

Resonanzenergien für den Protoneneinfang

I. Magnesium

Von S. WAGNER * und M. HEITZMANN *

Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt **

(Z. Naturforsch. 14 a, 784—786 [1959]; eingegangen am 19. Mai 1959)

Mit Hilfe eines elektronisch stabilisierten Kaskadengenerators wurden an dicken Magnesiumaufhängern (natürliches Isotopengemisch) folgende Resonanzenergien für den Protoneneinfang bestimmt (Zuordnung zu den verschiedenen Reaktionen nach ENDT und BRAAMS ¹).

²⁴Mg(p, γ)²⁵Al: (223,0 ± 0,5), (419,1 ± 0,7) keV;

²⁵Mg(p, γ)²⁶Al: (316,1 ± 0,5), (389,3 ± 0,7), (434,6 ± 0,8), (496,5 ± 0,8),
(514,8 ± 0,8), (567,2 ± 0,7), (591,9 ± 0,7), (685,2 ± 1,0) keV;

²⁶Mg(p, γ)²⁷Al: (292,2 ± 0,8), (338,1 ± 0,5), (453,8 ± 0,5), (662,1 ± 1,0) keV.

Die Energien wurden aus Messungen an einem Spannungsteiler ermittelt, der mit Hilfe der bei (504,5 ± 0,3) und (506,5 ± 0,3) keV liegenden Resonanzen der Reaktion ²⁷Al(p, γ)²⁸Si kalibriert worden war. Die experimentellen Halbwertsbreiten der untersuchten Resonanzen betragen zwischen 200 und 500 eV.

Da mehrere Resonanzenergien der Reaktionen ²⁴Mg(p, γ)²⁵Al, ²⁵Mg(p, γ)²⁶Al und ²⁶Mg(p, γ)²⁷Al bisher nur mit relativ großer Unsicherheit bekannt waren ¹, wurden sie mit verbesserten experimentellen Hilfsmitteln für Protonenenergien zwischen 200 keV und 700 keV neu bestimmt. Das erreichte gute energetische Auflösungsvermögen erlaubte es darüber hinaus, obere Grenzen für die Halbwertsbreiten der Resonanzstellen anzugeben.

Experimentelle Anordnung

Die Messungen wurden an einem Kaskadenbeschleuniger offener Bauart vorgenommen, dessen Hochspannung mit Hilfe einer elektronischen Stabilisierung auch über längere Zeiten auf etwa ±0,1^{0/00} ihres Wertes konstant gehalten werden konnte ². Die Welligkeit der Hochspannung war sicher kleiner als 100 V. Für die Kernreaktionen wurde das nicht analysierte Ionenbündel benutzt, das in einer Hochfrequenz-Ionenquelle erzeugt wurde (Atomionenanteil etwa 80%).

Als Auffänger diente eine dicke wassergekühlte Scheibe aus Reinmagnesium (natürliches Isotopengemisch: 78,6% ²⁴Mg, 10,1% ²⁵Mg, 11,3% ²⁶Mg), die vor jeder Messung sorgfältig mechanisch gereinigt wurde. Unmittelbar vor dem Auffänger befand sich eine mit flüssiger Luft gefüllte Kühlfalle, um die Bildung von Fremdschichten (Kohlenstoff) zu verhindern.

Die bei der Reaktion emittierte γ-Strahlung wurde in einem NaJ(Tl)-Szintillationszähler nachgewiesen, wobei ein Schwellendiskriminator nur Strahlung mit Quanten-

energien oberhalb 1 MeV zur Registrierung gelangen ließ. Mit Hilfe eines elektronischen Ladungsmessers wurden die Zählungen jeweils auf gleiche dem Auffänger zugeführte Ionenladung normiert ³.

Hochspannungsmessung und Energiekalibrierung

Die Beschleunigungsspannung wurde an einem ölgekühlten Spannungsteiler, der aus Drahtwiderständen aufgebaut war, mit Hilfe eines elektronischen Kompensators gemessen. Wie sich aus häufig wiederholten Messungen an Kernresonanzen ergab, war die Reproduzierbarkeit dieser Messung besser als ±5 · 10⁻⁴.

Der Spannungsteiler wurde mit Hilfe der beiden eng benachbarten Resonanzen der Reaktion ²⁷Al(p, γ)²⁸Si bei den Protonenenergien (504,5 ± 0,3) keV und (506,5 ± 0,3) keV kalibriert, die von ANDERSEN, BÖ, HOLTEBEKK, LÖNSJÖ und TANGEN ⁴ an die häufig als Energiestandard benutzte Resonanz der gleichen Reaktion bei (990,8 ± 0,2) keV ⁵ angeschlossen worden war. In Tab. 1 sind einige weitere auf Grund dieser Kalibrierung am Aluminium bestimmte Resonanzenergien mit den von ANDERSEN u. a. ermittelten verglichen.

Bei der Kalibrierung des Spannungsteilers war zu berücksichtigen, daß zu der Energie, auf die die Ionen durch die Hochspannung beschleunigt werden,

* Braunschweig.

** Braunschweig.

¹ P. M. ENDT u. C. M. BRAAMS, Rev. Mod. Phys. 29, 683 [1957]; K. WAY u. a., Nuclear Data Sheets, National Academy of Science — National Research Council, Washington, D.C.

² Beschleuniger und Stabilisierung wurden von der Firma Philips, Eindhoven, hergestellt.

³ Sekundärelektronen wurden durch eine negativ vorgespannte Blende am Verlassen des Auffängers gehindert.

⁴ S. L. ANDERSEN, H. BÖ, T. HOLTEBEKK, O. LÖNSJÖ u. R. TANGEN, Nuclear Phys. 9, 509 [1958/59].

⁵ F. BUMILLER, J. MÜLLER u. H. H. STAUB, Helv. Physica Acta 29, 234 [1956].



Resonanzenergie	
ANDERSEN u. a. ⁴ [keV]	eigene Messung [keV]
504,5 ± 0,3	504,5 ± 0,3*
506,5 ± 0,3	506,5 ± 0,3*
612,4 ± 1	611,5 ± 1,0
632,3 ± 0,3	632,3 ± 0,8
654,3 ± 0,3	654,6 ± 0,8

Tab. 1.
Energiekalibrierung mit Hilfe der Reaktion ²⁷Al(p, γ)²⁸Si.
* Normierungsenergie

noch deren Anfangsenergie hinzukommt, die ihnen von der Hochfrequenzentladung in der Ionenquelle und vom Extraktionsvorgang her anhaftet. Die Energieverteilung der aus einer Hochfrequenz-Ionenquelle extrahierten Ionen scheint nach den bisher durchgeführten Messungen⁶⁻⁹ in nicht einfacher Weise von den Entladungsparametern sowie von der Geometrie und anderen Konstruktionsmerkmalen der Ionenquelle beeinflusst zu werden. Offensichtlich hängt aber die Maximalenergie der Ionen unter sonst gleichen Umständen im wesentlichen von der Extraktionsspannung (Sondenspannung) ab. Die durch die Hochfrequenz selbst hervorgerufene Energiemodulation⁷ wird im allgemeinen dagegen zu vernachlässigen sein.

Um näher zu untersuchen, welchen Beitrag die Extraktionsspannung zur Gesamtenergie der Ionen liefert, wurde die 454 keV-Resonanz der Reaktion ²⁶Mg(p, γ)²⁷Al bei verschiedenen Sondenspannungen durchfahren. Aus diesen Messungen wurde für jede Sondenspannung die Beschleunigungsspannung er-

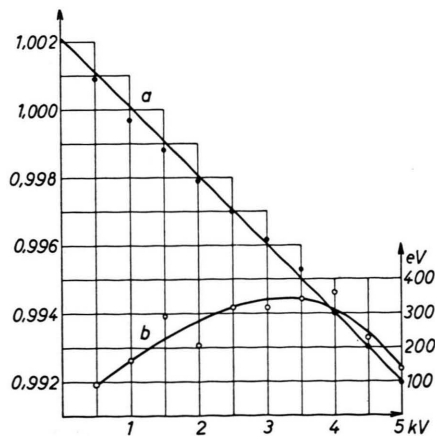


Abb. 1. Abhängigkeit der effektiven Ionenenergie und der experimentellen Halbwertsbreite von der Sondenspannung an der Hochfrequenz-Ionenquelle; ²⁶Mg(p, γ)²⁷Al, 454 keV-Resonanz. Abszisse: Sondenspannung. Ordinate: linker Ordinatenmaßstab gilt für Kurve a (•), Beschleunigungsspannung 1,000 = 452,8 keV (²⁶Mg(p, γ)²⁸Al, 454 keV-Resonanz) rechter Ordinatenmaßstab bezieht sich auf Kurve b (○), Halbwertsbreite in eV.

mittelt, bei der die Resonanz auftrat (Wendepunkt der Ausbeutekurve). In Abb. 1 sind die so bestimmten Beschleunigungsspannungen als Funktion der Sondenspannung aufgetragen. Es ergibt sich daraus, daß die effektive Ionenenergie am Auffänger nahezu linear von der Sondenspannung abhängt¹⁰.

Nachdem dieser Zusammenhang quantitativ bekannt war, konnte der Spannungsteiler für die Einschubenergie Null kalibriert werden. Die Resonanzenergien wurden nun jeweils als Summe aus Beschleunigungsenergie und effektiver Einschubenergie ermittelt. Auf diese Weise wurde eine lineare Energieskala über den gesamten untersuchten Bereich erzielt.

Mit größer werdender Sondenspannung stiegen die an der 454 keV-Resonanz beobachteten Halbwertsbreiten stark an (Abb. 1), durchliefen ein breites Maximum und wurden dann für hohe Sondenspannungen wieder kleiner. Dieses Verhalten deutet auf Änderungen im Energiespektrum der Ionen hin, wie sie nach den Messungen von FORST⁸ sowie HÖLZ und LÖB⁹ qualitativ verständlich erscheinen.

Meßergebnisse

Tab. 2 enthält die Meßergebnisse, die jeweils Mittelwerte aus mehreren Einzelmessungen darstellen. Soweit sich die gemessenen Resonanzenergien mit bereits von anderen Autoren genauer bestimmten vergleichen lassen, ergeben sich außerhalb der angegebenen Fehler liegende Abweichungen für die Resonanzen bei 389,2 und 434,6 keV.

Die bei einer Protonenenergie von 338,1 keV gefundene Resonanz wurde bei der Molekülionenenergie 676,1 keV erneut beobachtet, was als Hinweis auf die Linearität der nach dem oben beschriebenen Verfahren gewonnenen Energieskala gewertet werden kann.

Es wurde nicht versucht, schwache Resonanzen aufzufinden, die bei der Benutzung dicker Auffänger nur schwierig festzustellen sind. Aus diesem Grunde sind keine Aussagen über die Existenz der Resonanzen bei 530 keV und 650 (bzw. 667) keV möglich. Die Zuordnung der in Tab. 2 aufgeführten Resonanzen zu den verschiedenen Isotopen des Magnesiums wurden von ENDT und BRAAMS¹ übernommen; sie

⁶ J. Erö, Acta Physica Hungarica 5, 391 [1955/56].

⁷ J. Erö, Nucl. Instrum. 3, 303 [1958].

⁸ G. Forst, Z. angew. Phys. 10, 546 [1958].

⁹ R. Hölz u. H. Löb, Z. Naturforsch. 13 a, 602 [1958].

¹⁰ Änderungen des Gasdruckes in der Ionenquelle hatten innerhalb des bei den Messungen benutzten Druckbereiches keinen merklichen Einfluß auf die effektive Ionenenergie.

Resonanzenergie		Experi- men- telle HWB ¹²	Rel. ¹³ Int.	Zuord- nung ¹⁴	Resonanzenergie		Experi- men- telle HWB ¹²	Rel. ¹³ Int.	Zuord- nung ¹⁴
eigene Messung	andere Autoren				eigene Messung	andere Autoren			
[keV]	[keV]	[eV]			[keV]	[keV]	[eV]		
223,0 ± 0,5	222 ± 1 ¹⁷ 225,5 ± 0,2 ¹⁶	400	1,0	²⁴ Mg	496,5 ± 0,8	495,6 ± 0,6 ¹⁹ 501 ± 15 ¹⁸ 494 ± 15 ²¹	400	0,9	²⁵ Mg
292,2 ± 0,8	290 ± 3 ¹⁷ 300 ± 15 ¹⁸	200	0,1	²⁶ Mg					
316,1 ± 0,5	316,7 ± 0,7 ¹⁹ 321 ± 15 ¹⁸	200	0,4	²⁵ Mg	514,8 ± 0,8	513,4 ± 0,7 ¹⁹ 518 ± 15 ¹⁸ 510 ± 15 ²¹	300	0,6	²⁵ Mg
338,1 ± 0,5	338,5 ± 0,5 ¹⁹ 336 ± 1,5 ¹⁷ 340 ± 15 ¹⁸ 343 ± 10 ²⁰	200	5,6	²⁶ Mg		530,4 ± 0,7 ¹⁹ 580 ± 15 ¹⁸ 563 ± 15 ²¹			²⁵ Mg ²⁵ Mg
389,2 ± 0,7	391,5 ± 0,5 ¹⁹ 395 ± 15 ¹⁸ 388 ± 15 ²¹	250	1,1	²⁵ Mg	591,9 ± 0,7	607 ± 15 ¹⁸ 588 ± 15 ²¹	350	1,8	²⁵ Mg
419,1 ± 0,7	418,4 ± 0,5 ¹⁶	250	1,5	²⁴ Mg		667 ± 15 ¹⁸ 650 ± 15 ²¹			²⁵ Mg
434,6 ± 0,8	436,5 ± 0,4 ¹⁹ 441 ± 15 ¹⁸	250	1,0	²⁵ Mg					
453,8 ± 0,5	454,2 ± 0,3 ¹⁹ 451 ± 2 ¹⁷ 458 ± 15 ¹⁸ 450 ± 10 ²⁰	250	11	²⁶ Mg	662,1 ± 1,0 685,2 ± 1,0	662 ± 10 ²⁰ 688 ± 15 ¹⁸ 683 ± 15 ²¹ 697 ²² 675 ²³	500 400	3,3 3,0	²⁶ Mg ²⁵ Mg

Tab. 2. Resonanzenergien für den Protoneneinfang am Magnesium.

wurde nicht nachgeprüft. Die bei 662,1 keV beobachtete Resonanz muß auf Grund eines Vergleichs mit den von RUSSEL u. a.¹¹ angegebenen Intensitätsverhältnissen dem ²⁶Mg zugeordnet werden.

Die angegebenen Halbwertsbreiten der Resonanzen können nur als obere Grenzen der wahren Resonanzbreiten gelten. Bei der angewendeten Meßtechnik scheinen Oberflächeneffekte auf dem Auffänger einen merklichen Beitrag zu den beobachteten Halbwertsbreiten geliefert zu haben.

Eine Schwierigkeit bei der Benutzung dicker Auffänger besteht darin, daß der Intensitätssprung der γ -Strahlung an der Resonanzstelle zumeist aus der Differenz zweier im allgemeinen großer Zahlen ermittelt werden muß. Es ist deshalb geplant, Auffänger zu verwenden, deren Dicke zwar größer ist als die Resonanzbreite, so daß die Sättigung erreicht

wird, die aber dünner sind, als dem jeweiligen energetischen Abstand zur nächsten bei niedrigeren Protonenenergien liegenden Resonanz entspricht. Außerdem sollen die Auffänger durch Aufdampfen im Vakuum hergestellt werden und vor der Messung nicht wieder der Luft ausgesetzt werden, um die Bildung von Oxydschichten zu verhindern.

Die Meßergebnisse zeigen, daß elektronisch stabilisierte Kaskadengeneratoren hinsichtlich ihrer Spannungs Konstanz mit gut stabilisierten VAN DE GRAAFF-Generatoren vergleichbar sind und zur Präzisionsbestimmung von Kernresonanzenergien eingesetzt werden können.

Herrn Prof. Dr. H. FRÄNZ danken wir sehr für förderndes Interesse und klärende Diskussionen, Herrn Ing. H.-J. BARRENSCHEEN für wertvolle Mitarbeit bei den Messungen.

¹¹ L. N. RUSSEL, W. E. TAYLOR u. J. N. COOPER, Phys. Rev. **95**, 99 [1954]; W. E. TAYLOR, L. N. RUSSEL u. J. N. COOPER, Phys. Rev. **93**, 1056 [1954].

¹² HWB = Halbwertsbreite; der Meßfehler beträgt etwa ± 100 eV.

¹³ Die angegebenen relativen Intensitäten gelten für Gammastrahlung mit Quantenenergien oberhalb 1 MeV; sie stellen nur rohe Richtwerte dar.

¹⁴ Die Zuordnung wurde von ENDT und BRAAMS¹ übernommen.

¹⁵ nicht untersucht, s. S. 785.

¹⁶ S. E. HUNT, W. M. JONES, J. L. W. CHURCHILL u. D. A. HANCOCK, Proc. Phys. Soc., Lond. A **67**, 443 [1954].

¹⁷ R. TANGEN, K. Norske Vidensk. Selsk. Skr. 1946, Nr. 1.

¹⁸ J. C. KLUYVER, C. VAN DER LEUN u. P. M. ENDT, Physica **20**, 1287 [1954].

¹⁹ S. E. HUNT u. D. A. HANCOCK, Phys. Rev. **97**, 567 [1955].

²⁰ L. N. RUSSEL, W. E. TAYLOR u. J. N. COOPER, Phys. Rev. **95**, 99 [1954].

²¹ W. E. TAYLOR, L. N. RUSSEL u. J. N. COOPER, Phys. Rev. **93**, 1056 [1954].

²² R. W. KAVANAGH, W. R. MILLS u. R. SHERR, Phys. Rev. **97**, 248 [1955].

²³ L. L. GREEN, J. J. SINGH u. J. C. WILLMOTT, Proc. Phys. Soc., Lond. A **69**, 335 [1956].