

Untersuchung der Reaktion $B^{10}(\alpha, p)C^{13}$ nach der Photoplattenmethode

Von A. PAPKOW

Aus dem Institut für Physik im Max-Planck-Institut für medizinische Forschung, Heidelberg
(Z. Naturforschg. **11a**, 776—782 [1956]; eingegangen am 30. Juli 1956)

Die Untersuchung der Kernreaktion $B^{10}(\alpha, p)C^{13}$ mit Po- α -Teilchen nach der Photoplattenmethode ergab, daß neben wesentlich energieärmeren nur eine lange Protonengruppe mit einer Energietönung $Q=4,10$ MeV sicher vorhanden ist. Die Richtungsverteilung dieser Gruppe ist von 0 bis ca. 90° nahezu isotrop, bei größeren Winkeln steigt die Protonenzahl an, erreicht bei 120° ein flaches Maximum und steigt von 160 bis 180° steil weiter.

Die Kernreaktion $B^{10}(\alpha, p)C^{13}$ ist von verschiedenen Autoren mehrmals untersucht worden. Die experimentellen Daten über die Protonengruppen aus dieser Kernreaktion, die entsprechenden Energietönungen Q und die errechneten Kernniveaus von C^{13} zeigen bis jetzt noch erhebliche Widersprüche. Ein kleiner Teil der bei der Reaktion entstehenden N^{14} -Zwischenkerne zerfällt so, daß sich ein C^{13} -Kern im Grundzustand bildet. Die hierzu gehörende Protonengruppe großer Energie ist schwach; bedeutend öfter kommen Protonen kleinerer Energie vor, die der Bildung von angeregten C^{13} -Kernen mit Niveaus bei ca. 3 MeV und mehr über dem Grundzustand entsprechen.

Einige Autoren fanden eine Protonengruppe mit einer Energietönung Q von ca. 3,3 MeV, die einem Niveau im C^{13} bei ca. 700 keV entspräche, deren Vorhandensein aber von anderen Autoren bezweifelt wurde. Auffällig ist schon, daß diese Gruppe offenbar nicht mit γ -Strahlung gekoppelt ist. Auch die Suche nach einem Isomer war ergebnislos. Der Zweifel wird dadurch verstärkt, daß bei anderen Kernreaktionen, die zum gleichen C^{13} -Kern führen, ebenfalls keine Hinweise auf die Existenz eines Niveaus im C^{13} bei 700 keV zu finden waren (Ausnahme: siehe Anm. ²⁴). In dem Spiegelkern N^{13} ist ein Kernniveau bei ca. 700 keV ebenfalls nicht bekannt.

Deswegen ist es interessant, nach einer anderen Methode noch einmal zu untersuchen, ob bei der Kernreaktion $B^{10}(\alpha, p)C^{13}$ eine Protonengruppe entsteht, die einer Bildung eines angeregten C^{13} -Kernes mit einem Niveau bei ca. 700 keV über dem Grundzustand entspricht. Es ist auch wichtig, die Winkelverteilung der Protonen genauer zu untersuchen.

1. Frühere Arbeiten über $B^{10}(\alpha, p)C^{13}$

Die $B^{10}(\alpha, p)C^{13}$ -Reaktion war eine der ersten, die von RUTHERFORD ¹ mit der Szintillationsmethode beobachtet wurde. Später wurde sie von BOTHE und FRÄNZ ^{2, 3} näher untersucht, wobei zwei wesentliche Verbesserungen eingeführt wurden: statt eines Szintillationsschirmes wurde zum Protonennachweis ein Geigerzähler und als Teilchenquelle ein Poloniumpräparat benutzt, das α -Teilchen mit einer Energie von 5,3 MeV ohne störende β - und γ -Strahlen liefert. Diese Untersuchungen zeigten, daß bei Bestrahlung von Bor mit Po- α -Teilchen zwei Protonengruppen entstehen, und zwar mit den Reichweiten nach vorn von 20 und 32 cm in Luft. Dies war der erste Fall, bei dem durch Bestrahlung eines Elementes mit α -Teilchen mehr als eine Protonengruppe gefunden worden war.

Bei weiteren Untersuchungen stellte BOTHE ⁴, der Po- α -Teilchen verwendete, eine schwache dritte Gruppe mit einer Reichweite bis 74 cm in Luft fest. FRÄNZ ⁵ beobachtete die entsprechende Gruppe bei Verwendung von α -Teilchen aus RaC' .

CHADWICK, CONSTABLE und POLLARD ⁶ fanden bei Verwendung von Po- α -Teilchen von 3,8 cm Reichweite Protonengruppen mit Reichweiten nach vorn von 16, 32 und 76 cm in Luft. Die von ihnen aus diesen Versuchen für die zwei längeren Protonengruppen berechneten Energietönungen Q betrugen 0,2 MeV und 3,2 MeV. Bei HEIDENREICH ⁷ ergaben sich bei Verwendung von Po- α -Teilchen drei Protonengruppen mit den Reichweiten 14, 30 und 76 cm in Luft. PATON ⁸ benutzte ThC' -Teilchen und fand bei 80° Protonengruppen mit den Reichweiten 25,5;

¹ E. RUTHERFORD u. J. CHADWICK, Phil. Mag. **42**, 809 [1921] und Nature, Lond. **113**, 457 [1924].

² W. BOTHE u. H. FRÄNZ, Z. Phys. **43**, 456 [1927].

³ W. BOTHE u. H. FRÄNZ, Z. Phys. **49**, 1 [1928].

⁴ W. BOTHE, Z. Phys. **63**, 381 [1931].

⁵ H. FRÄNZ, Z. Phys. **63**, 370 [1931].

⁶ J. CHADWICK, J. E. R. CONSTABLE u. E. C. POLLARD, Proc. Roy. Soc., Lond. A **130**, 463 [1931].

⁷ F. HEIDENREICH, Z. Phys. **86**, 675 [1933].

⁸ R. F. PATON, Z. Phys. **90**, 586 [1934].



37; 52 und 95 cm in Luft. Die aus diesen Reichweiten berechneten Q -Werte betrugen $-1,86$; $-0,78$; $0,35$ und $3,1$ MeV. MILLER, DUNCANSON und MAY⁹ beobachteten Protonengruppen, die Energietönungen von $Q = 0,1$; $0,4$ und $3,1$ MeV entsprachen.

Zusammenfassend kann man über die Arbeiten bis ungefähr 1937 sagen: Nachdem von BOTHE die Protonengruppe 74 cm in Luft für Po- α -Teilchen gefunden worden war, deren Energietönung ca. 3,1 MeV entsprach, haben eine Reihe anderer Autoren das Vorhandensein dieser Gruppe bestätigt. Es wurden auch die den kürzeren Gruppen entsprechenden γ -Strahlen des C^{13} -Kernes beobachtet¹⁰. Die Errechnung aus den bekannten Kernmassen von B^{10} , C^{13} , α -Teilchen und Proton ergab jedoch, daß die Energietönung Q der Kernreaktion $B^{10}(\alpha, p)C^{13}$, die einem Übergang in den Grundzustand des C^{13} -Kernes entspricht, rund 4 MeV hätte sein sollen, während sie nach dem Experiment nur 3,1 MeV betrug. Deshalb wurde vermutet¹¹, daß der mit einer Energietönung von 3,1 MeV entstandene C^{13} -Kern sich in einem angeregten Zustand C^{13*} befindet und eine längere Lebensdauer besitzt (metastabiler Zustand) und daß noch eine schwache Protonengruppe mit noch größerer Reichweite, die einem Übergang in den Grundzustand des C^{13} -Kernes entspricht, vorhanden ist. Die Suche nach dieser schwachen Gruppe wurde von MAIER-LEIBNITZ und MAURER¹² mit Po- α -Strahlen durchgeführt. Wegen sehr kleiner Intensität der gesuchten Protonengruppe mußte eine dicke Borschicht dicht an das Po-Präparat gebracht werden. Die von MAIER-LEIBNITZ und MAURER gefundene Kurve zeigte eine sehr schwache Protonengruppe mit der Reichweite von 91 cm in Luft. Die entsprechende Energietönung betrug 3,7 MeV. BOTHE und MAIER-LEIBNITZ¹¹ haben diese Ergebnisse diskutiert und wie oben erwähnt gedeutet.

JOLIOT und ZLOTOWSKI¹³ untersuchten die $B(\alpha, p)C$ -Reaktion in einer WILSON-Kammer, die sich in einem starken Magnetfeld befand. BLAU und WAMBACHER^{14, 15} benutzten als erste die Photoplatte zur Registrierung von Protonen aus Kernreaktionen.

Diese Methode wurde allmählich verfeinert und die Platten wesentlich verbessert.

JURKA¹⁶ verwendete die photographische Platte für die Untersuchung der Reaktion $B^{10}(\alpha, p)C^{13}$ bei 0° und 90° . Sie konnte die lange Protonengruppe bei 90° in zwei deutlich getrennte Gruppen auflösen.

JENTSCHKE¹⁷ fand ebenfalls zwei lange Protonengruppen mit den Reichweiten 91 und 82 cm in Luft für Po- α . CREAGAN^{18, 19} benutzte künstlich beschleunigte α -Teilchen von 7,45 und 6,64 MeV und angereichertes B^{10} als Target. Er fand nur eine schwache, sehr stark verwaschene Protonengruppe großer Energie.

ROY²⁰ untersuchte die Winkelverteilung von Protonen aus einer mit Po- α -Teilchen bestrahlten B-Schicht von 0,8 cm Luftäquivalent in einer WILSON-Kammer. Von insgesamt 86 beobachteten Protonen gehörten 12 zu einer Gruppe, die einem $Q = 3,1$ MeV entspricht. Es wurden aber keine Protonen gefunden, die einem Q bei ca. 4 MeV zugeschrieben werden konnten.

PERKIN²¹ arbeitet mit Photoplaten (Ilford C 2), Po- α -Teilchen und dünnem B-Target. Er fand Protonengruppen, die den Q -Werten von 4,08; 3,35; 0,65 und $-0,57$ entsprechen. Die Intensitäten der vier ersten Gruppen bei $E_\alpha = 4,3$ MeV waren: 10 : 1 : 100 : 50.

SLÄTIS, HJALMAR und CARLSON²² untersuchten die Reaktion $B^{10}(\alpha, p)C^{13}$ mit Hilfe von Po- α -Teilchen, sehr dünner B-Schicht und Kernphotoplaten. Die Expositionsdauer betrug nur 16 Stunden. Es wurden 200 Protonenspuren beobachtet; nur ein Proton hatte die Energie, die einem $Q = 3,2$ MeV entsprach, und kein einziges Proton konnte nachgewiesen werden, das mehr als $Q = 3,2$ MeV entsprach.

FRYE und WIEDENBECK²³ untersuchten durch Analyse im Magnetfeld die aus $B^{10}(\alpha, p)C^{13}$ kommenden Protonen, die sie mit einer Photoplatte registrierten. Es wurden folgende Q -Werte gemessen: ca. 3,8 MeV; 0,24 MeV und $-0,22$ MeV. Die Intensität der Protonengruppe großer Energie war aber zu klein.

⁹ H. MILLER, W. E. DUNCANSON u. A. N. MAY, Proc. Cambr. Phil. Soc. **30**, 549 [1934].

¹⁰ H. BECKER u. W. BOTHE, Naturwiss. **20**, 349 [1932].

¹¹ W. BOTHE u. H. MAIER-LEIBNITZ, Z. Phys. **107**, 513 [1937].

¹² H. MAIER-LEIBNITZ u. W. MAURER, Z. Phys. **107**, 509 [1937].

¹³ F. JOLIOT u. J. ZLOTOWSKI, J. Phys. Radium **9**, 393 [1938].

¹⁴ M. BLAU u. H. WAMBACHER, Z. Phys. **34**, 285 [1925].

¹⁵ M. BLAU u. H. WAMBACHER, Akad. Wiss. Wien **134**, 7 [1934].

¹⁶ MARIA JURKA, Diss. Wien 1939; O. MERHAUT, Phys. Z. **41**, 528 [1940].

¹⁷ W. JENTSCHKE, Phys. Z. **41**, 524 [1940].

¹⁸ R. J. CREAGAN, Phys. Rev. **75**, 1292 [1949].

¹⁹ R. J. CREAGAN, Phys. Rev. **76**, 1769 [1949].

²⁰ R. ROY, Phys. Rev. **75**, 1775 [1949].

²¹ J. L. PERKIN, Phys. Rev. **79**, 175 [1950].

²² H. SLÄTIS, E. HJALMAR u. R. CARLSON, Phys. Rev. **81**, 641 [1951] und Ark. Fys. **3**, 315 [1952].

²³ G. FRYE u. M. L. WIEDENBECK, Phys. Rev. **82**, 960 [1951].

BERLMAN²⁴ untersuchte die Reaktion $C^{12}(d, p)C^{13}$ und fand bei Benutzung von 10 MeV-Deuteronen zwei sehr flache und schwache Protonenmaxima bei 115° , die durch Vorhandensein eines Kernniveaus in C^{13} bei ca. 1 MeV erklärt werden können.

2. Versuchsanordnung

Die folgende Untersuchung sollte die Existenz des C^{13} -Niveaus bei 0,7 MeV klären. Die Protonengruppe, die der Bildung dieses Niveaus entsprechen sollte, müßte in der Nähe der Protonengruppe der maximalen Energie liegen. Um eine Auflösung dieser zwei Gruppen zu erhalten, müssen einige Bedingungen erfüllt sein: die α -Teilchen müssen von möglichst homogener Energie sein, die Dicke der Borschicht (erwünscht ist ein an B^{10} angereichertes Target) klein und die Geometrie gut sein.

α -Teilchenquelle. Als α -Teilchenquelle dienten Poloniumpräparate, die auf Silberscheiben von ca. 8 mm Durchmesser niedergeschlagen waren²⁵. Mit Hilfe einer Ionisationskammer nach FRÄNZ²⁶ wurde die BRAGGSche Kurve aufgenommen. Wenn die Kurve keine Verschmierung der Reichweiten durch Absorption der α -Teilchen im Präparat selbst zeigte, wurde das Präparat in die Apparatur eingelegt, andernfalls in Salpetersäure gelöst und neu zurückgewonnen. Die Anfangsaktivitäten der verwendeten Präparate lagen zwischen 15 und 35 mC. Nach jedem Versuch wurde das Präparat aus der Versuchskammer genommen und wieder auf Reichweitenverschmierung nachkontrolliert.

Borschichten. Es ist nicht einfach, dünne Schichten aus reinem Bor herzustellen. Die ersten Versuchsschichten wurden auf folgende Weise hergestellt: Ein Wolframfaden wurde in einem Gemisch von Bortrichlorid und Wasserstoff zum Glühen gebracht, wobei der Draht sich mit einer reinen Borschicht bedeckte. Nach Durchspülen der Apparatur mit Wasserstoff und gründlichem Auspumpen wurde der Faden zur Weißglut gebracht. Dabei dampfte das Bor von dem Glühfaden auf eine Goldfolie. Die Heizung des Fadens muß abgeschaltet werden, bevor das ganze Bor abgedampft ist, andernfalls bedeckt sich die Borschicht mit Wolfram. Auf diese Weise konnten dünne Borschichten auf 1 bis 2 μ dicke Goldfolien aufgebracht werden. Solche Schichten, die den einzigen Nachteil hatten, nur zu 20% aus B^{10} zu bestehen, wurden für Vorversuche verwendet. Es ist uns später gelungen, reine B^{10} -Schichten auf 2 μ Goldfolien aus Harwell zu bekommen, die für die weiteren Versuche benutzt wurden.

Die Versuchsanordnung besteht aus einer Messingkammer von 6,5 cm Durchmesser und 5,0 cm Höhe und

ist mit 13 Fenstern von 0,6 cm Breite und 2,5 cm Höhe versehen (Abb. 1). Vor den Fenstern, die mit einer Kupferfolie von 3,9 cm Luftäquivalent verschlossen sind, befinden sich außerhalb der Kammer im Vakuum Plattenpaare, die Protonen mit den mittleren Winkeln von 0° ; $29,5^\circ$; 45° ; $67,5^\circ$; 90° ; $112,5^\circ$; 135° und 157° registrieren. Als Platten wurden in der Regel Ilford C 2-100 μ -Platten benutzt. Einige Versuche wurden auch mit Ilford G 5-Platten durchgeführt.

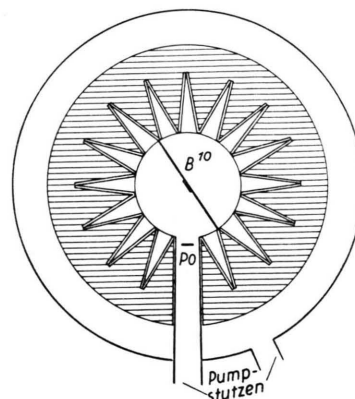


Abb. 1. Versuchsanordnung. Protonen aus B^{10} kommen durch eine 3,9 cm Luftäquivalent Cu-Folie und werden in der Außenkammer in 15 senkrecht stehenden Plattenpaaren registriert.

Die Messingkammer ist durch ein diametrales Messingblech in zwei Teile geteilt. Das Messingblech hat in der Mitte ein Fenster, das mit einer 2 μ dicken Goldfolie verschlossen ist. In der Mitte der Goldfolie wurde eine ca. 180 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ dicke B^{10} -Schicht (0,15 cm Luftäquivalent) aufgetragen, die 1 cm lang und 0,4 cm breit war. Das Poloniumpräparat befand sich im Messingrohr, das auch als Pumpstutzen zur Evakuierung der Kammer diente. Der mittlere Abstand Borschicht–Poloniumpräparat betrug 5 cm.

Um die volle Energie der Po- α -Teilchen auszunützen, wurden die Po-Präparate nicht mit einer dünnen Folie zugedeckt. Durch Aggregatrückstoß wurden alle Teile der inneren Kammer mit Po verseucht. Um diese Verseuchung mit Polonium von den Photoplaten fernzuhalten, wurde die Außenkammer mit Photoplaten, die durch die Kupferfolie luftdicht von der Innenkammer getrennt ist, durch einen zweiten Stutzen unabhängig von der Innenkammer evakuiert. Bei den Vorversuchen neigte die Photoschicht dazu, bei langer Belichtungszeit, die zwischen 8 und 32 Tagen lag, abzublättern. Dies kam aber bei den Hauptversuchen nur selten vor, da die Außenkammer nicht so stark ausgepumpt wurde, damit etwas Wasserdampf darin verblieb. Die bestrahlten Platten wurden nach der Temperaturmethode von DILLWORTH in ID 19 entwickelt. Fixieren, Wässern und Trocknen wurde nach der Firmenvorschrift durchgeführt.

²⁴ I. BERLMAN, Phys. Rev. **79**, 411 [1950].

²⁵ F. PANETH u. W. BOTHE, A. Stählers Handbuch der Arbeitsmethoden in der anorg. Chemie, Bd. 2, S. 1027.

²⁶ H. FRÄNZ, Z. Phys. **44**, 757 [1927].

Auswertung der Photoplatten. Zur Durchmusterung und Ausmessung der Photoplatten stand ein Binokular-Mikroskop zur Verfügung. Die Suche nach Protonenspuren wurde mit einer Vergrößerung von ca. 200 durchgeführt. Zur Messung der Spurenlängen wurden Leitz-Objektive KS 45 (trocken), KS 53 (Fluorid-Öl-immersion) und ein Meßokular 6 \times verwendet. Einige Protonenspuren in C 2-Photoplatten, wahrscheinlich die, welche zu Anfang der Bestrahlung entstehen, zeigen wegen „Fading“ einen schlecht zu erkennenden Anfang. Um den Anfang solcher Spuren genauer festzustellen, wurde das Objektiv KS 100 (Apochromat Öl-immersion) verwendet, welches kleinere Tiefenschärfe besitzt. Aus den gemessenen Längen und Tiefen der Spuren wurden unter Berücksichtigung des Schrumpfungsfaktors der Emulsion die tatsächliche Spurenlänge ausgerechnet. Jede Spur, die eine größere Länge besaß, wurde mindestens von zwei verschiedenen Beobachtern gemessen.

3. Meßergebnisse

Einige Meßergebnisse, die mit der Versuchsanordnung Abb. 1 gewonnen wurden, sind in Abb. 2, 3 und 4 angegeben. Die Abszissen geben die Reichweite der Protonenspuren in Skalenteilen der Okularmikrometer an. Nach der Korrektur für die Absorption der Protonen in der Borschicht, der Kupfertrennfolie und für einige Winkel auch in der Goldunterlage, konnte die Umrechnung in die Protonenenergie erfolgen, wobei die Energie-Reichweite-Beziehung für Protonen nach ROTBLATT²⁷ benutzt wurde.

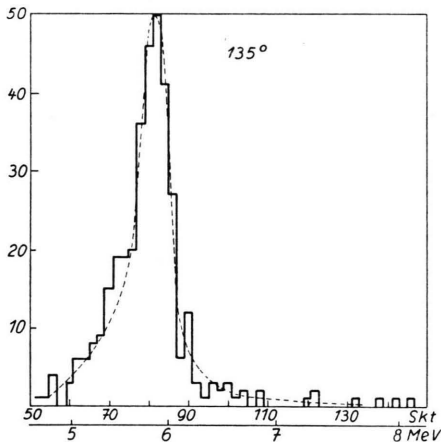


Abb. 2. Reichweiteverteilung der Protonen großer Energie bei 135°.

Aus den Reichweitemessungen folgt, daß nur eine Protonengruppe großer Energie deutlich zu sehen ist (siehe z. B. Abb. 2, Reichweitenverteilung bei 135°).

²⁷ J. ROTBLATT, Nature, Lond. **167**, 550 [1951].

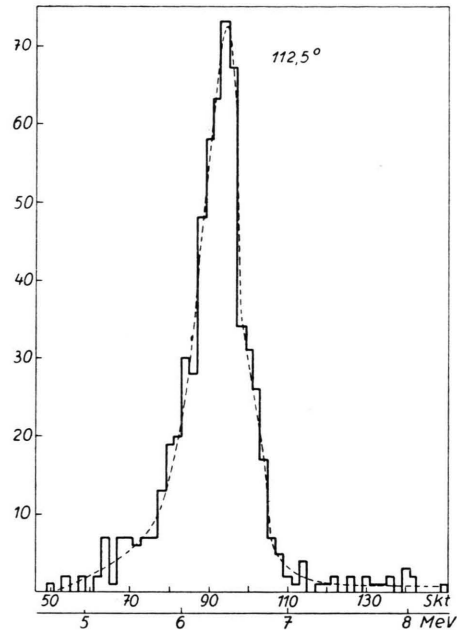


Abb. 3. Reichweiteverteilung bei 112,5°.

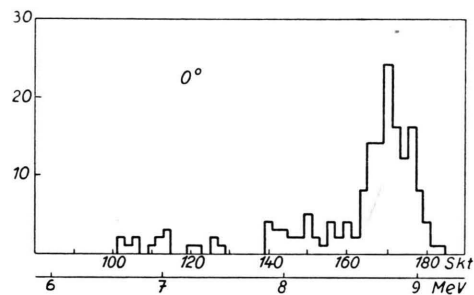


Abb. 4. Reichweiteverteilung bei 0°.

und Abb. 3, Reichweitenverteilung bei 112,5°). Auch bei anderen Winkeln ist nur eine Protonengruppe, die dem Übergang zum Grundzustand des Kernes C^{13} entspricht, vorhanden. Protonen, die einem Übergang zu einem 700 keV-Niveau in C^{12} entsprechen, sind nicht beobachtet worden. Bei 0° (Abb. 4) sind im Gegensatz zu anderen Winkeln einige Protonen kürzerer Reichweite vorhanden. Sie können aber dadurch erklärt werden, daß sie von den alten Protonenspuren herrühren, die wegen Verblassens der Silberkörner am Anfang der Spur an der Plattenoberfläche zu kurz gemessen wurden.

Anfänglich waren in einer Versuchsanordnung, bei welcher zur Trennung der zwei Kammern statt der später verwendeten Kupferfolie mehrere Glim-

merplättchen benutzt worden waren, auch kürzere Protonenspuren beobachtet worden. Sie entstanden vermutlich aus den Kernreaktionen $\text{Al}^{27}(\alpha, p)\text{Si}^{30}$ und $\text{F}^{19}(\alpha, p)\text{Ne}^{22}$ im Glimmer.

Die aus den Messungen von extrapolierten Reichweiten berechneten Energietönungen Q für die längste Protonengruppe betragen: für 135° $Q=4,09$; für $112,5^\circ$ $Q=4,16$; für 90° $Q=4,15$; für $67,5^\circ$ $Q=4,12$; für 45° $Q=4,09$ und für 0° $Q=3,98$ MeV, die gut miteinander übereinstimmen. Auffallend ist, daß, wie auch bei anderen Autoren, die Messungen bei 0° einen etwas kleineren Q -Wert ergeben.

4. Diskussion

Vergleich mit Messungen anderer Autoren. Die Gesamtzahl der in der vorliegenden Arbeit gemessenen Protonenspuren beträgt etwa 5000; die Anzahl der Spuren großer Reichweite, die sicher zum Übergang in den Grundzustand des C^{13} -Kernes gehören, war etwa 2000. Bei anderen Autoren, die Protonenspuren aus der Reaktion $\text{B}^{10}(\alpha, p)\text{C}^{13}$ in der WILSON-Kammer oder in Kernphotoplatten gemessen haben, war die mit den vorliegenden Messungen verglichene Protonenzahl viel kleiner, so z. B. bei JOLIOT-ZLOTOWSKI 17, bei JENTSCHKE 8 und bei SLÄTIS nur 1 Proton großer Energie. Größeres statistisches Material findet sich nur in den Arbeiten von JURKA und PERKIN (Photoplatten) und CREAGAN (Proportionalzähler). JURKA fand bei 0° 81 Protonenspuren, die dem Übergang zum Grundzustand, und 730, die dem Übergang zum fraglichen Niveau bei 700 keV zugeschrieben wurden; bei 90° 18 bzw. 139 Spuren. PERKIN untersuchte insgesamt 4000 Spuren. Die gemessene Zahl der Protonen der beiden längsten Gruppen ist nicht angegeben, aus der relativen Intensität und der von PERKIN angegebenen Winkelverteilung kann sie auf ca. 200 bzw. 20 geschätzt werden. Die kleine Anzahl der Protonenspuren, ca. 20 bei allen Winkeln, läßt es nicht zu, mit Sicherheit auf die Existenz des 700 keV-Niveaus zu schließen; diese Protonen könnten leicht aus Verunreinigungen kommen oder durch Fading am Anfang der längeren Spuren vorgetäuscht werden. CREAGAN, der mit einer Apparatur arbeitete, bei welcher kein Fading vor-

kommen kann, fand auch keine Protonengruppe mit $Q=3,35$ MeV. Aus diesen Betrachtungen zusammen mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit geht hervor, daß es zur Zeit keine sicheren Daten gibt, die für das Vorhandensein eines Niveaus im C^{13} bei ca. 700 keV sprechen; dieses Niveau existiert sehr wahrscheinlich nicht.

Q-Werte. Aus den in Abschnitt 4 angegebenen Meßergebnissen bei 135° ; $112,5^\circ$; 90° ; $67,5^\circ$; 45° und 0° bekommt man folgenden Mittelwert für die Energietönung Q des Prozesses $\text{B}^{10}(\alpha, p)\text{C}^{13}$:

$$Q = 4,10 \pm 0,03 \text{ MeV.}$$

Der von PERKIN gefundene Q -Wert betrug $4,08 \pm 0,12$ MeV, der von CREAGAN $4,07 \pm 0,2$ MeV. VAN PATER und WHALING²⁸ nahmen als gewogenen Mittelwert aus einigen Arbeiten^{13, 16, 17, 19, 21} $Q = 4,08 \pm 0,10$ MeV an, SHIRE und andere²⁹, die mit künstlich beschleunigten He-Ionen von 1–2 MeV arbeiteten, erhielten $Q = 4,13 \pm 0,02$ MeV. Wenn man nach LI, WHALING, FOWLER und LAURITSEN³⁰ folgende Massen für die in der Reaktion $\text{B}^{10}(\alpha, p)\text{C}^{13}$ beteiligten Kerne annimmt:

$$\text{H}^1 = 1,008142 \pm 0,000003,$$

$$\text{He}^4 = 4,003843 \pm 0,000015,$$

$$\text{B}^{10} = 10,016114 \pm 0,000028$$

$$\text{und } \text{C}^{13} = 13,007475 \pm 0,000014,$$

kommt man auf $Q = 4,071 \pm 0,058$ MeV. Dieser aus Kernmassen berechnete Q -Wert stimmt mit den gemessenen Q -Werten gut überein.

5. Die Richtungsverteilung

Vergleicht man die Zahl der gemessenen Protonen der längsten Gruppen bei 0° , 45° , 90° , $112,5^\circ$ und 135° , so erkennt man, daß diese Zahl von 0 bis 90° sich nur wenig ändert, dann aber bei $112,5^\circ$ und 135° stark ansteigt. Würde die Kernreaktion $\text{B}^{10}(\alpha, p)\text{C}^{13}$ nur über einen Zwischenkern N^{14} verlaufen, dann sollte dieser starke Anstieg nicht vorhanden sein. MADANSKY und OVEN³¹ haben einen „heavy particle stripping“-Mechanismus für Kernreaktionen diskutiert und darauf hingewiesen, daß bei solchem „stripping“ eine wesentlich größere Zahl von Protonen nach hinten ausgesandt werden sollte. Diese Autoren geben als Beispiel solches „heavy

²⁸ D. M. VAN PATER u. W. WHALING, Rev. Mod. Phys. **26**, 402 [1954].

²⁹ E. A. SHIRE, J. R. WORMELD, G. LINDSAY-JONES, A. LINDEN u. A. G. STANLEY, Phil. Mag. **44**, 1197 [1953].

³⁰ C. W. LI, W. WHALING, W. A. FOWLER u. C. C. LAURITSEN, Phys. Rev. **83**, 512 [1951].

³¹ L. MADANSKY u. G. E. OVEN, Phys. Rev. **99**, 1608 [1955].

particle stripping“ die Winkelverteilung für eine Reaktion $Be^9(\alpha, n)C^{12}$ an.

Aus diesen Gründen war es sehr interessant, die Zahl der Protonen nicht nur bei einigen Winkeln zu messen, sondern die Messungen bei möglichst vielen durchzuführen, besonders aber bei Winkeln in der Nähe von 180° .

Die Versuchsanordnung zur Ermittlung der Richtungsverteilung der längsten Protonengruppe ist in Abb. 5 oben skizziert. Sie besteht aus einer Messkammer mit zwei sehr breiten, ca. je 170° umfassenden Fenstern, die mit Kupferfolien verschlossen sind. Durch ein Messingblech ist die Kammer in zwei Teile geteilt.

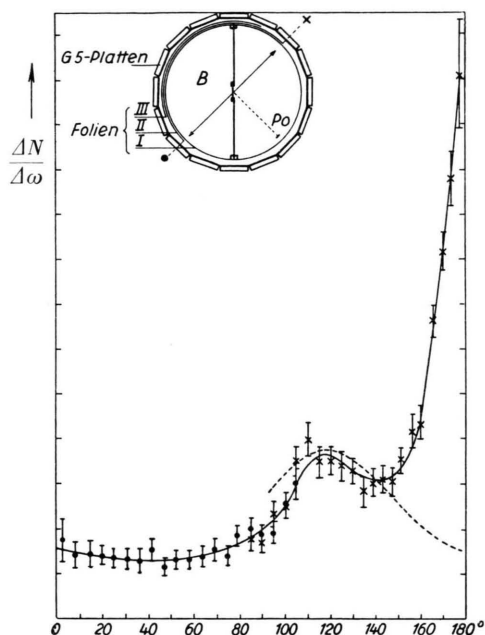


Abb. 5. Oben: Versuchsanordnung zur Messung der Richtungsverteilung. Unten: Richtungsverteilung der Protonen großer Energie aus der Kernreaktion $B^{10}(\alpha, p)C^{13}$.
 Punktirt: Theoretische Kurve nach KRETSCHMAR bei $l=2$;
 $R_2=4,95 \cdot 10^{-13}$ cm.

Das Messingblech hat in der Mitte eine Öffnung, die durch eine mit ca. $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ B^{10} bedeckte, 2μ dicke Goldfolie verschlossen ist. Bei Po befindet sich eine Poloniumquelle, die auf einer Seite der Scheibe von 2 mm Durchmesser niedergeschlagen ist. Die aus der B^{10} -Schicht kommenden Protonen können entweder durch die Goldfolie in die linke Hälfte der Kammer kommen, oder, ohne die Goldfolie zu durchlaufen, in die rechte Hälfte der Kammer gelangen.

Die Kupferfolien I, II und III sind so bemessen, daß die Protonen kürzerer Reichweite aus $B^{10}(\alpha, p)C^{13}$ nicht in die Photoplatten gelangen können. Die Photoplatten vom Typ Ilford G 5, $1'' \times 3''$, 200μ , sind besonders behandelt, um die Elektronenempfindlichkeit stark zu

unterdrücken, ohne daß die Protonenempfindlichkeit beeinflußt wird. (Hierzu siehe besondere Notiz³².) Die Glasunterlage jeder Platte ist in acht Stücke zerschnitten und die Platten so angebrochen, daß sie zu einem halbkreisähnlichen Gürtel zusammengebogen werden können, wobei die Emulsionsschicht als Bindemittel dient, das alle acht Streifen zusammenhält.

Nach Entwickeln, Fixieren, Wässern und Trocknen der Platten wurden sie wieder eingeebnet, in eine Metallfassung zusammen mit einem für die bequemere Winkelmessung extra angefertigten Koordinatennetz gefaßt und die Protonenzahl bei verschiedenen Winkeln ausgemessen.

Die Meßergebnisse über die Richtungsverteilung sind in Abb. 5 zusammengestellt, wobei die Meßwerte der linken Kammerhälfte durch Kreise, die der rechten durch Kreuze dargestellt sind. Die Winkel sind auf das Schwerpunktsystem umgerechnet. Die Ordinaten sind relative Protonenzahlen pro Raumwinkeleinheit, ebenfalls auf das Schwerpunktsystem umgerechnet. Es muß noch erwähnt werden, daß bei 175° eine besondere Korrektur in Höhe von 20% angebracht ist, die die Abdeckung der Photoplatte durch die Po-Scheibe berücksichtigt. Die Zahl der für die Winkelverteilung ausgemessenen Protonenspuren beträgt etwa 5000.

Will man die Richtungsverteilung der Protonen mit Messungen anderer Autoren vergleichen, so liegt zum Vergleich nur die Arbeit von PERKIN vor. Zwischen ca. 35 und 130° haben beide Kurven im wesentlichen den gleichen Verlauf. PERKIN hat ein Maximum bei 130° , wir bei 120° . Von 130° bis 150° fällt die Protonenintensität ab. Ein wesentlicher Unterschied besteht aber bei kleinen und besonders bei sehr großen Winkeln, die PERKIN nur bis 150° untersucht hat.

6. Diskussion der Richtungsverteilung

Die in Abb. 5 dargestellte Richtungsverteilungskurve hat deutlich drei verschiedene Winkelbereiche. Im Winkelbereich von 0 bis ca. 90° ist die Richtungsverteilung nahezu isotrop, im Bereich von ca. 90 bis ca. 150° steigt die Protonenzahl pro Raumwinkeleinheit erst mäßig stark an, erreicht bei ca. 115 bis 120° ein flaches Maximum und fällt dann langsam ab, bis schließlich bei ca. 150° ein neuer, sehr steiler Anstieg der Kurve beginnt, der wahrscheinlich bis 180° anhält.

Man kann annehmen, daß der isotrope Verlauf der Kurve bis 90° durch Bildung und nachträglichen

³² A. PAKOW, Z. Naturforschg. **11 a**, 758 [1956].

Zerfall des Zwischenkernes N^{14} zu deuten ist, daß aber bei größeren Winkeln zu dem Zerfall über den Zwischenkern noch andere Prozesse hinzutreten, die zusätzliche Protonen liefern. Als einer dieser Prozesse kommt das „heavy particle stripping“ nach MADANSKY in Frage. KRETSCHMAR³³ hat die Richtungsverteilung der längsten Protonengruppe der Kernreaktion $B^{10}(\alpha, p)C^{13}$ bei $E = 5,3$ MeV für den „stripping“-Mechanismus ausgerechnet. Diese theoretische Kurve steigt erst steil bei ca. 90° , dann flacher an, erreicht bei ca. 130° ein flaches Maximum und fällt dann bis 180° sehr langsam ab. Im Bereich von 90° bis ca. 140° stimmt unsere experimentelle Kurve mit der von KRETSCHMAR unter Voraussetzung von $l = 2$, $R_2 = 5,0 \cdot 10^{-13}$ cm (l = Bahndrehimpuls des α -Teilchens, R_2 = Wechselwirkungsradius) errechneten Kurve befriedigend überein. Der weitere Anstieg der Kurve von 160° an ist aber schwer durch den „stripping“-Mechanismus zu erklären. Sucht man andere Erklärungen für die überschüssige Protonenzahl bei großen Winkeln, so stößt man auf erhebliche Schwierigkeiten. Die Annahme, daß es sich hier um sogenannte „natürliche H-Teilchen“ handelt, kann nicht aufrechterhalten werden, weil solche Protonen eine Energie von höchstens 3,5 MeV haben und in den Cu-Folien absorbiert

werden sollten. Es können auch keine Protonen aus anderen Kernreaktionen aus evtl. Beimischungen am Target oder an der Trennwand sein, weil erstens keine konkurrenzfähigen Reaktionen mit großem Q bekannt sind, und weil man zweitens, auch wenn das der Fall wäre, nicht ohne weiteres verstehen kann, warum die Protonen nach rückwärts so stark gebündelt sind.

Das Verhältnis der differentiellen Wirkungsquerschnitte für Zwischenkern- und Stripping-Reaktion kann aus der Richtungsverteilungskurve ermittelt werden, wenn man annimmt, daß die Richtungsverteilung für die Protonen aus dem Zwischenkern N^{14} symmetrisch um 90° ist. Man erhält

$$\sigma_1 : \sigma_2 = 2 : 1,$$

wenn σ_1 der differentielle Wirkungsquerschnitt für die Zwischenkernreaktion und σ_2 der für „stripping“ ist. Der Prozentsatz des durch „stripping“ und Zwischenkernreaktionen nicht erklärbaren Protonenüberschusses bei großen Winkeln beträgt ca. 7 bis 9% der Gesamtintensität.

Herrn Prof. Dr. W. BOTHE danke ich herzlich für wertvolle Anregungen bei der Durchführung der vorstehenden Arbeit.

Für die Untersuchung wurden Apparate mitbenutzt, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft dankenswerterweise zur Verfügung gestellt wurden.

³³ M. KRETSCHMAR, private Mitteilung.

Klassifikation von Relaxationserscheinungen in Kristallen

Von G. FALK und J. MEIXNER

Aus dem Institut für theoretische Physik der Technischen Hochschule Aachen
(Z. Naturforschg. 11 a, 782—791 [1956]; eingegangen am 20. Juli 1956)

Relaxationserscheinungen in Kristallen werden im allgemeinen durch tensorielle innere Variable beschrieben. Mit gruppentheoretischen Hilfsmitteln werden die inneren Variablen hinsichtlich ihrer Transformationseigenschaften gegenüber der Symmetriegruppe des Kristalls klassifiziert. Die allgemeinen Ergebnisse werden für mechanisch-thermische Relaxationserscheinungen in isotropen Körpern sowie in Repräsentanten der einzelnen Kristallsysteme diskutiert.

I. Allgemeine Theorie

Die thermodynamische Theorie der elastischen Relaxationserscheinungen geht aus von der Voraussetzung, daß sich der Zustand eines homogenen Materials, das Relaxationseigenschaften besitzt, in jedem Augenblick durch Angabe der spezifischen Entropie s und der Komponenten des Dehnungstensors ε_{ik} (bzw. der Temperatur T und der Komponenten des Spannungstensors σ_{ik}) sowie gewisser innerer Variablen ξ_α beschreiben läßt. Letztere kenn-

zeichnen die möglichen inneren Umwandlungen und können Besetzungszahlen, Konzentrationen oder Reaktionslaufzahlen sein. Die zu den inneren Variablen konjugierten Größen A_α , welche als Affinitäten bezeichnet werden, verschwinden im thermodynamischen Gleichgewicht.

1. Sind die Werte der Variablen für einen als Bezugszustand benutzten, ungehemmten Gleichgewichtszustand durch

$$s^+, \varepsilon_{ik}^+ = 0, \xi_\alpha^+ \text{ bzw. } T^+, \sigma_{ik}^+ = 0, A_\alpha^+ = 0$$