

## WIRKUNGSQUERSCHNITTE DER KERNREAKTIONEN ${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$ UND ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$ BEI KLEINSTEN ENERGIEN

O. FIEDLER und P. KUNZE

*Institut für Experimentelle Kernphysik  
der Technischen Universität Dresden*

Eingegangen am 13. Januar 1967

**Abstract:** The cross sections of the reactions  ${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$  and  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$ , measured at energies between 50 keV and 23 keV, range from 100–0.01  $\mu\text{b}$ . The constant ratio  $\sigma_{{}^6\text{Li}}/\sigma_{{}^7\text{Li}}$  confirms, that the energy dependence of the transparency of the potential wall is approximately the same for s-wave and p-wave protons at these low energies. The relation  $\sigma \propto (1/E) \exp(-B/\sqrt{E})$  applies to both reactions with  $B = 90 \pm 6 \text{ keV}^{1/2}$  and  $91.5 \pm 4.5 \text{ keV}^{1/2}$  respectively.

E NUCLEAR REACTIONS  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}(p, \alpha)$ ,  $E = 23\text{--}50 \text{ keV}$ ; measured  $\sigma(E_p)$ . Natural target.

### 1. Einleitung

Das Interesse an Kernreaktionen bei kleinsten Energien hat sich mit den Bemühungen um eine kontrollierte Kernfusion erhöht. Bei Fusionsreaktionen handelt es sich um Kernreaktionen leichter Kerne in Plasmen bei  $10^7$  bis  $10^8$  °K. Um die Energie-Ergiebigkeit der Fusionsprozesse abzuschätzen, extrapoliert man bekanntlich die mit Hilfe von Beschleunigern bei kleinsten Geschossenergien gemessenen Wirkungsquerschnitte auf den Fusionsbereich, d.h. auf Partikelenergien von 1–10 keV. Da es sich hierbei um Extrapolationen von vielen Größenordnungen handelt, ist es wünschenswert, die Wirkungsquerschnitte der für die Fusion in Frage kommenden Reaktionen und ihre Energie-Abhängigkeit bis in den niederen Energiebereich möglichst genau zu bestimmen.

Nach einer Literatur-Zusammenstellung von Jarmie und Seagrave<sup>1)</sup> liegen für die beiden wichtigsten Fusionsreaktionen d+d und t+d Messungen bis 10 keV und zum Teil noch darunter vor. Zu den weniger ergiebigen Fusionsreaktionen gehören u.a. Protonenreaktionen mit Lithium. Reaktionen vom Typ  $(p, \alpha)$  an  ${}^6\text{Li}$  und  ${}^7\text{Li}$  sind im niederen Energiebereich wenig untersucht worden. Deshalb wurde die Aufgabe gestellt, die Wirkungsquerschnitte der Reaktionen  ${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$  und  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$  bei Protonen-Energien unterhalb 50 keV zu bestimmen und die Energie-Abhängigkeit mit Hilfe der in der Literatur vorhandenen Werte bei höheren Energien über einen größeren Energiebereich zu untersuchen.

Gegenüber Wirkungsquerschnitts-Bestimmungen bei höheren Geschosß-Energien ergeben sich folgende Probleme:

- (i) Die Reaktionsausbeuten sind gering.
- (ii) Die Targetverschmutzung hat einen starken Einfluß auf die Reaktionsausbeute.
- (iii) Wegen der starken Energie-Abhängigkeit der Wirkungsquerschnitte müssen sehr dünne Lithiumtargets verwendet werden.

## 2. Experimentelle Anordnung

### 2.1 PROTONENSTROM

Der Wasserstoff-Ionenstrahl wurde in einer Beschleunigungsapparatur mit einer speziellen Bogen-Ionenquelle erzeugt<sup>2)</sup> und mit Hilfe eines 90° Ablenkmagneten zerlegt. Der Protonenstrom auf dem Target betrug 1–5  $\mu\text{A}$ . Die Energie wurde von 50 keV bis 20 keV variiert. Da die Ausbeuten an Kernreaktionen in diesem Bereich sehr stark energieabhängig sind, wurde die Energieunschärfe des Protonenstrahles kleiner als 0.5 % gehalten. Bei einer Einstellung des Spaltes zwischen Analysator und Target auf 2.2 mm betrug die mittlere Schwankung des Protonenstromes auf dem Target bei Beobachtungszeiten von 5 min etwa 5 %. Da die Bestrahlungs- und Meßzeiten wegen der sogenannten Targetermüdung kleiner als 2 min gewählt wurden, war der Protonenstrom auf dem Target genügend konstant.

### 2.2 LITHIUM-TARGET

Bei den hier verwendeten kleinen Protonen-Energien hat die Beschaffenheit des Lithiumtargets einen erheblichen Einfluß auf die Reproduzierbarkeit der Reaktionsausbeuten. Für die Herstellung reiner Lithiumtargets kam deshalb nur die Vakuum-Aufdampfung am Reaktionsort in Frage. In der Reaktionskammer wurde metallisches Lithium in natürlicher isotopischer Zusammensetzung aufgedampft. Nach den hier gemachten Erfahrungen spielt die Reinigung des Lithiums im Verdampfungs-ofen, sowie die Herstellung einer genügend großen Lithiumgetterfläche vor der Target-Bedampfung eine Rolle.

Die Flächengewichte der aufgedampften Lithiumschichten wurden mit Hilfe von zwei Verfahren bestimmt, einmal nach der Alpha-Absorptionsmethode<sup>3,4)</sup> und zum anderen nach der bei Sandell<sup>5)</sup> angegebenen farbchemischen Thoronmethode. Die erste Methode hat den Vorteil, daß die Schichten sofort nach ihrer Herstellung in kurzer Zeit gemessen werden können, jedoch den Nachteil, daß die untere Grenze bei  $\pm 4 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  liegt. Nach dem zweiten Verfahren kann man 1  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  Li auf 5 % genau bestimmen, muß jedoch dazu das Target ausbauen und zerstören. In einer Reihe von Vorversuchen wurde bei geeigneter Kombination beider Meßverfahren der Dampfstrom des Ofens als Funktion der Ofentemperatur ermittelt. Dampfstrom und Aufdampfzeit bestimmten die Schichtdicke. In jedem Fall erfolgte eine Kontrolle nach Ausbau des Targets mit Hilfe obiger Thoronmethode.

Für die Bestimmung der Wirkungsquerschnitte erwies es sich als günstig, das Lithiumtarget stufenweise zu verdicken und die Reaktionsausbeuten  $Y$  in Abhängigkeit von der Targetdicke  $d$  bei konstanter Energie zu messen. Man erhält einmal eine bessere Mittelung der schwankenden Reaktionsausbeuten dünner Targets und zum anderen kann man aus dem Kurvenverlauf  $Y(d)$  auf die Ausbeuten extrem dünner Targets schließen. Der Wirkungsquerschnitt für die jeweilige Protonen-Energie ergibt sich aus der Steigung der Kurve  $Y(d)$  im Nullpunkt (Fig. 1).

### 2.3 REGISTRIERUNG DER KERNREAKTIONEN

Zur Registrierung der Kernreaktionen diente eine  $\alpha$ -Nachweisapparatur mit (i) Szintillationszähler, (ii) Halbleiter-Detektoren. Es wurden Szintillationsschirme von 90 mm  $\phi$  aus ZnS in Verbindung mit einem SEV vom Typ M 12 FS 100 verwendet. Um die Reaktionsprodukte in einem möglichst großen Raumwinkel zu erfassen, wurde das Target dicht unter dem Schirm angeordnet. Noch günstiger war es, die Lichtschutzfolie des Szintillationsschirmes in ca 1 mm Abstand als Targetunterlage zu benutzen und die rückwärtig austretenden  $\alpha$ -Teilchen zu registrieren. Aus der Dicke der Folie und der Reichweite der  $\alpha$ -Teilchen in dem verwendeten Material ergab sich der maximal erfaßbare Raumwinkel. Durch Variation der Dicken dieser Unterlagen ließen sich die Reaktionen  ${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$  und  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$  auf Grund ihrer stark unterschiedlichen  $Q$ -Werte von 4.002 MeV bzw. 17.34 MeV leicht voneinander trennen.

Zur Registrierung der Kernreaktionen mit Hilfe eines Halbleiter-Detektors diente die gleiche Apparatur wie für die Dickenmessungen der Targets. Als Detektor wurde ein Oberflächenbarrieren-Detektor vom Typ A-30-1 vom ZfK Rossendorf in Verbindung mit einem 50-Kanal-Analysator verwendet. Die Targetunterlagen wurden in einem Abstand von 0.5 mm von der Detektoroberfläche bedampft und bestrahlt. Die mit dieser Anordnung maximal erfaßten Raumwinkel wurden durch Vergleich der Ausbeuten dicker Targets mit den entsprechenden Ausbeuten aus den Szintillations-Messungen ermittelt. Mit Hilfe des Halbleiter-Detektors wurden die Ausbeuten in Abhängigkeit von der Targetdicke bei konstanter Protonen-Energie gemessen (Fig. 1).

### 2.4 VAKUUM

Zur Hochvakuum-Erzeugung dienten 2 Öldiffusionspumpen vom Typ HVPO 120 mit je einem Ölfänger und einer speziellen Kühlfalle mit flüssigem Stickstoff. Die Kühlfallen verringerten sehr wesentlich die Targetverschmutzung durch Kräckprodukte organischer Dämpfe.

## 3. Ergebnisse

### 3.1 TARGETERMÜDUNG

Bei Bestrahlung frisch aufgedampfter Lithiumtargets verringerte sich die Reaktionsausbeute innerhalb der ersten 4 min bei einem Protonenstrom von 1  $\mu\text{A}$  bei 50 keV

um 3%/min und bei 30 keV um 4%/min. Nach einer Bestrahlungszeit von 20 min betrug die Abnahme bei 50 keV nur noch 2%/min und bei 30 keV 3%/min. Dieser Effekt ist in der Literatur als Targetermüdung bekannt und wird auf Verunreinigung der Oberfläche zurückgeführt. Um die Targetermüdung möglichst klein zu halten, wurde die Bestrahlungs- und Meßzeit kleiner als 2 min gewählt und anschließend das Target erneuert. Die Zeit, die zwischen Herstellung und Bestrahlung verging – z.B. für die Justierung des Targets – hatte keinen Einfluß auf die Ausbeute. Nach Wartezeiten von 3 min wurden die gleichen Ausbeuten gemessen wie nach 3 sec.

### 3.2 REAKTIONSAUSBEUTEN DICKER TARGETS

Die Reaktionsausbeuten dicker Lithiumtargets ( $30 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  bis  $40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) wurden für Protonen-Energien von 50 keV bis 23 keV gemessen. In Tabelle 1 sind die Protonen-Energien  $E_p$  im Laborsystem und die Ausbeuten  $Y_d$  der Reaktionen  ${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$  und  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$  in der üblichen Form „Zerfälle pro Proton“ angegeben. Diese Angabe bezieht sich auf die Zerfälle der Zwischenkerne  ${}^7\text{Be}$  und  ${}^8\text{Be}$ .

TABELLE 1  
Reaktionsausbeuten dicker Li-Targets und Wirkungsquerschnitte

$E_p$ (keV)	${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$		${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$	
	$Y_d$ a)	$\sigma(\mu\text{b})$	$Y_d$ a)	$\sigma(\mu\text{b})$
50	$525 \pm 36$	$72 \pm 11$	$196 \pm 10$	$2.4 \pm 0.3$
45	$236 \pm 19$	$40 \pm 6$	$89 \pm 5$	$1.3 \pm 0.2$
40	$105 \pm 10$	$20 \pm 4$	$40 \pm 3$	$0.66 \pm 0.10$
35	$39 \pm 4$	$7.8 \pm 1.6$	$15 \pm 1$	$0.26 \pm 0.05$
30	$13.0 \pm 1.5$	$2.8 \pm 0.7$	$4.7 \pm 0.4$	$0.09 \pm 0.02$
25	$2.5 \pm 0.4$	$0.8 \pm 0.2$	$1.0 \pm 0.1$	$0.024 \pm 0.005$
23			$0.50 \pm 0.06$	$0.013 \pm 0.003$

a) Zerfälle/ $10^{14}$  Protonen.

Mit Hilfe des Protonen-Bremsquerschnittes kann man nach Differenzierung der Ausbeutekurve  $Y_d(E_p)$  die Wirkungsquerschnitte berechnen. Da jedoch in der Literatur wenig zuverlässige Protonen-Bremsquerschnitte für Lithium im niederen Energiebereich vorhanden sind, wurden die Reaktionsausbeuten dünner Targets untersucht.

### 3.3 REAKTIONSAUSBEUTEN DÜNNER TARGETS UND WIRKUNGSQUERSCHNITTE

Aus den im Abschnitt 2.2 angeführten Gründen wurde das Lithiumtarget stufenweise verdickt und die Ausbeute  $Y$  in Abhängigkeit von der Schichtdicke  $d$  bei konstanter Protonen-Energie gemessen. Fig. 1 zeigt diese Abhängigkeit für 50 keV Protonen. Der Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  ergibt sich aus der Steigung dieser Kurve im Nullpunkt. In gleicher Weise wurden die Ausbeuten bei Protonen-Energien bis zu 25 keV untersucht. Die daraus ermittelten Wirkungsquerschnitte sind in Tabelle 1

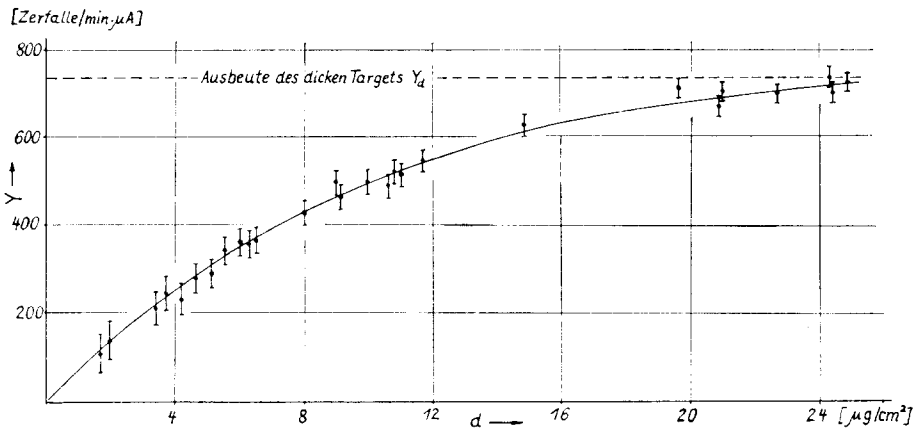


Fig. 1.  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$  Ausbeute in Abhängigkeit von der Targetdicke bei  $E_p = 50$  keV.

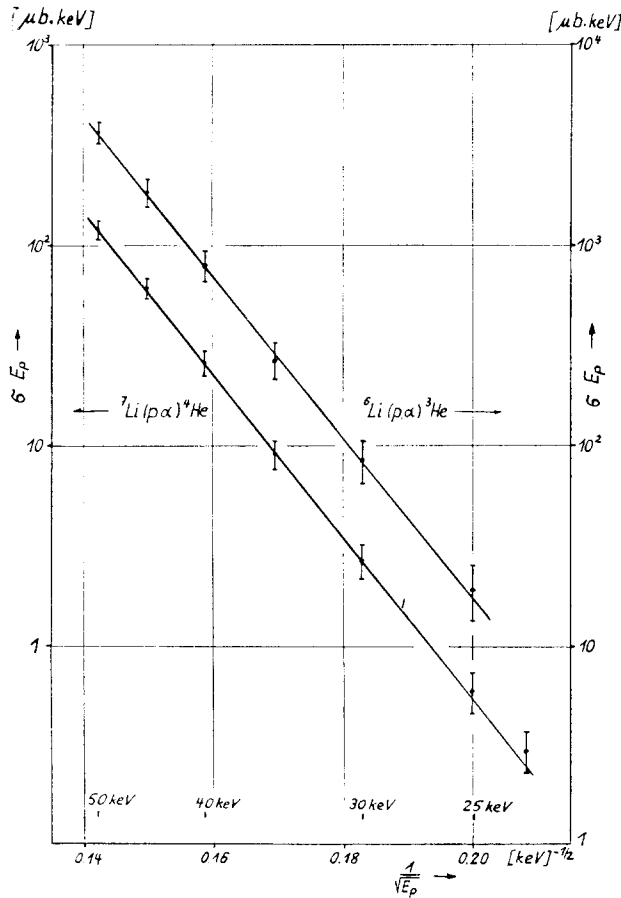


Fig. 2. Gamow-Diagramm für  ${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$  und  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$ .

angegeben. Das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte  $\sigma_{6\text{Li}}/\sigma_{7\text{Li}}$  bei gleicher Energie ist konstant  $30 \pm 10$ . Die Anregungsfunktionen beider Reaktionen besitzen die gleiche Energie-Abhängigkeit, wobei die Reaktion  ${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$  30 mal wahrscheinlicher ist als die Reaktion  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$ . Dies stimmt überein mit dem Verhältnis der von Rumbaugh *et al.* <sup>6)</sup> im Energiebereich von 200–600 keV gemessenen Wirkungsquerschnitte.

### 3.4 GAMOW-DIAGRAMM

Die Form der Energie-Abhängigkeit der Wirkungsquerschnitte wird im Gamow-Diagramm untersucht, indem man  $\ln(\sigma E)$  gegen  $1/\sqrt{E}$  aufträgt, denn nach der Theorie ist  $\sigma \propto (1/E) \exp(-B/\sqrt{E})$ . Es müßte sich eine Gerade ergeben, deren Steigung  $B$  ist. Die Analyse der experimentell ermittelten Wirkungsquerschnitte in Fig. 2 bestätigt diese Energie-Abhängigkeit. Die Steigungen der beiden Geraden betragen:

$$\text{für } {}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}, \quad B = 90 \pm 6 \text{ keV}^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{für } {}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}, \quad B = 91.5 \pm 4.5 \text{ keV}^{\frac{1}{2}}.$$

Berechnet man die Energie-Abhängigkeit der Wirkungsquerschnitte nach der WKB-Methode, so erhält man

$$B = 31.4\sqrt{m} z Z \text{ keV}^{\frac{1}{2}},$$

wobei  $m$ ,  $z$  Massen- und Kernladungszahl des Geschosses und  $Z$  die Kernladungszahl des Zielkernes sind. Für Protonenreaktionen mit Lithium errechnet sich mit  $m = 1$ ,  $z = 1$  und  $Z = 3$

$$B = 94.2 \text{ keV}^{\frac{1}{2}}.$$

Obige Berechnung gilt zunächst nur für geladene Partikeln mit dem Bahndrehimpuls  $l = 0$ , also z.B. für die Reaktionen  ${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$ . Für p-Wellen Protonen dagegen, wie sie bekanntlich für die Reaktionen  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$  in Frage kommen <sup>7)</sup>, muß man in  $\kappa(r)$  (modifizierte Wellenzahl) das Zentrifugal-Potential  $\hbar^2 l(l+1)/2\mu r^2$  berücksichtigen. Die Rechnung zeigt, daß dieses Potential die Transparenz des Potentialwalles verringert, dagegen die Energie-Abhängigkeit kaum beeinflußt, wenn seine Höhe die des Coulombpotentials nicht wesentlich übersteigt und die Geschossenergien weit unterhalb der Potentialschwellen liegen. Das trifft für die hier durchgeführten Protonenreaktionen mit Lithium zu, bei welchen die Coulombschwelle bei 1.6 MeV und die Zentrifugalschwelle ( $l = 1$ ) bei 5.6 MeV liegt. Der oben berechnete  $B$ -Wert gilt also für beide Reaktionen, was auch vom Experiment bestätigt wird.

### 3.5 VERGLEICH MIT LITERATURWERTEN

Unsere Meßwerte der Reaktion  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$  schließen sich gut an die von Herb *et al.* <sup>8)</sup> und von Harworth und King <sup>9)</sup> bei höheren Energien gemessenen Wirkungsquerschnitte an. Analysiert man die Werte insgesamt im Gamow-Diagramm, so

erhält man eine Gerade über 7 Größenordnungen mit  $B = 95.5 \pm 2.5 \text{ keV}^{\frac{1}{2}}$  (Fig. 3). Die von Sawyer und Phillips<sup>10)</sup> ermittelten Wirkungsquerschnitte für die Reaktion  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$  zeigen etwa die gleiche Energie-Abhängigkeit, ihre Absolutwerte jedoch liegen um den Faktor 2 höher. Das gilt auch für die Wirkungsquerschnitte der Reaktion  ${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{He}$ . Die Diskrepanz in den Absolutwerten ist hier noch etwas größer.

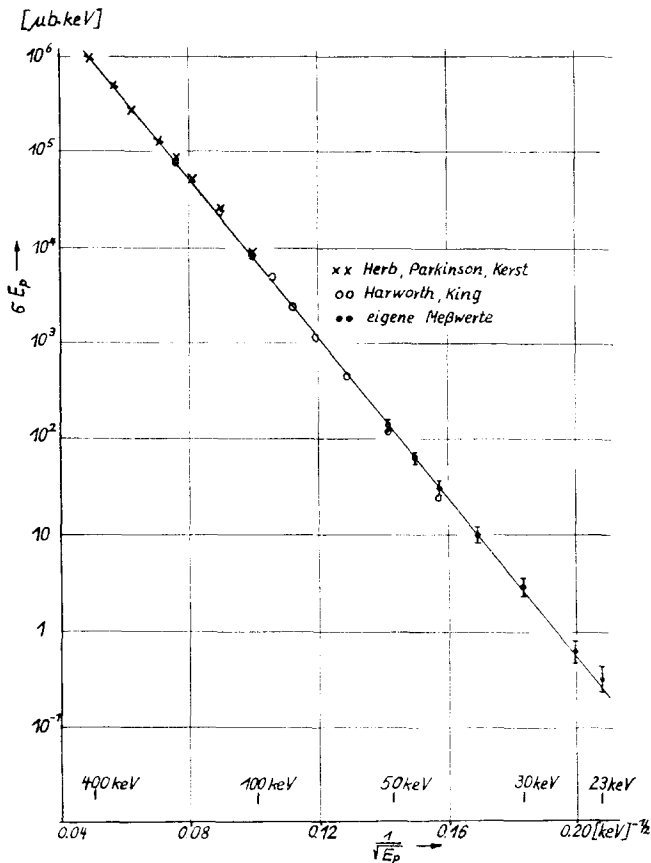


Fig. 3. Gamow-Diagramm für  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$ .

## 4. Diskussion

### 4.1 TARGETERMÜDUNG

Die Verringerung der Reaktionsausbeuten wird allgemein auf Verschmutzung der Target-Oberfläche durch Kräckprodukte, auf Restgas-Reaktionen und auf Zerstäubung von Targetmaterial zurückgeführt. Nach unseren Messungen an dicken Targets hat die Restgas-Atmosphäre innerhalb einer Bestrahlungszeit von 4 min keinen Einfluß auf die Ausbeute. Nach Untersuchungen von Marion *et al.*<sup>11)</sup> mit

Li-Targets und LiOH-Targets kann die Targetermüdung nicht hauptsächlich auf Verschmutzung der Oberfläche durch Kräckprodukte zurückgeführt werden. Die LiOH-Targets zeigten im Gegensatz zu den Metall-Targets keine Ermüdung, obwohl die Kohlenstoffverschmutzung die gleiche war. Eine Hydrierung des Targets durch Protonenbeschuß kann ebenfalls nicht entscheidend sein, da bei  $1\ \mu\text{A}$  Protonenstrom in 4 min auf die bestrahlte Stelle des Targets näherungsweise nur ein Wasserstoff-Atom auf 3000 Lithium-Atome kommt. Wir vermuten, daß mit der Strukturveränderung des dicken Targets bei Protonenbeschuß in geringem Maße der Protonen-Bremsquerschnitt, der erheblichen Einfluß auf die Ausbeute hat, erhöht wird. Nach einer Abschätzung verringert sich bei einer Einschussenergie von 50 keV die Ausbeute des dicken Targets um 10 %, wenn sich der Protonen-Bremsquerschnitt um nur 2 % erhöht. Auf eine Strukturabhängigkeit des Protonen-Bremsquerschnittes deuten Meßergebnisse hin, die bei unterschiedlicher Targetaufdampfung gewonnen wurden. Beispielsweise wurden bei Li-Schichten von etwa Sättigungsdicke kleine Unterschiede in der Reaktionsausbeute beobachtet, wenn sie auf verschiedene Unterlagen ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Folie, organische Folie) aufgedampft worden waren.

#### 4.2 WIRKUNGSQUERSCHNITTE

Bei der Bestimmung obiger Wirkungsquerschnitte spielte die Target-Präparation eine wesentliche Rolle. Sawyer und Phillips verwendeten für ihre Wirkungsquerschnitts-Messungen LiF-Targets von  $7\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$ . Für 50 keV Protonen sind das etwa 5 keV Targets; sie liefern etwa 50 % der Gesamtausbeute des dicken Targets. Die von ihnen angegebenen Wirkungsquerschnitte unterhalb 50 keV sind deshalb mehr oder weniger extrapolierte Werte. Bemerkenswert ist, daß der Abfall der Anregungskurve steiler wird, wenn Targets verwendet werden, in denen die Protonen-Abbremsung nicht mehr vernachlässigt werden darf.

Wir danken Herrn Professor Dr. H. Pose für die Möglichkeit der Durchführung dieser Arbeit sehr herzlich.

#### Literatur

- 1) N. Jarmie und J. D. Seagrave, Los Alamos Report 2014 (1956)
- 2) O. Fiedler, Exp. Tech. Phys., im Druck
- 3) J. Benveniste, A. Mitchell, C. Schrader und J. Zenger, Rev. Sci. Instr. **32** (1961) 927
- 4) O. Fiedler, Exp. Tech. Phys., im Druck
- 5) E. B. Sandell, Colorimetric determination of traces of metals, chemical analysis (Interscience Publ. New York, 1959) Vol. 3, p. 584
- 6) L. H. Rumbaugh, R. B. Roberts und L. R. Hafstad, Phys. Rev. **54** (1938) 657
- 7) F. Ajzenberg-Selove und T. Lauritsen, Nuclear Physics **11** (1959) 1
- 8) R. G. Herb, D. B. Parkinson und D. W. Kerst, Phys. Rev. **48** (1943) 118
- 9) L. J. Harworth und L. D. P. King, Phys. Rev. **54** (1938) 38
- 10) G. A. Sawyer und J. A. Phillips, Los Alamos Report 1578 (1953)
- 11) J. B. Marion, G. Weber und F. S. Mozer, Phys. Rev. **104** (1956) 1402