Abb. 2. $L(X^2)$ für verschiedene ϵ^2 .

und man findet aus (12) $\alpha_N l = 7,28$. Der frühere Wert für $\alpha_N l$ (bei $\vartheta^2 = 0$) ist 6,39. Die linke Seite in Gl. (12) verschwindet für $\alpha_N l = 7,28$ auch bei $X^2 \approx 2,55$. Der betreffende Zustand hat eine Norm, die das entgegengesetzte Vorzeichen wie die des Zu-

standes mit $X^2 = 1$ hat. Gl. (12) hat auch eine Lösung bei $X^2 = 0$. Die Inkonsistenz der früher angegebenen Arbeit bleibt daher bestehen und kann nicht durch Wahl irgendeiner Masse m eliminiert werden. Die Form (3) für $\varrho(\zeta)$ mit (2 a, b) bedeutet einen Geisterzustand zwischen zwei normalen Zuständen. Mit $\nu^2 \rightarrow 0$ erhalten wir einen normalen Zustand und einen Dipolgeist. Die resultierende Eigenwertgleichung gibt dagegen einem Geisterzustand oberhalb des Zustandes mit endlicher Masse und einen Zustand bei $X^2 = 0$.

Im Prinzip kann Konsistenz nur erreicht werden, wenn die Lösung für den unteren Massenwert bei mit dem Nukleonenzustand identifizieren kann und wenn die Lösung für den unteren Massenwert bei der Masse m des Geisterteils des Dipolgeistes auftritt. Die Masse des anderen Teils des Dipolgeistes ist dann die Lösung für $X^2 = 0$. Diese Bedingungen können nicht erfüllt werden, auch wenn wir ν^2 klein, aber endlich wählen.

Herrn Professor HEISENBERG, Herrn Dr. DÜRR und Herrn Dr. MITTER danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit und für zahlreiche Diskussionen. Ich danke ferner Herrn Professor BIERMANN für die freundliche Erlaubnis zur Benutzung der Rechenmaschine G 2. Mein Dank gebührt außerdem dem Deutschen Akademischen Austauschdienst für ein Stipendium.

Bestimmung von Wirkungsquerschnitten einiger Kernreaktionen durch 14 MeV-Neutronen nach einer Aktivierungsmethode

Von H. POLLEHN und H. NEUERT

Aus dem Physikalischen Staatsinstitut, I. Institut für Experimentalphysik, Hamburg
(Z. Naturforsch. 16 a, 227–231 [1961]; eingegangen am 14. Januar 1961)

Mit den 14-MeV-Neutronen einer D–T-Anlage wurde eine Reihe von Wirkungsquerschnitten von (n, p) -, (n, α) -, $(n, 2n)$ - und (n, He^3) -Reaktionen bei Fe, Al, Cu, Ce und Cs gemessen. Der Wirkungsquerschnitt wurde aus der entstehenden Radioaktivität durch Auszählung der mit einem $\text{NaJ}(\text{Ti})$ -Bohrlochkristall registrierten γ -Strahlen und aus dem berechneten Ansprechvermögen des Bohrlochkristalls ermittelt.

Der Wirkungsquerschnitt von durch Neutronen ausgelösten Neutronen wird vielfach aus der entstandenen Radioaktivität des beschossenen Materials bestimmt. Die häufig angewandte Methode der Bestimmung der Aktivität aus der Messung der β -Strahlung führt wegen der Vielzahl der nebeneinander auftretenden Prozesse und wegen der Selbstabsorption im Target selbst bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Halbwertszeiten der Aktivitäten oft zu Schwierigkeiten in der Auswertung. Diese Schwierigkeiten wurden teilweise überwunden:

1. Durch Verwendung angereicherter Isotope.
2. Durch Verwendung nur dünner Substanzproben. Dieses Verfahren setzt meist hohe Neutronenintensitäten voraus.
3. Durch eine chemische Trennung der durch den Beschuß entstehenden Elemente.

Ein weiteres Meßverfahren besteht daher darin, daß auf die Messung der β -Strahlung ganz verzichtet und die Aktivität nur aus einer gleichzeitig emittierten γ -Strahlung ermittelt wird. Die γ -Strahlung wird dabei mit einem $\text{NaJ}(\text{Ti})$ -Szintillationskristall



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

gezählt, wobei die bestrahlte Substanzprobe in definierter Geometrie über dem Kristall angebracht wird. Dabei kann die Aktivität entweder aus der gesamten γ -Zählrate bestimmt werden, oder aber durch Ausmessung der im Szintillationsspektrum durch den Photopeak einer charakteristischen γ -Linie gebildeten Fläche. In beiden Fällen geht aber noch die geometrische Anordnung und das Ansprechvermögen des Kristalls auf die betreffende γ -Strahlung ein. Für eine idealisierte Anordnung, nämlich punktförmige γ -Quelle und Vernachlässigung von Absorption auf dem Wege von der γ -Quelle zum Kristall, liegen hierfür Berechnungen in Tabellenform vor¹. Für genaue Wirkungsquerschnittsbestimmungen setzt die Anwendung dieses Verfahrens und der Tabellen die Verwendung nur geringer Substanzmengen voraus, in denen die Selbstabsorption vernachlässigt werden kann. Die Absorption der γ -Strahlung auf dem Wege von der γ -Quelle zum Kristall muß aber immer berechnet werden.

Hier wurde nun der Weg beschritten, daß die γ -Aktivität mit Hilfe eines Bohrlochzählers registriert wurde. Dabei wurden größere Substanzmengen aktiviert, so daß das Bohrloch ganz ausgefüllt werden konnte. Dafür mußte die Selbstabsorption in der Substanz und das Ansprechvermögen des Bohrlochkristalls besonders berechnet werden. Auch hier ergab sich dann die Möglichkeit, die gesamte γ -Strahlung oder die γ -Intensität eines Photopeaks zu erfassen. Diese Rechnungen sind wegen des großen Umfangs nur für die hier vorliegende Bohrlochgeometrie durchgeführt worden. Über die Resultate dieser Berechnungen und die gefundenen Kurven für das Ansprechvermögen und die Selbstabsorption soll gesondert berichtet werden².

Experimentelles

Die Wirkungsquerschnitte wurden gemessen für 14,1-MeV-Neutronen aus der $T(d, n)He^4$ -Reaktion. Die Targetsubstanzen Fe, Al, CuO, Cs_2CO_3 und CeO_2 im natürlichen Gemisch befanden sich in einem 3–4,9 cm von der Neutronenquelle entfernten Plexiglaszylinder, der während der gesamten Bestrahlungszeit gedreht wurde, um eine gleichmäßige Aktivierung der gesamten Substanz zu erhalten. Die Neutronenintensität wurde mit einem Long-Counter gemessen, der mit einem $Li^6J(Eu)$ -Kristall geeicht worden war. Mit dem $Li^6J(Eu)$ -Kristall wurden Impulshöhenspektren in Abstän-

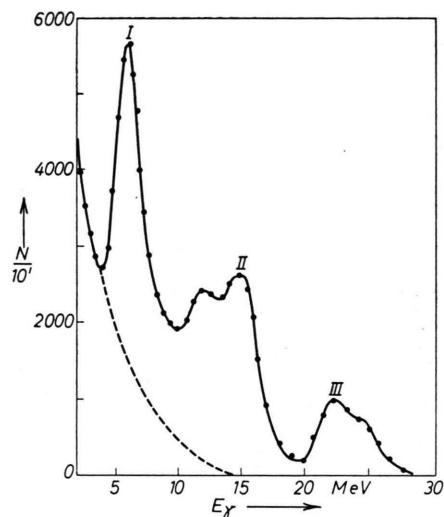


Abb. 1. Spektrum des $Li^6J(Eu)$ -Kristalls bei $E_n = 14,1$ MeV. Abstand LiJ –Neutronenquelle = 9 cm. I: $\alpha + T$ -Teilchen aus $Li^6(n, \alpha)T$ bei niederenergetischen Neutronen. — II: Protonen und Deuteronen + Restkerne. — III: $\alpha + T$ -Teilchen bei $E_n = 14,1$ MeV. — - - - γ -Abfall.

den von 3–150 cm von der Neutronenquelle aufgenommen, um den Anteil an niederenergetischen Neutronen festzustellen (Abb. 1). Aus diesen Messungen ergab sich, daß der Anteil der niederenergetischen Neutronen am Ort der Bestrahlung ungefähr 3% betrug. Die hier verwendete Methode gestattet die Aktivierung größerer Substanzmengen. Bei der Eisenaktivierung wurden 32 g Eisen bestrahlt. Wegen der Größe der Substanzmenge mußte die Streuung der Neutronen in der Targetsubstanz berücksichtigt werden. Die hierdurch notwendigen Korrekturen betragen 2–5%. Die Neutronenintensität konnte auf 4% genau bestimmt werden.

Die γ -Aktivität der bestrahlten Substanz wurde mit einem $NaJ(Tl)$ -Bohrlochkristall von 3" Durchmesser, 2" Höhe und einem Bohrloch von 1" Tiefe und 1" Durchmesser registriert. Dabei konnten:

1. das Gesamtspektrum mit einem Vielkanalanalysator aufgezeichnet werden;
2. das Abklingen der Aktivität des gesamten Spektrums bestimmt werden;
3. das Abklingen einzelner γ -Linien, die den jeweils interessierenden Aktivitäten entstammten, durch einen Einkanal-diskriminatoren gesondert registriert werden.

Aus der gemessenen Zahl der γ -Impulse, der Kenntnis des Zerfallsschemas, des entstandenen radioaktiven Kerns und aus der Ansprechwahrscheinlichkeit der Szintillationszähleranordnung kann der Wirkungsquerschnitt ermittelt werden.

¹ C. E. CROUTHAMEL, Gamma-Ray-Spectrometry, Pergamon Press, London 1960.

² H. POLLEHN, Diplomarbeit, Hamburg 1961.

Messungen

a) Eisen

32 g Eisen im natürlichen Gemisch wurden mit 14,1-MeV-Neutronen bestrahlt. Die Bestrahlungszeiten lagen zwischen 2 min und 22 h. Nach einer Bestrahlungsdauer von 1 – 3 h ist nur die 2,58-Stunden-Aktivität aus der Reaktion $\text{Fe}^{56}(\text{n}, \text{p})\text{Mn}^{56}$ deutlich zu erkennen. Für diese Reaktion ergab sich ein Wirkungsquerschnitt von $112,5 \text{ mb} \pm 2\%$. Die angegebenen Fehler sind die maximalen Abweichungen der Einzelmeßwerte vom Mittelwert. Bei kurzen Bestrahlungszeiten sind aus der Abklingkurve noch zwei weitere Aktivitäten mit Halbwertszeiten von 1,4 und 8,3 min erkennbar. Sie entstammen den Reaktionen $\text{Fe}^{57}(\text{n}, \text{p})\text{Mn}^{57}$ bzw. $\text{Fe}^{54}(\text{n}, 2\text{n})\text{Fe}^{53}$. Das Gesamtspektrum wurde mit einem Vielkanalanalysator aufgezeichnet. Hiervon wurde das zur 2,58-Stunden-Aktivität des Mn^{56} gehörende Spektrum subtrahiert (Abb. 2). Außerdem wurde mit einem Einkanal das Abklingen der einzelnen γ -Linien von 120 keV und 500 keV bestimmt. Aus den drei Messungen, die alle mehrere Male durchgeführt wurden, wurde der Wirkungsquerschnitt ermittelt. Dieser ergab sich für die Reaktion $\text{Fe}^{57}(\text{n}, \text{p})\text{Mn}^{57}$ zu $50 \text{ mb} \pm 10\%$ und für die Reaktion $\text{Fe}^{54}(\text{n}, 2\text{n})\text{Fe}^{53}$ zu $11 \text{ mb} \pm 8\%$.

Bei langen Bestrahlungszeiten treten zwei weitere Aktivitäten hervor:

1. Eine 25 d-Aktivität aus $\text{Fe}^{53}(\text{n}, \alpha)\text{Cr}^{51}$ mit einer γ -Linie bei 320 keV.

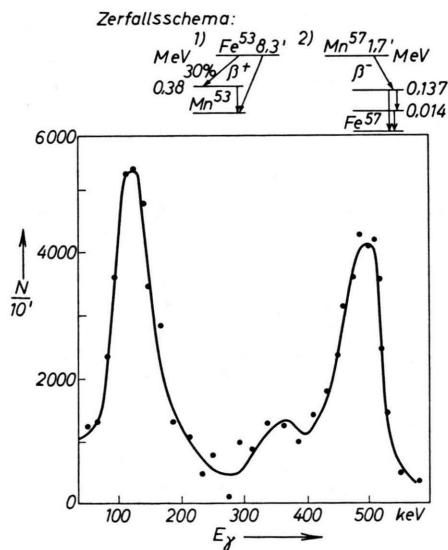


Abb. 2. Spektrum aus der Fe-Aktivität.

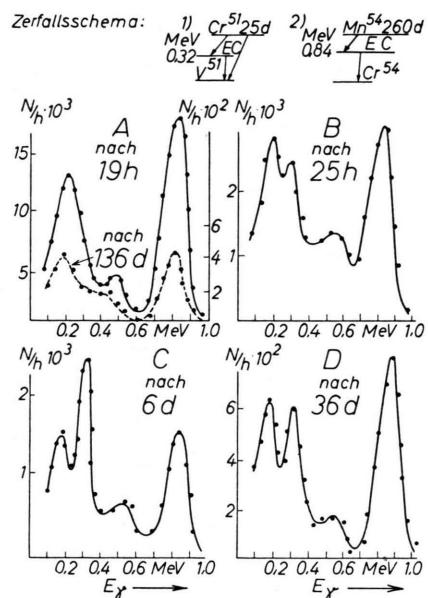


Abb. 3. Spektrum aus der Fe-Aktivität.

2. Eine 260 d-Aktivität aus $\text{Fe}^{54}(\text{n}, \text{p})\text{Mn}^{54}$ mit einer γ -Linie bei 840 keV.

Abb. 3 zeigt das Auftreten der verschiedenen γ -Strahlungen im Vielkanalspektrum während des Abklingens. In Abb. 3 a zeigt die obere ausgezogene Kurve das Spektrum 19 Stunden nach Beendigung der Bestrahlung. Herausragend ist die 840-keV- γ -Strahlung der starken 2,58 h-Aktivität des Mn^{56} . Nach 25 h (Abb. 3 b) ist die 320-keV-Strahlung der 25 d-Aktivität des Cr^{51} deutlich zu sehen. Nach 6 d (Abb. 3 c) ist das Mn^{56} (2,58 h) vollkommen zerfallen; jetzt tritt die 320-keV-Strahlung stark hervor. Die jetzt auftretende 840-keV-Strahlung stammt aus der 260 d-Aktivität des Mn^{54} . Nach 131 d [gestrichelte Kurve (Abb. 3 a)] ist auch das Cr^{51} vollständig zerfallen und nur das Mn^{54} (840-keV-Strahlung) übrig geblieben. Für die Reaktion $\text{Fe}^{54}(\text{n}, \alpha)\text{Cr}^{51}$ bzw. $\text{Fe}^{54}(\text{n}, \text{p})\text{Mn}^{54}$ ergaben sich hieraus die Wirkungsquerschnitte zu $131 \text{ mb} \pm 12\%$ bzw. $254 \text{ mb} \pm 5\%$. Zur Überprüfung der der Auswertung zugrunde liegenden Berechnungen wurde bei $\text{Fe}^{56}(\text{n}, \text{p})\text{Mn}^{56}$ eine getrennte Messung mit einer anderen Targetgeometrie durchgeführt. Sie lieferte einen Wirkungsquerschnitt von $111,9 \text{ mb} \pm 2,7\%$. Diese Reaktion ist bereits von zahlreichen Autoren (vgl. Tab. 1) gemessen worden. Die hier gefundenen Werte stimmen innerhalb der Meßgenauigkeit durchaus mit diesen überein.

b) *Kupfer*

Bei Bestrahlung von natürlichem Kupfer mit 14-MeV-Neutronen treten wegen des großen Wirkungsquerschnitts die $(n, 2n)$ -Reaktionen an Cu^{63} und Cu^{65} besonders stark hervor. Aus Messungen des Abfalls der gesamten γ -Aktivität wurden hier für die $\text{Cu}^{63}(n, 2n)\text{Cu}^{62}$ $490 \text{ mb} \pm 4,1\%$, für $\text{Cu}^{65}(n, 2n)\text{Cu}^{64}$ $940 \text{ mb} \pm 7,5\%$ gefunden. Diese Werte stimmen innerhalb der Fehlergrenzen gut mit den Werten anderer Autoren überein. Für $\text{Cu}^{65}(n, p)\text{Ni}^{65}$ wurde bei dem gleichen Meßverfahren der Wert von

$29 \text{ mb} \pm 14\%$ gefunden in Übereinstimmung mit einem Meßresultat von FINK und Mitarb.³ von $27 \text{ mb} \pm 18,5\%$.

Im Spektrum der Kupferaktivitäten findet man deutlich eine 70-keV-Linie, die der Reaktion $\text{Cu}^{63}(n, \text{He}^3)\text{Co}^{61}$ mit einer Halbwertszeit von 105 min zuzuschreiben ist (Abb. 4). Abb. 5 zeigt den Abfall der Aktivität der γ -Quanten, deren Energien zwischen 60 und 80 keV liegen. Mit Hilfe des bekannten Zerfallsschemas konnte der Wirkungsquerschnitt dieser Reaktion zu $3,2 \text{ mb} \pm 30\%$ bestimmt werden.

Reaktion	σ mb	Ge- samter Fehler	Halbwertszeit	Messungen anderer Autoren σ mb	Halbwertszeit (Literatur)	Q MeV
$\text{Fe}^{57}(n, p)\text{Mn}^{57}$	50	16%	$1,4 \pm 0,2 \text{ min}$	$71,7 \pm 9,9\% \text{ }^3$	1,7 min	— 1,9182
$\text{Fe}^{56}(n, p)\text{Mn}^{56}$	112,5	5%	$2,58 \pm 0,03 \text{ h}$	128 $\pm 10\% \text{ }^3$ 96,7 $\pm 12\% \text{ }^4$ 131 $\pm 12\% \text{ }^5$ 124 $\pm 10\% \text{ }^6$ 144 $\pm 13\% \text{ }^7$ 110 $\pm 4\% \text{ }^9$ 90 $\pm 16\% \text{ }^8$	2,576 h 2,578 h 2,574 h 2,59 h	— 2,9242
$\text{Fe}^{54}(n, p)\text{Mn}^{54}$	254	11%	$260 \pm 15 \text{ d}$		291 d 278 d 300 d	+ 0,0860
$\text{Al}^{27}(n, p)\text{Mg}^{27}$	80,8	5,4%	$9,6 \pm 0,3 \text{ min}$	52,4 $\pm 18\% \text{ }^4$ 79 $\pm 7\% \text{ }^6$ 87,2 $\pm 8\% \text{ }^7$ 115 $\pm 8\% \text{ }^{11}$ 53 $\pm 10\% \text{ }^{10}$	9,45 min 9,39 min 9,51 min 9,6 min	— 1,8127
$\text{Cu}^{65}(n, p)\text{Ni}^{65}$	29	16%	$2,6 \pm 0,3 \text{ h}$	27 $\pm 18\% \text{ }^3$	2,564 h 2,6 h	— 1,3182
$\text{Fe}^{54}(n, 2n)\text{Fe}^{53}$	11	17%	$8,3 \pm 0,5 \text{ min}$	7,9 $\pm 10\% \text{ }^3$	8,9 min	— 13,587
$\text{Cs}^{133}(n, 2n)\text{Cs}^{132}$	704	12%	$6,83 \pm 0,1 \text{ d}$		6,2 d 7,1 d	— 9,054
$\text{Cu}^{65}(n, 2n)\text{Cu}^{64}$	940	9%	$12,7 \pm 0,1 \text{ h}$	954 $\pm 14\% \text{ }^{10}$ 970 $\pm 8\% \text{ }^6$ 1085 $\pm 16\% \text{ }^4$	12,8 h 12,74 h 12,88 h	— 9,9108
$\text{Cu}^{63}(n, 2n)\text{Cu}^{62}$	490	9%	$9,8 \pm 0,2 \text{ min}$	482 $\pm 15\% \text{ }^4$ 556 $\pm 5\% \text{ }^7$ 510 $\pm 7\% \text{ }^6$	9,73 min 10,1 min 9,9 min	— 10,7976
$\text{Ce}^{140}(n, 2n)\text{Ce}^{139m}$	1440	11%	$57 \pm 5 \text{ sec}$	1220 $\pm 33\% \text{ }^{12}$	55 min	— 9,0442
$\text{Fe}^{54}(n, \alpha)\text{Cr}^{51}$	131	18%	$25 \pm 2 \text{ d}$	270 $\pm 50\% \text{ }^3$	27,8 d 27,9 d	+ 0,8236
$\text{Cu}^{63}(n, \text{He}^3)\text{Co}^{61}$	3,2	35%	$105 \pm 15 \text{ min}$		99 min 105 min 110 min	— 9,5289

Tab. 1.

³ R. W. FINK, Priv. Mitteilungen.⁴ E. B. PAUL u. R. L. CLARKE, Canad. J. Phys. **31**, 267 [1953].⁵ B. D. KERN, W. E. THOMPSON u. J. M. FERGUSON, Nucl. Phys. **10**, 226 [1959].⁶ S. G. FORBES, Phys. Rev. **88**, 1309 [1952].⁷ S. YASUMI, J. Phys. Soc., Japan **12**, 443 [1957].⁸ V. V. VERBINSKY u. Mitarb., Phys. Rev. **108**, 779 [1957].⁹ J. TENELL u. G. HOLM, Phys. Rev. **109**, 2031 [1958].¹⁰ A. POULARIKAS u. R. W. FINK, Phys. Rev. **115**, 989 [1959].¹¹ C. S. KHURANA, Nucl. Phys. **13**, 88 [1959].¹² R. G. WILLE u. R. W. FINK, Phys. Rev. **118**, 242 [1960].

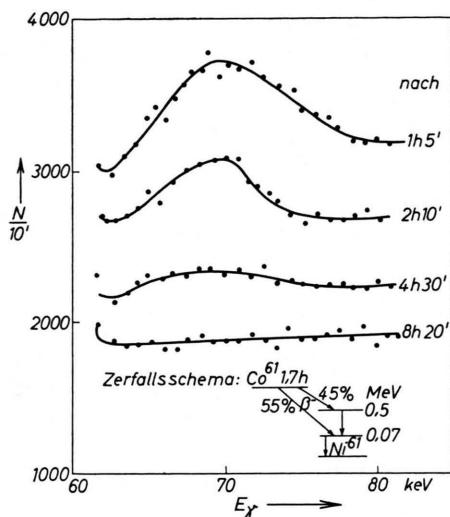
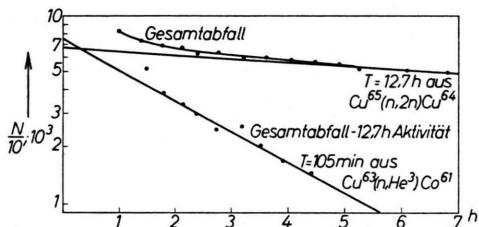


Abb. 4. Spektrum aus der Cu-Aktivität.

Abb. 5. Abfall der γ -Aktivität bei Cu. $60 \text{ keV} \leq E_\gamma \leq 80 \text{ keV}$.

c) Cäsium

Cäsium wurde als CsCO_3 bestrahlt und eine starke Aktivität aus der $(n, 2n)$ -Reaktion beobachtet, die sich wegen des günstigen Spektrums an Hand einer ausgeprägten Linie bei 670 keV gut auswerten lässt. Für den Wirkungsquerschnitt dieser Reaktion wurden $704 \text{ mb} \pm 2,8\%$ gefunden.

d) In einem weiteren Vergleich mit bekannten Wirkungsquerschnitten wurde außerdem die Reaktion $\text{Al}^{27}(n, p)\text{Mg}^{27}$ ausgemessen, die mit $80,8 \text{ mb} \pm 1,1\%$ auftrat (Vergleichswerte siehe Tab. 1). Für die Reaktion $\text{Ce}^{140}(n, 2n)\text{Ce}^{139m}$ wurden $1440 \text{ mb} \pm 6,6\%$ im Vergleich zu $1200 \text{ mb} \pm 30\%$ nach FINK gefunden.

In Tab. 1 sind alle hier gefundenen Meßresultate noch einmal zusammengestellt. In einer besonderen Spalte ist dabei ein gesamter Fehler angegeben, der noch die Unsicherheiten der Kenntnis des jeweiligen Zerfallsschemas und der Halbwertszeit, den Fehler in der Messung der Neutronenintensität und den Fehler aus der Berechnung der Ansprechwahrscheinlichkeit enthält.

Dem Bundesministerium für Atomkernenergie und Wasserwirtschaft und der Deutschen Forschungsgemeinschaft danken wir für die Überlassung von Geräten für diese Versuche. Herrn Professor Dr. L. COLLATZ danken wir sehr für seine Ratschläge zur Durchführung der Berechnungen, die zu einem großen Teil in dankenswerter Weise von Herrn cand. phys. K. H. PEUCKERT ausgeführt worden sind.

Erzeugung von Tritium und Edelgasisotopen bei Bestrahlung von Fe und Cu mit Protonen von 25 GeV Energie

Von K. GOEBEL,

CERN, Genf

und J. ZÄHRINGER

Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg

(Z. Naturforsch. 16 a, 231—236 [1961]; eingegangen am 17. Dezember 1960)

Production cross sections for Tritium and the rare gases have been measured in Fe, Cu at 25 GeV proton energy. The results do not show any essential variation compared to results at lower energies. The He^3/T -ratio, measured in the same stack of targets, is ca. 1.2. The cross-sections for He and T are approximately the same as at 3 GeV. Also the yield for the Argon-Isotopes is the same as measured at lower energies.

Das Studium der Erzeugungsquerschnitte von Kernreaktionsprodukten bei verschiedenen Energien gibt Auskunft über den Mechanismus der Energieumsetzung im Atomkern. Die Gültigkeit des Modells einer Wechselwirkung, die allgemein als Spallations-

prozeß bezeichnet wird, kann auf diese Weise geprüft werden. Bei Prozessen, in denen das einfallende Nukleon eine Energie hat, die höher ist als für die Bildung eines COMPOUND-Kernes noch zuträglich ist (ca. 20 MeV freie Energie im Kern), findet