCER, J. Inorg. Nucl. Chem. **1**, 163 [1955].

Vers.	Darstellung							Beobachtete Aktivität				I_{160}	I_{50}	$A (\%)$
	Bestr.		t_B	t_R	t_T	Verf.	T	E_β		I_x				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	U	thN	3d	7d	210d	A	60d			6	< 5	$3 \cdot 10^5$	$< 0,05$	
2	U	1N	3d	9d	200d	A	160d			35	35	$4 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{-4}$	
3	U	1N	7d	9d	110d	A	>1a	0,07 (70); 0,3 (15); 0,8 (10); 1,8 (5)	700	<60*	$1 \cdot 10^8$	$< 3 \cdot 10^{-4}$		
4a ⁺	U	1N	7d	12d	70d	B	160d	0,15 (40); 2,4 (60)	160	100	$1 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{-4}$		
b							90d	0,15 (40); 1,7 (60)	110	<30*		$< 3 \cdot 10^{-5}$		
c								~1a	0,15 (80); 1,5 (5); 2,2 (15)	90	<30*		$< 5 \cdot 10^{-5}$	
5	U	s N	7d	17d	80d	A	~1a	0,08 (80); 0,5 (10); 1,4 (10)	150	<12*	$1 \cdot 10^7$	$< 1 \cdot 10^{-3}$		
6	Th	s N	7d	17d	80d	A	50d		20	< 6	$1 \cdot 10^6$	$< 5 \cdot 10^{-3}$		

* durch 0,1 mm Aluminium gemessen.

+ a Vorlauf (40%), b Hauptfraktion (50%), c Nachlauf (10% des Yttriums).

Spalte 1 Versuchsnummer,

7 Reinigungsverfahren,

2 Bestrahltes Element,

8 T Halbwertszeit,

3 Neutronenergie (th thermische, 1 verlangsamte, s unverlangsamte [Präparat in Cd] Neutronen eines Reaktors),

9 E_β Energie (in MeV) und Häufigkeit (in Klammern, in %) der β -Strahlen,

4 t_B Bestrahlungszeit,

10 I_x Intensität zur Zeit $t_R + t_T$ (Impulse/min),

5 t_R Zeitpunkt der letzten Yttriumabtrennung bei der Reinigung (nach Bestrahlungsende),

11 I_{160} Intensität des 160 d Y. zur Zeit $t_R + t_T$ (Impulse/min),

6 t_T Dauer der Nachbildung des Yttriums im Strontium,

12 I_{50} Intensität des 50 d ^{89}Sr bei Bestrahlungsende (Impulse/min),

13 A, Spaltausbeute einer 6–10 d Sr → 160 d Y-Spaltkette, in %,

Tab. 1. Versuche zum Nachweis einer 6–10 d Sr → 160 d Y-Spaltkette durch Isolierung von Yttrium aus der Strontiumfraktion bei der Spaltung.

Autoren	Strahlungen (MeV)				Verzweigungsverhältnis γ/β (in %)		Halbwertszeit (d)		Koinzidenzen	
	β_1	β_2	γ_1	γ_2	γ_1	γ_2	β	γ	positiv	negativ
BOLEY ¹¹	1,54	neg	1,16	neg	5 ± 1*	<0,1	61	160		(γ_1) (γ_2 , β)
LANGER ¹²	1,54		1,22	0,2			61	61		
BUNKER ¹³	0,33		1,22	neg	0,3 ± 0,05	<0,015		58,5	(γ_1) (β_2)	
KAHN ¹⁴	0,36		1,19	neg	0,22 ± 0,01	<0,01+	57,5	58,0	(γ_1) (β_2)	(γ_1) (γ)
Diese Arb. Y aus U			1,2 ± 0,1	neg	0,4 ± 0,2	<0,1				(γ_1) (γ)
Y aus Sr			1,2 ± 0,1	neg	0,4 ± 0,2	<0,1	58,3	50 ± 10		
							60 ± 10			

neg ausdrücklich als negativ hervorgehoben;

* bei Bestrahlungsende ~ 0,7%;

+ für $0,1 < E_\gamma < 2,0$ MeV.

Tab. 2. Untersuchungen über die γ -Strahlung des ^{91}Y .

Deutung der beobachteten Zerfalls- und Absorptionskurven durch bestimmte Spaltprodukte ist zumindest teilweise möglich⁸. Aus den Versuchen folgt, daß eine 6–10 d Sr → 160 d Y-Kette bei der Spaltung nicht gebildet wird, ihre Spaltausbeute ist $< 3 \cdot 10^{-5}\%$. Man wird die früheren Beobachtungen ebenfalls durch Verunreinigungen erklären müssen, obwohl eine restlos befriedigende Deutung dadurch nicht möglich ist⁸.

warten, da das 50,5 d ^{89}Sr den Nachweis geringer Intensitäten dieses Strahlers unmöglich macht. Bei Messungen der β -Strahlen dünner Strontiumpräparate wurden keine Hinweise auf diesen Strahler erhalten. Durch Vergleich mit der Intensität des ^{89}Sr kann eine Spaltausbeute von $< 0,1\%$ abgeschätzt werden. Etwas günstiger liegen die Verhältnisse, wenn für das gesuchte Strontium eine starke γ -Strahlung angenommen wird. Für diesen Fall kann eine Spaltausbeute von $< 0,02\%$ angegeben werden.

Bei einigen Versuchen mit Strontium aus Uran, das mit langsamem Neutronen bestrahlt worden war, waren Abweichungen von einem rein exponentiellen Zerfall des ^{89}Sr beobachtet worden¹, die vorläufig

Suche nach dem 6—10 d Strontium

Für die Suche nach dem 6–10 d Strontium war eine wesentlich ungünstigere Nachweisgrenze zu er-

durch eine Isomerie ~ 15 d $^{89m}\text{Sr} \rightarrow 50$ d ^{89}Sr ge deutet worden waren. Die Beobachtungen schienen reproduzierbar zu sein und stützten sich auf fünf – allerdings relativ schwache – Präparate aus Mainz und ein Präparat, das in Harwell bestrahlt worden war. Inzwischen haben wir weitere elf Präparate aus Bestrahlungen von Uran mit verlangsamten Be-D-Neutronen und thermischen, verlangsamten und unverlangsamten Neutronen im Reaktor gemessen, ohne die früheren Beobachtungen bestätigen zu können. Die Bestrahlungszeit wurde zwischen 10 Minuten und 7 Tagen, der Zeitraum bis zur Verarbeitung auf Strontium zwischen 5 Minuten und 12 Tagen nach Bestrahlungsende variiert. 9 Versuche ergaben eindeutig einen rein exponentiellen Abfall des 50 d ^{89}Sr ohne jede Abweichung, die Präparate der beiden restlichen Versuche waren wegen einer sehr kurzen Bestrahlungszeit verhältnismäßig schwach und zeigten daher zu große statistische Schwankungen bei den Messungen. Ebenso ohne positives Ergebnis waren Versuche, mit dem Szintillationsspektrometer in den Strontiumpräparaten einen γ -Strahler von etwa 15 d Halbwertszeit nachzuweisen, den die vorgeschlagene Deutung erfordert hätte. Wir müssen folgern, daß unsere Beobachtungen über die Abweichungen vom rein exponentiellen Zerfall beim ^{89}Sr falsch waren.

Die γ -Strahlung des 58 d ^{91}Y

In der früheren Mitteilung haben wir auf die Beobachtung eines 160 d γ -Strahlers im Yttrium aus Uran durch BOLEY und DUNAVAN¹¹ hingewiesen, die im Zusammenhang mit unserer Suche nach einem 160 d Yttrium interessant schien. Andere Autoren^{12, 13, 14} haben jedoch wahrscheinlich gemacht, daß diese γ -Strahlung dem 58 d ^{91}Y zugeordnet werden muß. Wir sind zu dem gleichen Ergebnis gekommen. Die verschiedenen Untersuchungen sind in Tab. 2 zusammengestellt. Verwendet wurden Yttriumpräparate, die aus der Strontiumfraktion wie aus Uran direkt isoliert worden waren. Die Abtrennung von Yttrium aus Uran erfolgte nach BALLOU¹⁵, die Trennung des Yttriums von den Elementen der Seltenen Erden wurde mit der oben beschriebenen Methode durchgeführt. Die Versuche lassen zugleich eine Abschätzung der Spaltausbeute der 6–10 d Sr \rightarrow 160 d Y-Spaltkette für den Fall zu, daß das 160 d Y ein starker γ -Strahler ist.

¹¹ F. I. BOLEY u. D. S. DUNAVAN, Phys. Rev. **90**, 158 [1953].

¹² L. M. LANGER u. H. C. PRICE, Phys. Rev. **76**, 641 [1949].

¹³ M. E. BUNKER, J. P. MIZE u. J. W. STARNER, Phys. Rev. **94**, 1694 [1954].

¹⁴ B. KAHN u. W. S. LYON, Phys. Rev. **98**, 58 [1955].

¹⁵ N. E. BALLOU, in ¹⁶, S. 1673 ff.

Man findet⁸ für das über Strontium aus Uran isolierte Präparat $< 5 \cdot 10^{-3}$ bzw. $< 5 \cdot 10^{-4}$ % Ausbeute, für das direkt aus Uran isolierte Yttrium dagegen $< 0,4$ bzw. $< 0,04$ % Ausbeute für einen γ -Strahler von $< 0,5$ bzw. $> 0,5$ MeV.

Die γ -Strahlung des 50,5 d ^{89}Sr

Bei der Suche nach γ -Strahlern in der Strontiumfraktion bei der Spaltung wurde eine schwache γ -Strahlung von 0,95 MeV Energie und etwa 50 d Halbwertszeit beobachtet. Diese Energie entspricht genau der des 13 sec ^{89m}Y , das GOLDHABER und Mitarbeiter¹⁷ aus ^{89}Zr und durch $^{89}\text{Y}(n, n')$ erstmals dargestellt haben. Es lag nahe, einen Übergang $^{89}\text{Sr} \rightarrow 89m\text{Y}$ zu vermuten. Der Anteil dieser γ -Strahlung am Zerfall des ^{89}Sr wurde zu $\sim 0,01\%$ be-

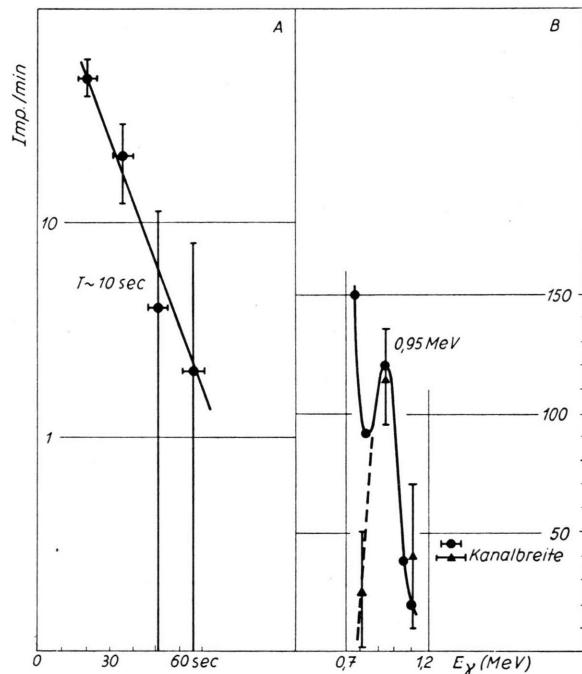


Abb. 1. Nachweis des Übergangs 50,5 d $^{89}\text{Sr} \rightarrow$ 13 sec ^{89m}Y .
A) Zerfallskurve der aus ^{89}Sr durch $\text{Fe}(\text{OH})_3$ -Fällung abgetrennten Aktivität im Kanal 0,88–1,02 MeV des NaJ-Szintillationsspektrometers.
B) ●●● γ -Spektrum des ^{89}Sr , ▲▲▲ γ -Spektrum der aus Strontium abgetrennten kurzlebigen Aktivität.
Für ^{89m}Y ist eine Halbwertszeit von 13–14 sec und eine γ -Strahlung von 0,92 MeV zu erwarten¹⁷.

¹⁶ C. D. CORYELL u. N. SUGARMAN (Herausg.), Radiochemical Studies: The Fission Products. New York 1951.

¹⁷ M. GOLDHABER, E. DER MATEOSIAN, G. SCHARFF-GOLDHABER, A. W. SUNYAR, M. DEUTSCH u. N. S. WALL, Phys. Rev. **83**, 661 [1951].

stimmt. LYON und RICKARD¹⁸ haben diese γ -Strahlung ebenfalls beobachtet und in derselben Weise gedeutet. Sie bestimmten ihren Anteil am Zerfall des ^{89}Sr zu 0,02%. Um die Deutung als ^{89m}Y zu beweisen, haben wir den Zerfall des 0,95 MeV γ -Strahlers mit dem Szintillationsspektrometer nach einer schnellen Abtrennung von Yttrium aus Strontium durch $\text{Fe}(\text{OH})_3$ -Fällung verfolgt. Abb. 1 A zeigt eine Zerfallskurve, Abb. 1 B das γ -Spektrum der abgetrennten kurzlebigen Aktivität. Es handelt sich zweifellos um 13 sec ^{89}Y *.

Die Eigenschaften des 2,6 h ^{92}Sr

Die Untersuchung des ^{92}Sr macht einige Schwierigkeiten, da es sich um einen β -Strahler mit verhältnismäßig weicher Strahlung handelt, der das 3,6 h ^{92}Y mit einer 3,5 MeV β -Strahlung nachbildet. Diese Nachbildung stört vor allem bei Absorptionsmessungen sehr, der Zerfall des ^{92}Sr wird mehr oder weniger stark von der Nachbildung verdeckt. Diese Schwierigkeiten mögen der Grund dafür sein, daß eine genauere Untersuchung der Eigenschaften des ^{92}Sr bisher nicht erfolgt ist. GÖTTE¹⁹, der diesen Strahler und sein Folgeprodukt als erster nachgewiesen hat, hat die Halbwertszeit des ^{92}Sr indirekt aus der Aktivität des ^{92}Y in mehreren aus einem Strontiumpräparat abgetrennten Yttriumfällungen zu 2,7 h bestimmt. Später wurde eine direkte Messung der Halbwertszeit mit laufender Entfernung der Tochtersubstanz vorgenommen, die ebenfalls 2,7 h ergab²⁰. Die Strahlung dieses Isotops scheint bisher nur von BUNKER, AMES und STARNER^{21, 22} in einer orientierenden Messung untersucht worden zu sein. Sie fanden mit einem β -Spektrometer β -Strahlen von 0,55 MeV und Anzeichen für eine energiereichere Komponente sowie γ -Strahlen von 1,38 und 0,44 MeV mit einer relativen Intensität von etwa 10 : 1. Die Zuordnung des 2,7 h Sr zur Massenzahl 92 beruht auf der Zuordnung des Folgeprodukts ^{92}Y . Dessen Zuordnung ist durch seine Reich-

weite in Luft bei der Spaltung von Plutonium mit langsamem Neutronen²³ und durch Bestimmung der relativen Intensität der verschiedenen Yttriumisotope bei der Reaktion $\text{Zr}(\text{d}, \alpha)$ ²⁴ vorgenommen worden.

Wir verwendeten für unsere Untersuchung das an anderer Stelle¹ näher beschriebene Verfahren mit laufender Entfernung der Tochtersubstanzen, um die Zerfallscurven des ^{92}Sr zu messen. Aus den Zerfallscurven mit verschiedenen Aluminium- oder Blei-Absorbern wurden die Absorptionscurven der β - und γ -Strahlen erhalten. Die Messungen der Halbwertszeit sind in Tab. 3 zusammengestellt, einige

Ver- such	Anzahl der Kurven	Absorber- dicken	Halbwerts- zeit (h)	statist. Gewicht*
1	4	0; 0,2; 2,0 mm Al	$2,84 \pm 0,22$	1
2	9	1,5–8,0 mm Al	$2,73 \pm 0,10$	5
3	7	0–15 mm Pb	$2,79 \pm 0,19$	1,5
4	12	0–2,0 mm Al	$2,77 \pm 0,17$	2
5	9	0–0,3 mm Al	$2,74 \pm 0,18$	1,5
6	9	0–0,5 mm Al	$2,45 \pm 0,07$	10
7	5	0–0,1 mm Al	$2,57 \pm 0,07$	10
		Mittel	$2,60 \pm 0,04$ h	

* proportional $1/\sigma^2$ (σ Standardabweichung).

Tab. 3. Bestimmung der Halbwertszeit des ^{92}Sr .

Zerfallscurven sind in Abb. 2 wiedergegeben. Im Mittel wurde eine Halbwertszeit von $2,60 \pm 0,04$ h beobachtet. Bei den Absorptionsmessungen der β -Strahlen (Abb. 3 A) war eine geringe Nachbildung von ^{92}Y nicht zu vermeiden. Die Energie der härtesten Komponente (I) beträgt 4,0 MeV, es handelt sich zweifellos um ^{92}Y . Beim Abzug dieser Komponente von der Absorptionskurve muß die Nachbildung berücksichtigt werden. Die Energie der zweiten, ebenfalls relativ schwachen Komponente (II) ergibt sich zu $1,5 \pm 0,1$ MeV. Diese Strahlung ist dem ^{92}Sr zuzuordnen. Zwar besitzt ^{92}Y eine β -Strahlung ähnlicher Energie²⁶, ihr Anteil an der β -Strahlung des ^{92}Y beträgt jedoch nur 11%²². Nach Abzug der γ -Strahlung und der Komponenten I und II

¹⁸ W. S. LYON u. R. R. RICKARD, Phys. Rev. **100**, 112 [1955].

* Zusatz b. d. Korr.: Inzwischen erfuhren wir von einer Untersuchung von A. BISI, S. TERRANI u. L. ZAPPA (Nuovo Cim. **2**, 1297 [1955]), die mit einem Einkristall-Szintillationsspektrometer in ^{89}Sr aus ^{88}Sr (n, γ) nach dieser γ -Strahlung suchten und sie nicht beobachten konnten. Sie geben $\gamma/\beta < 5 \cdot 10^{-4}$ % an.

¹⁹ H. GÖTTE, Naturwiss. **29**, 496 [1941].

²⁰ O. HAHN u. F. STRASSMANN, Z. Phys. **121**, 729 [1943].

²¹ M. E. BUNKER, D. P. AMES u. J. W. STARNER, unveröffentlicht (Juni 1954), nach R. W. KING, Rev. Mod. Phys. **26**, 327 [1954].

²² Ergänzende Angaben verdanken wir einer freundlichen brieflichen Mitteilung von M. E. BUNKER.

²³ S. KATCOFF, J. A. MISKEL u. C. W. STANLEY, Phys. Rev. **74**, 631 [1948].

²⁴ G. L. SCHOTT u. W. W. MEINKE, Phys. Rev. **89**, 1156 [1953].

²⁵ E. J. HOAGLAND u. S. KATCOFF, nach ¹⁶, S. 660 ff.

²⁶ D. P. AMES, M. E. BUNKER u. J. W. STARNER, WASH-75 (Januar 1952), nach ⁶.

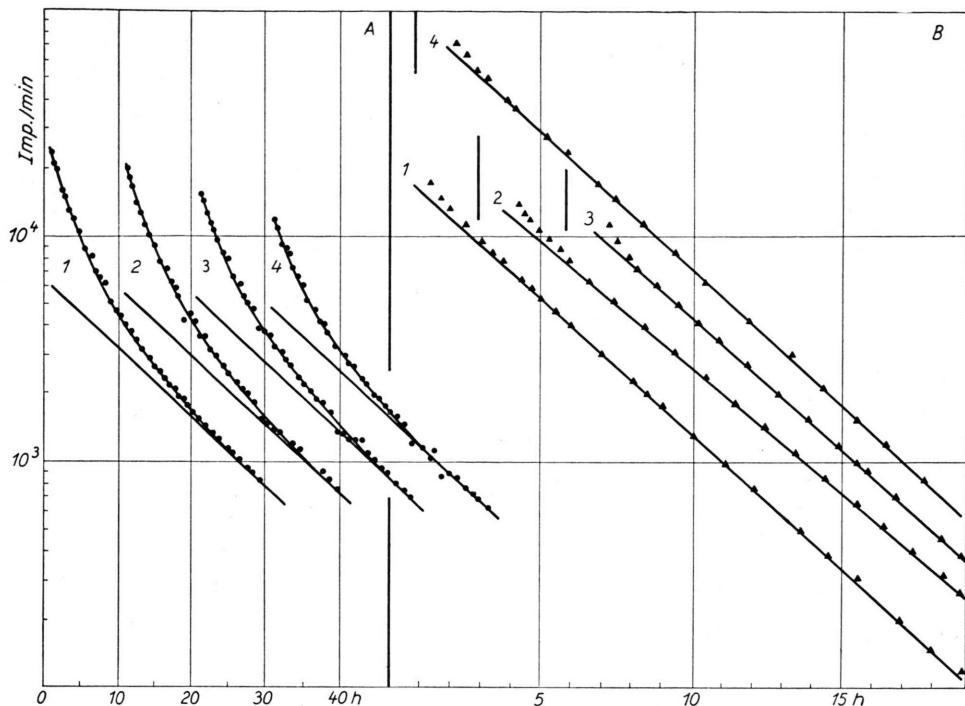


Abb. 2. Bestimmung der Halbwertszeit des ^{92}Sr . A) Zerfallskurven nach Abzug des 50,5 d ^{89}Sr . B) Anfangsteil der Kurven nach Abzug des 9,7 h ^{91}Sr . Es ergeben sich folgende Halbwertszeiten: Kurve 1 (ohne Aluminiumabsorber) 2,52 h, Kurve 2 (0,02 mm Al) 2,65 h, Kurve 3 (0,05 mm Al) 2,58 h, Kurve 4 (0,10 mm Al, Intensität mit 10 multipliziert) 2,49 h.

erhält man die Absorptionskurve der Abb. 3 B. Durch Vergleich mit der Absorptionskurve des ^{90}Sr kann die Energie dieser Komponente zu $0,55 \pm 0,05$ MeV bestimmt werden. Die Energie der γ -Strahlung beträgt nach Absorptionsmessungen in Blei (Abb. 3 C) etwa 1,5 MeV. Nach der Absorptionskurve sind die Intensitäten beider β -Strahlungen 90% für die 0,55 MeV- und 10% für die 1,5 MeV-Komponente. Daraus und aus den relativen Intensitäten der von BUNKER, AMES und STARNER beobachteten γ -Strahlen wird man folgern können, daß auf die 0,55 MeV β -Strahlung die 1,38 MeV γ -Strahlung und auf die 1,5 MeV β -Strahlung die 0,44 MeV γ -Strahlung folgt. Beide Zerfallswege ergeben eine Zerfallsenergie von $1,9 \pm 0,1$ MeV. Diese Zerfallsenergie stimmt gut überein mit der aus der Systematik der β -Strahler abgeschätzten von 2,0 MeV¹. Allerdings waren bei dieser Abschätzung alle für die gg-Kerne des Strontiums errechneten Werte um +0,7 MeV korrigiert worden. Die Korrektur stützte sich lediglich auf den Unterschied zwischen berechneter und beobachteter Energie beim ^{90}Sr . Sie entfällt bei der empirischen

Gleichung zur Massenberechnung von LEVY²⁷, nach der eine Zerfallsenergie von 1,7 MeV berechnet wird.

Die relativen Spaltausbeuten von ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{91}Sr und ^{92}Sr

Die Spaltausbeute eines Spaltprodukts, d. h. die Angabe, welcher Bruchteil aller Spaltungen zu diesem Produkt führt, kann aus der Sättigungsaktivität des Spaltprodukts erhalten werden, wenn unter den gleichen Bedingungen bei Bestrahlung und Messung die Sättigungsaktivität eines zweiten Spaltprodukts bestimmt wird, dessen Spaltausbeute bekannt ist. In dieser Untersuchung wurden auf diese Weise die Ausbeuten von ^{89}Sr , ^{91}Sr und ^{92}Sr bei der Spaltung von natürlichem Uran mit langsamem Neutronen bestimmt, ^{90}Sr diente als Ausbeutestandard.

Dazu wurden Zerfallskurven ausgewertet, in denen jeweils zwei der Isotope gemessen worden waren. Die Zerfallskurven wurden graphisch auf den Zeitpunkt der

²⁷ H. B. LEVY, UCRL-4588 (November 1955).

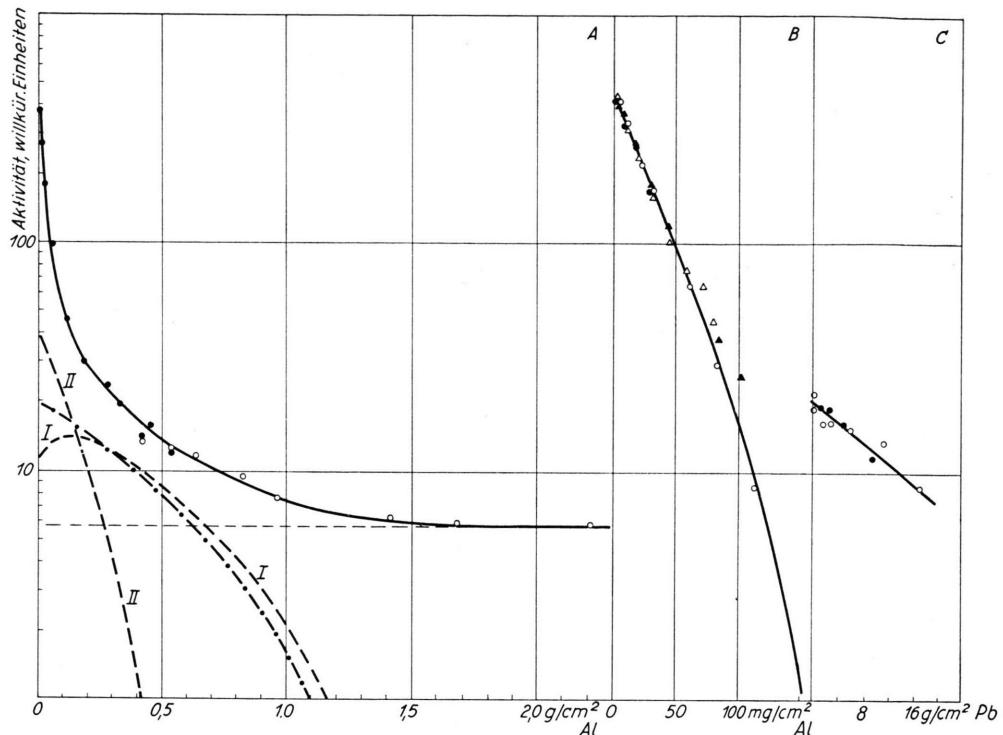


Abb. 3. Die β - und γ -Strahlung des ^{92}Sr .
 A) Absorptionskurve der β -Strahlen in Aluminium, Meßpunkte $\circ\circ$ aus Versuch 2, $\bullet\bullet$ aus Versuch 4, Tab. 3.
 — · — Absorptionskurve des ^{92}Y nach ²⁵, — — abgezogene Kurve mit Berücksichtigung der Nachbildung des ^{92}Y während der Messung. β -Energie der Komponente I (^{92}Y) 4,0 MeV, der Komponente II (^{92}Sr) 1,5 MeV.

B) Absorptionskurve nach Abzug der γ -Strahlung und der Muttersubstanzen I und II, Meßpunkte $\circ\circ$ aus Versuch 4, $\triangle\triangle$ Versuch 5, $\blacktriangle\blacktriangle$ Versuch 6, $\bullet\bullet$ Versuch 7, Tab. 3.
 — — Absorptionskurve des ^{90}Sr , β -Energie 0,54 MeV ^{6,7}, zum Vergleich.
 C) Absorptionskurve der γ -Strahlen in Blei, Meßpunkte $\circ\circ$ aus Versuch 3 a, $\bullet\bullet$ Versuch 3 b. γ -Energie etwa 1,5 MeV.

Abtrennung der Strontiumisotope von den Muttersubstanzen extrapoliert. Die Intensität des ^{90}Sr wurde nicht auf diesem Wege, sondern aus der Intensität des ^{90}Y nach chemischer Trennung von Yttrium aus Strontium ermittelt. Die Aktivitätswerte mußten in verschiedener Weise korrigiert werden:

a) Zur Korrektur der Absorption der β -Strahlen im Zählrohrfenster und in der Luftsicht zwischen Präparat und Zählrohr wurden die Absorptionskurven in Aluminium auf die Absorberdicke Null extrapoliert. Dabei wurde zur Dicke des Zählrohrfensters und der Luftsicht die halbe Schichtdicke des Präparates zugeschlagen, um zugleich die Selbstabsorption der β -Strahlen im Präparat auszugleichen. Diese vereinfachte Korrektur der Selbstabsorption war möglich, weil die Schichtdicke der Präparate nur $1-2 \text{ mg/cm}^2$ betrug. Die Rückstreuung der β -Strahlen vom Präparaträger wurde nicht korrigiert. Sie ist oberhalb 0,6 MeV unabhängig von der β -Energie ⁵, die Energie aller untersuchten Strahler lag über dieser Grenze.

b) Bei den Bestrahlungen wurde für keines der gemessenen Isotope die Sättigungsaktivität erreicht. Da-

mit mußte berücksichtigt werden, welcher Bruchteil der Sättigungsaktivität entstanden war, wobei teilweise auch die Muttersubstanzen zu berücksichtigen waren, da auch für sie keine Sättigung erreicht wurde. Weiter waren teilweise diese Muttersubstanzen bei der Fällung des Strontiums noch nicht vollständig zerfallen, so daß die Strontiumaktivität um einen bestimmten Betrag erhöht werden mußte. Alle diese Korrekturen erfolgten zusammen mit der Extrapolation der Aktivität vom Zeitpunkt der Strontiumfällung auf Bestrahlungsende rechnerisch durch einen Sättigungsfaktor f (in %). Aus der gemessenen Intensität I_e wird die Sättigungsaktivität I_s erhalten durch $I_s = 100 \cdot I_e/f$. Zur Berechnung von f wurden die Gleichungen von RUBINSON ²⁸ benutzt ⁸. Wenn die Muttersubstanzen bei dieser Berechnung von f berücksichtigt werden müssen, so muß zugleich bekannt sein, in welchem Umfang die einzelnen Glieder der Spaltketten beim Spaltvorgang primär entstehen. PAPPAS ²⁹ hat Tabellen gegeben, aus denen die primäre Ausbeute berechnet werden kann (vgl. Tab. 4). Man macht dabei die experimentell gestützte Annahme, daß die Verteilung der Primäraus-

²⁸ W. RUBINSON, J. Chem. Phys. **17**, 542 [1949]. — S. KATCOFF u. W. RUBINSON, Phys. Rev. **91**, 1458 [1953].

²⁹ A. C. PAPPAS, MIT-Report No. 63 (Sept. 1953) u. Proc. Intern. Conf. Peaceful Uses Atom. Energy, Genf 1955, Bd. 7, S. 19 ff.

Massenzahl	Halbwertzeit				Primärausbeute (%)			
	Kr	Rb	Sr	Y	Kr ⁺	Rb	Sr	Y
89	3,18 m	15,4 m	50,5 d*	stabil	90	10	0,06	
90	33 s	2,71 m	28,0 a*	64,2 h	79	20	1,0	0,001
91	9,8 s	1,7 m (90%)**	9,67 h	50,3 m	65	30	5,0	0,008
92	3,0 s	14 m (10%)	2,60 h	58 d	46	42	12	0,1
		kurz		3,60 h				

* einschließlich der Primärausbeute aller vorangehenden Glieder der Zerfallskette;

** Halbwertszeiten von ^{89}Sr nach 1,31 , von ^{90}Sr nach 31 ;

** Verzweigung beim ^{91}Rb abgeschätzt nach 32 ; für die primäre Bildung wurde angenommen, daß die Hälfte des ^{91}Rb als 1,7 m Rb, die andere Hälfte als 14 m Rb entsteht.

Tab. 4. Halbwertszeiten (nach 6 , 7) und primäre Spaltausbeuten als Bruchteil der gesamten Ausbeute der Spaltketten (nach 29) zur Auswertung der Ausbeutebestimmungen.

Vers.	Bestr. in	τ	t_1	t_2	I_{89}	I_{90}	f_{89}	f_{90}	$A_{89/90}$
1	Hw	1,0 d	1,4 d	1,8 d	$9,0 \cdot 10^3$	58	1,38	$6,86 \cdot 10^{-3}$	0,77
2	Hw	3,0 d	1,3 d	1,5 d	$1,70 \cdot 10^4$	108	4,07	$2,03 \cdot 10^{-2}$	0,79
3	Mz	2,0 h	0,3 h	2,0 h	$1,42 \cdot 10^4$	88	0,114	$5,60 \cdot 10^{-4}$	0,80
4	Mz	2,0 h	2,5 h	4,5 h	$7,2 \cdot 10^3$	52	0,114	$5,60 \cdot 10^{-4}$	0,76
5	Hw	3,0 d	2,2 d	2,3 d	$1,03 \cdot 10^3$	69	4,07	$2,03 \cdot 10^{-2}$	0,75
6	Hw	7,0 d	4,3 d	4,5 d	$1,17 \cdot 10^4$	77	9,25	$4,73 \cdot 10^{-2}$	0,78
7	Hw	7,0 d	1,5 d	1,7 d	$1,11 \cdot 10^4$	68	9,25	$4,73 \cdot 10^{-2}$	0,83

Erläuterungen vgl. Tab. 6.

Tab. 5. Relative Spaltausbeute von $^{89}\text{Sr}/^{90}\text{Sr}$ bei der Spaltung von natürlichem Uran mit langsamem Neutronen.

Vers.	Bestr. in	τ	t_1	t_2	I_{89}	I_{91}	f_{89}	f_{91}	$A_{89/91}$
1	Mz	120 m	20 m	165 m	$5,55 \cdot 10^3$	$5,95 \cdot 10^5$	0,113	11,1	0,92
2	Mz	120 m	12 m	28 m	$8,6 \cdot 10^4$	$1,20 \cdot 10^6$	0,106	12,7	0,86
3	Mz	120 m	12 m	28 m	$4,55 \cdot 10^3$	$6,55 \cdot 10^5$	0,106	12,7	0,83

Erläuterungen zu Tab. 5 und 6:

Hw bestrahlt in Harwell mit verlangsamten Spaltneutronen,

Mz bestrahlt in Mainz mit verlangsamten Be-D-Neutronen,

τ Bestrahlungszeit,

t_1 Zeitpunkt der Strontium-Krypton-Trennung,

t_2 Zeitpunkt der Strontium-Rubidium-Trennung,

t_1 , t_2 werden von Bestrahlungende an gerechnet,

I gemessene Aktivität zur Zeit t_2 in Impulsen/min, mit Korrektur für Absorption, Selbstabsorption und Rückstreuung,

f Sättigungsfaktor in %,

A relative Spaltausbeute,

Die Indizes von I , f und A geben die Massenzahl des Isotops an, für das die Angabe gilt.

Tab. 6. Relative Spaltausbeute von $^{89}\text{Sr}/^{91}\text{Sr}$ bei der Spaltung von natürlichem Uran mit langsamem Neutronen.

beuten innerhalb einer Spaltkette für alle Ketten gleich ist und durch das „Postulat der gleichen effektiven Kettenlänge“ geregelt wird $^{29}, ^{33}$. Im übrigen haben vergleichende Rechnungen ergeben, daß die Primär-ausbeuten wie die Zeitpunkte der Trennung des Strontiums von den Muttersubstanzen in beträchtlichen Grenzen variiert werden können, ohne daß die Resultate

dadurch wesentlich beeinflußt werden 8 . Die Trennzeiten sind deshalb nicht genau anzugeben, weil die Trennungen sich über einen gewissen Zeitraum erstrecken.

In den Tab. 5 und 6 sind zunächst die relativen Spaltausbeuten von $^{89}\text{Sr}/^{90}\text{Sr}$ und $^{89}\text{Sr}/^{91}\text{Sr}$ zusammengestellt. Daraus können absolute Spaltausbeuten

³⁰ A. KJELBERG u. A. C. PAPPAS, Nuclear Phys. **1**, 322 [1956].

³¹ D. M. WILES u. R. H. TOMLINSON, Canad. J. Phys. **33**, 133 [1955]. — K. F. LYNN, L. E. GLENDEEN u. E. P. STEINBERG, unveröffentlicht, nach 37 .

³² O. KOFOED-HANSEN u. K. O. NIELSEN, K. Danske Vidensk. Selsk., Mat.-fys. Medd. **26**, No. 7 [1951].

³³ L. E. GLENDEEN, MIT-Report No. 35 (Dez. 1949).

Nuklid	verglichen	relative Ausbeute ⁺	absolute Ausbeute*	Literaturwerte	Autoren
⁸⁹ Sr	⁸⁹ Sr/ ⁹⁰ Sr	0,78 ± 0,02	4,50 ± 0,16%	4,56 ± 0,07% ⁺⁺ 4,4%**	REED u. TURKEVICH ³⁴ NOVEY u. Mitarb. ³⁵
⁹¹ Sr	⁸⁹ Sr/ ⁹¹ Sr	0,87 ± 0,04	5,2 ± 0,4%	5,07 ± 0,11% 5,0%**	REED u. TURKEVICH ³⁴ FINKLE u. Mitarb. ³⁶
⁹¹ Y				5,35 ± 0,21% 6,1; 5,5%**	REED ³⁷ BALLOU u. Mitarb. ³⁸

⁺ nach Tab. 5 und 6,^{*} normalisiert mit der Ausbeute von 5,77%^{3,39} für ⁹⁰Sr,⁺⁺ neu berechnet mit der Halbwertszeit 50,5 d für ⁸⁹Sr,^{**} neu berechnet mit den Halbwertszeiten von 9,7 h für ⁹¹Sr und 50,5 d für ⁸⁸Sr und einer Ausbeute von 6,3%^{3,39} für ¹⁴⁰Ba.Tab. 7. Ausbeuten von ⁸⁹Sr und ⁹¹Sr bei der Spaltung von natürlichem Uran mit langsamem Neutronen.

für ⁸⁹Sr und ⁹¹Sr erhalten werden (Tab. 7), wenn die absolute Ausbeute von ⁹⁰Sr mit 5,77% angenommen wird. Dieser Wert ist der Mittelwert der absoluten massenspektrometrischen Ausbeutebestimmungen von STEINBERG und GLENDEIN³ (5,80%) und PETRUSKA, THODE und TOMLINSON³⁹ (5,74%). Die Werte der Tab. 7 stimmen gut mit den Messungen von anderer Seite überein. Bemerkenswert ist der für ⁹¹Sr gefundene Wert von 5,2%. Die massenspektrometrisch gemessenen Ausbeuten für ⁹¹Zr betragen 5,84%³ und 5,60%³⁹, danach wäre eine nicht unbeträchtliche primäre Bildung von ⁹¹Y zu vermuten. Dies steht aber im Widerspruch zu den Vorstellungen über die Verteilung primärer Spaltausbeuten innerhalb einer Spaltkette^{29,33} (vgl. auch Tab. 4) und den Messungen von REED³⁷, der <0,05% primäre Spaltausbeute für ⁹¹Y gefunden hat. Die älteren Messungen³⁸ der Ausbeute von ⁹¹Y sind wohl als weniger genau anzusehen, eine neuere Messung³⁷ bestätigt mit 5,35% die Ausbeuten von ⁹¹Sr. Die Ausbeute von 4,5% für ⁸⁹Sr stimmt dagegen gut mit den massenspektrometrisch absolut gemessenen Ausbeuten für ⁸⁸Sr und ⁹⁰Sr überein; verbindet man diese Werte durch eine Gerade, so ist für ⁸⁹Sr eine Ausbeute von 4,63%³⁹ bzw. 4,70%³ zu erwarten.

Im Hinblick auf die Differenz zwischen massenspektrometrischen und radiometrischen Ausbeutebestimmungen bei der Masse 91 wäre die Ausbeute von ⁹²Sr von Interesse. Hier liegt bisher nur eine ältere Messung⁴⁰ vor, die 5,5% ergeben hat, wäh-

rend die massenspektrometrische Messung der Ausbeute von ⁹²Zr 6,03% ergab³. Leider lassen sich unsere Messungen über die Spaltausbeute des ⁹²Sr nicht auswerten. Wir fanden überraschend hohe Schwankungen der einzelnen Werte, die zum Teil stark von den erwarteten Werten abweichen. Die Schwankungen werden erheblich vermindert und die herausfallenden Werte in den erwarteten Bereich gebracht, wenn angenommen wird, daß die Halbwertszeit des ⁹²Rb nicht vernachlässigbar kurz ist^{6,7}, sondern um 10 min liegt⁸. Danach dürfte zunächst eine Bestimmung der Halbwertszeit des ⁹²Rb notwendig sein.

Bestimmung einiger Halbwertszeiten

In Nebenversuchen wurden jeweils aus einer Anzahl von Zerfallskurven folgende Halbwertszeiten bestimmt, ohne daß wesentliche Abweichungen von den bekannten Werten^{6,7} beobachtet wurden:

$$\begin{array}{ll} {}^{90}\text{Y} & 64,8 \pm 0,2 \text{ h}, \\ {}^{91}\text{Y} & 58,3 \pm 0,8 \text{ d}, \\ {}^{85}\text{Sr} & 65,0 \pm 0,7 \text{ d} \\ \text{und} & {}^{87\text{m}}\text{Sr} \quad 2,90 \pm 0,08 \text{ h}. \end{array}$$

Die Bestrahlungen in Mainz verdanken wir Herrn Prof. Dr. A. FLAMMERSFELD und Herrn Prof. Dr. P. JENSEN und ihren Mitarbeitern. Herrn Dr. H. SELIGMAN, Harwell, danken wir für die Berücksichtigung spezieller Wünsche bei den Bestrahlungen in Harwell, der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung der Untersuchung.

³⁴ G.W. REED u. A. TURKEVICH, Phys. Rev. **92**, 1473 [1953].

³⁵ T.B. NOVEY, D.W. ENGELKEMEIR, E.L. BRADY u. L.E. GLENDEIN, in ¹⁶, S. 678 ff.

³⁶ B. FINKLE, E.J. HOAGLAND, S. KATCOFF u. N. SUGARMAN, in ¹⁶, S. 1368 ff.

³⁷ G.W. REED, Phys. Rev. **98**, 1327 [1955].

³⁸ N.E. BALLOU, T.B. NOVEY, D.W. ENGELKEMEIR, E.L. BRADY u. J.A. SEILER, in ¹⁶, S. 675 ff.

³⁹ J.A. PETRUSKA, H.G. THODE u. R.H. TOMLINSON, Canad. J. Phys. **33**, 693 [1955].

⁴⁰ Vgl. ²⁵, umgerechnet für die Halbwertszeiten 2,60 h für ⁹²Sr und 3,60 h für ⁹²Y und eine Ausbeute von 6,3% für ¹⁴⁰Ba.