

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

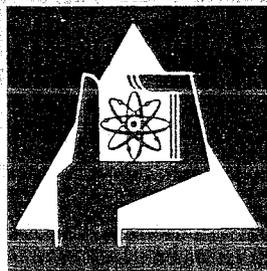
Januar 1968

KFK 732

Institut für Angewandte Kernphysik

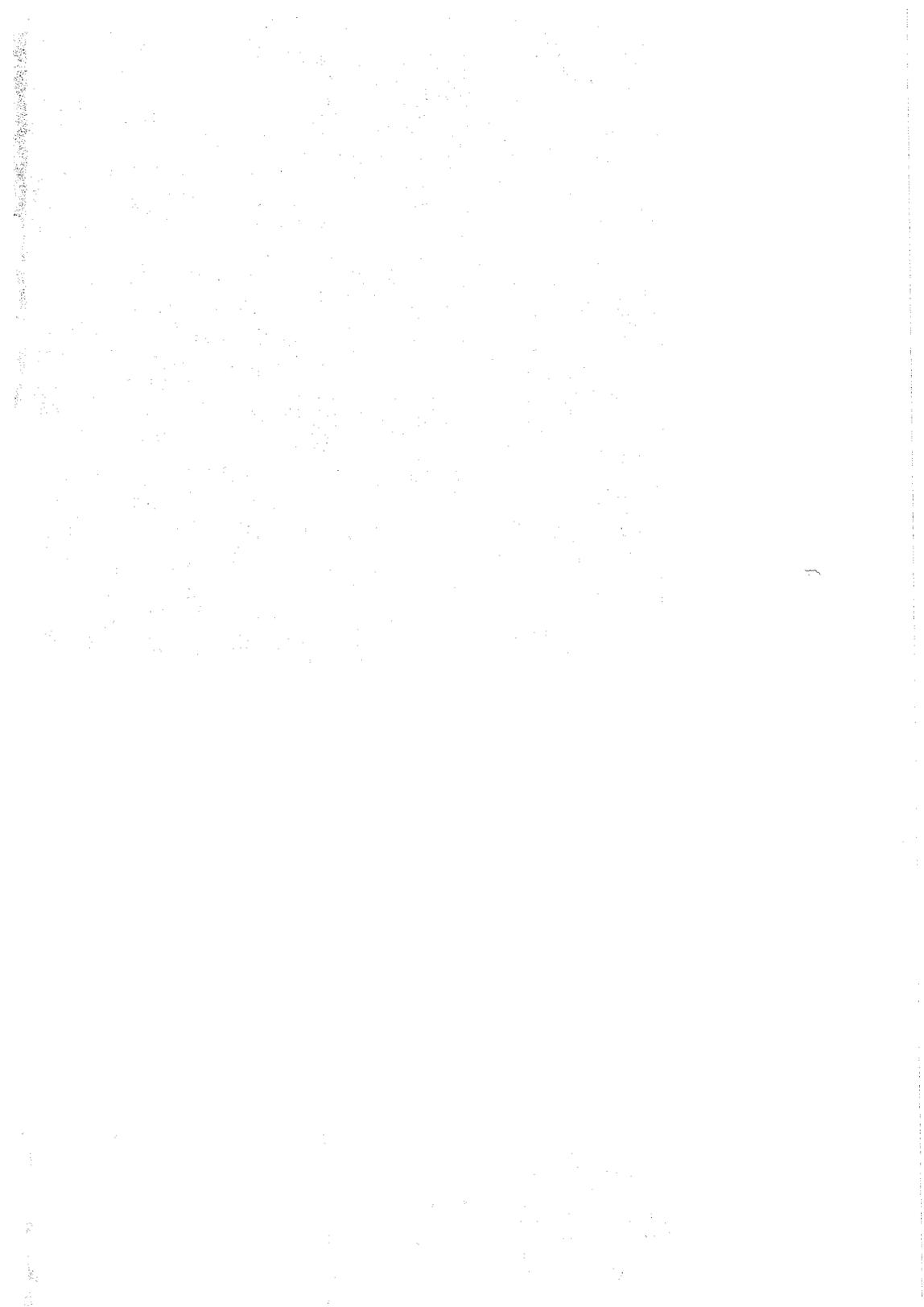
Untersuchung von Anregungszuständen in Ge^{72}

H. Ottmar



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



Untersuchung von Anregungszuständen in Ge⁷²

H. OTTMAR

Institut für Angewandte Kernphysik, Kernforschungszentrum Karlsruhe

Eingegangen am 16. August 1967

Excited Energy Levels in Ge⁷²

The level structure of Ge⁷² has been investigated using the decay of Ga⁷². Measurements of the gamma-ray spectrum have been performed by means of a 2.7 cm² × 0.2 cm and a 4 cm² × 0.5 cm lithium-drifted germanium detector. Coincidence measurements were carried out with two 1½'' Ø × 2'' NaI(Tl) detectors. 56 gamma transitions have been observed. A revised level scheme of Ge⁷² is proposed containing 8 new excited states.

1. Einleitung

Die Theorie der kollektiven Anregungen sphärischer Kerne ermöglicht zur Zeit noch keine zufriedenstellende Beschreibung der beobachteten Verhältnisse. Sie benötigt weitere experimentelle Daten, um ein ausreichend systematisches Bild dieser Anregungen zu erhalten. Es schien daher nützlich, das Niveauschema von Ge⁷² zu untersuchen mit dem Ziel, mögliche Mehrphononenzustände zu identifizieren. Die Arbeit schließt an eine mit derselben Zielsetzung an Ge⁷⁴ ausgeführte Untersuchung¹ an.

Die unteren Anregungszustände in Ge⁷² sind schon mehrfach durch Coulomb-Anregung²⁻⁷ und inelastische Streuung von Neutronen⁸⁻¹⁰ untersucht worden. Höher angeregte Zustände wurden durch (p, α)-

¹ WEITKAMP, C., W. MICHAELIS, H. SCHMIDT u. U. FANGER: Z. Physik **192**, 423 (1966).

² HEYDENBURG, N., and G. TEMMER: Phys. Rev. **99**, 617 A (1955).

³ MCGOWAN, F. K., and P. H. STELSON: Phys. Rev. **126**, 257 (1962).

⁴ STELSON, P. H., and F. K. MCGOWAN: Nuclear Phys. **32**, 652 (1962).

⁵ GANGRSKII, YU. P., i I. KH. LEMBERG: Bull. Acad. Sci. U.S.S.R. **26**, 1009 (1962).

⁶ GANGRSKII, YU. P., i I. KH. LEMBERG: Soviet Phys. JETP **15**, 711 (1962).

⁷ ROBINSON, R. L., P. H. STELSON, F. K. MCGOWAN, J. L. C. FORD jr., and W. T. MILNER: ORNL-3778 116 (1964); — Nuclear Phys. **74**, 281 (1964).

⁸ SINCLAIR, R.: Phys. Rev. **99**, 621 A (1955).

⁹ MALIK, S. S., C. E. MANDEVILLE, N. NATZ, M. A. ROTHMANN, and D. M. VAN PATTEN: Bull. Am. Phys. Soc. **4**, 259 (1959).

¹⁰ NISHIMURA, K.: J. Phys. Soc. Japan **16**, 355 (1961).

Reaktionen¹¹ an ${}_{33}\text{As}_{42}^{75}$, durch inelastische Streuung von Protonen¹²⁻¹⁴ und den β^+ -EC-Zerfall^{15,16} von ${}_{33}\text{As}_{39}^{72}$ ($T_{\frac{1}{2}}=26$ h) erhalten. Nach der letzten Untersuchung^{17,18} des Niveauschemas von Ge⁷² über den Zerfall von Ga⁷² haben VITMAN et al.¹⁹⁻²¹ das γ -Spektrum von Ga⁷² mit einem magnetischen Compton-Spektrometer gemessen. Sie beobachteten mehrere bis dahin unbekannte γ -Übergänge, versuchten jedoch nicht, diese in ein Zerfallsschema einzuordnen. In der vorliegenden Arbeit wurde deshalb der Versuch unternommen, das bisher bekannte Niveauschema von Ge⁷², das im wesentlichen auf Messungen mit Detektoren relativ schlechter Auflösung beruht, durch Untersuchung des Zerfalls von Ga⁷² zu überprüfen und zu ergänzen.

Beim Zerfall von Ga⁷² in den Grundzustand von Ge⁷² wird eine Energie von 4 MeV frei. Mehr als 50% der Zerfälle führen von dem 3⁻-Grundzustand²² des Ga⁷² zu angeregten Zuständen in Ge⁷² mit Anregungsenergien >3 MeV. Man kann erwarten, daß durch den β -Zerfall und anschließende γ -Abregung Zustände mit Spins zwischen 1 und 5 mit merklicher Intensität angeregt werden.

2. Experimentelle Anordnungen

2.1. Quellen

Ausgangssubstanz für die Quellen war reines Galliumoxyd Ga₂O₃* mit der natürlichen Isotopenzusammensetzung 60% Ga⁶⁹ und 40% Ga⁷¹. Das Ga₂O₃-Pulver wurde in kleine Polyäthylenkapseln mit 1,5 mm Wandstärke eingefüllt und in der thermischen Säule des Karlsruher Reaktors FR 2 durch Neutroneneinfang aktiviert.

* Johnson, Matthey u. Co., London, 99,99%.

¹¹ KUMABE, I., H. OGATA, T. KOMATUZAKI, N. INOUE, S. TOMITA, Y. YAMADA, T. YAMAKI, and S. MATSUMOTO: Nuclear Phys. **46**, 454 (1963).

¹² VAN PATTER, D. M., R. RIKMENSPOEL, and P. N. TREHAN: Nuclear Phys. **27**, 467 (1961).

¹³ DICKENS, J. K., F. G. PEREY, and R. J. SILVA: ORNL 3499, vol. **1**, 20 (1963).

¹⁴ DARCEY, W.: Compt. rend. congr. intern. phys. nucléaire, Paris **2**, 456 (1964).

¹⁵ BRUN, E., J. J. KRAUSHAAR, and W. E. MEYERHOF: Phys. Rev. **102**, 808 (1956).

Ältere Arbeiten sind in dieser Arbeit zitiert.

¹⁶ Nuclear Data Sheets, National Research Council, Washington 25, D. C., Blatt 59-1-52.

¹⁷ KRAUSHAAR, J. J., E. BRUN, and W. E. MEYERHOF: Phys. Rev. **101**, 139 (1956).

¹⁸ Nuclear Data Sheets, National Research Council, Washington 25, D. C., 59-1-25 bis 59-1-29.

¹⁹ VITMAN, V. D., N. A. VOINOVA, and B. S. DZHELEPOY: Nuclear Phys. **46**, 368 (1963).

²⁰ VITMAN, V. D., B. S. DZHELEPOV i Yu. N. PODKOPAEV: Soviet Phys. JETP **19**, 999 (1964).

²¹ VITMAN, V. D., B. S. DZHELEPOV, and A. G. SERGEEV: JETP Lett. **2**, 61 (1965).

²² CHILDS, W., L. GOODMAN, and L. KIEFFER: Phys. Rev. **120**, 2138 (1960).

Da viele Messungen sich über Zeiträume erstreckten, die ein Mehrfaches der Halbwertszeit von Ga^{72} betrug, wurden jeweils vier Quellen mit verschiedenen Substanzmengen gleichzeitig bestrahlt. Die Probenmengen in den vier Quellen (1, 1,9, 2,7 und 5 mgr) waren so bemessen, daß vier aufeinanderfolgende Messungen von jeweils 12 Std Dauer bei gleicher Quellstärke begonnen werden konnten. Insgesamt wurden fünf identische Probensätze mit je vier Quellen vorbereitet, die nacheinander in Abständen von 2 Tagen bestrahlt wurden.

Mit den Messungen wurde ein Tag nach der Bestrahlung begonnen. Während dieser Zeit war die Aktivität des Ga^{70} praktisch vollständig abgeklungen und konnte die Messung nicht stören.

2.2. *Ge(Li)-Detektoren*

Am Reaktor FR 2 sind Strahlrohrexperimente zur Untersuchung von (n, γ) -Reaktionen aufgebaut. Zwei der periodisch wiederkehrenden Betriebspausen des Reaktors wurden dazu benutzt, mit zwei dort installierten lithiumgedrifteten Germaniumdetektoren mehrere Einzelspektren von Ga^{72} aufzunehmen. Die experimentellen Anordnungen, in denen die Detektoren eingebaut waren, sind in Ref. ²³ und ²⁴ beschrieben. Die beiden zylindrischen Ge(Li)-Detektoren hatten empfindliche Zonen von 4 cm² Fläche und 5 mm Dicke bzw. 2,7 cm² Fläche und 2 mm Dicke. Für die 511 keV-Linie im Spektrum des Ga^{72} ergab sich mit dem größeren Detektor eine Halbwertsbreite von 6,4 keV, der kleinere Detektor mit 2 mm Feldzone lieferte für die gleiche Linie eine Auflösung von 5,5 keV.

2.3. *Koinzidenzapparatur*

Die Anlage ist weitgehend konventionell und arbeitet nach dem bekannten Schnell-Langsam-Verfahren mit einer schnellen Koinzidenzstufe vom Bell-Typ ²⁵. Die Auflösungszeit wurde zu 30 ns gewählt. Der elektronische Aufbau der gesamten Anlage ist in Ref. ²⁶ beschrieben. In zwei Amplitudenstabilisatoren ²⁷ wurden Amplitudenschwankungen der Analogsignale mit einem Regelfaktor 80 ausgeglet.

Um bei kleiner Einzelzählrate genügend echte Koinzidenzen zu erhalten, wurde die Geometrie sehr klein gewählt (Fig. 1). Bei einem Quellabstand von 1,5 cm konnte die Quellstärke (ca. 0,5 μC) so niedrig ge-

²³ SCHMIDT, H., W. MICHAELIS, C. WEITKAMP u. G. MARKUS: Z. Physik **194**, 373 (1966).

²⁴ MARKUS, G., W. MICHAELIS, H. SCHMIDT u. C. WEITKAMP: Z. Physik **206**, 84 (1967).

²⁵ BELL, R. E., R. L. GRAHAM, and H. E. PETCH: *Cand. J. Phys.* **30**, 35 (1952).

²⁶ MICHAELIS, W.: Diss. Karlsruhe 1962.

²⁷ TAMM, U.: *Nuclear Instr. and Meth.* **40**, 355 (1966).

halten werden, daß das Verhältnis von zufälligen zu echten Koinzidenzen $< 1/100$ war. Zwischen Quelle und Detektor wurde außer der Compton-Abschirmung noch ein 1 cm dicker Absorber aus Polyäthylen gesetzt, der die energiereichen Elektronen aus dem Zerfall von Ga⁷² möglichst bremsstrahlungsarm absorbieren sollte.

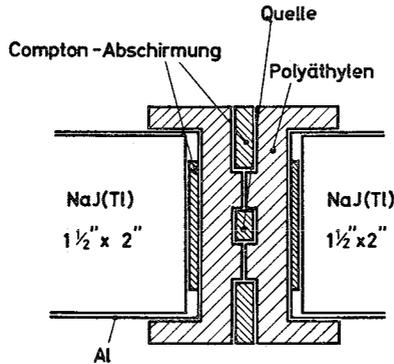


Fig. 1. Detektoranordnung und Compton-Abschirmung

3. Experimentelle Ergebnisse

3.1. Einzelspektren

In den Einzelspektren von Ga⁷², aufgenommen mit den 2 mm- und 5 mm-Ge(Li)-Detektoren und einem 1024 Kanal-Impulshöhenanalysator, wurden insgesamt 56 γ -Linien beobachtet. Die Kanalbreite betrug in allen Spektren entweder 0,95 oder 1,45 keV. Die einzelnen Spektren sind Summen mehrerer Teilspektren, die während einer Meßzeit von etwa 12 Std aufgenommen wurden. Fig. 2 zeigt ein typisches Beispiel. Tabelle 1 enthält eine Liste der γ -Linien mit ihren relativen Intensitäten.

Eichwerte für die Energieeichung der Einzelspektren lieferten die im Spektrum auftretende Pb-K α -Linie (74,974 keV²⁸), die Vernichtungsstrahlung (511,006 \pm 0,002) keV²⁹ und die (834,8 \pm 0,6) keV-Linie³⁰ des Ga⁷²; hinzu kamen die Linien von Cs¹³⁷ (661,595 \pm 0,076 keV) und Co⁶⁰ (1173,23 \pm 0,04 keV und 1332,48 \pm 0,05 keV³¹).

Der höherenergetische Teil des Spektrums wurde intern geeicht. Eichlinien waren die Photo-Peaks der 2201,2 keV-, 2508,1 keV- und 2845 keV-

²⁸ MURRAY, G., R. L. GRAHAM, and J. S. GEIGER: Nuclear Phys. **63**, 353 (1965).

²⁹ COHEN, E. R., and J. W. M. DuMOND: Rev. Mod. Phys. **37**, 537 (1965).

³⁰ ROBINSON, R. L., P. H. STELSON, F. K. MCGOWAN, J. L. C. FORD, and W. T. MILNER: ORNL-3778 116 (1964).

³¹ GRAHAM, R. L., G. T. EWAN, and J. S. GEIGER: Nuclear Instr. and Meth. **9**, 245 (1960).

Linien, deren Energien aus den Doppel-Escape-Peaks ($E\gamma$ -1022) keV genau bestimmt werden konnten.

Die Intensitäten der γ -Linien wurden durch Auszählen der Flächen unter den Photo-Peaks ermittelt und mit den Werten von WAINIO³² auf Ansprechwahrscheinlichkeit und Photobruch korrigiert. Die Intensitäten

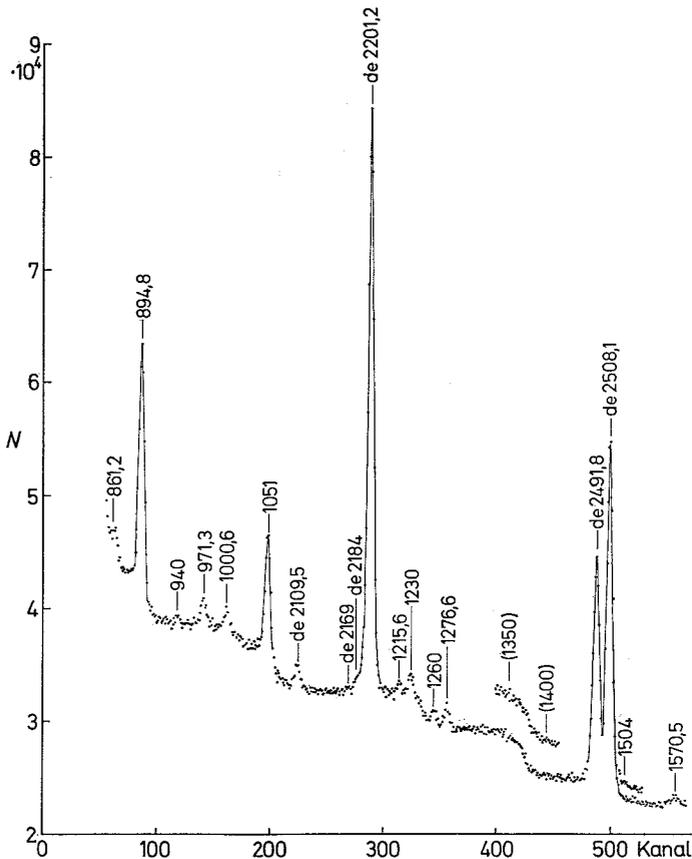


Fig. 2. Gammasktrum von Ga^{72} im Energiebereich 850–1500 keV, aufgenommen mit Ge(Li)-Detektor ($2,7 \text{ cm}^2 \times 2 \text{ mm}$). Kanalbreite 0,95 keV

von höher energetischen γ -Linien, die sowohl aus den Photo-Peaks als auch aus den Doppel-Escape-Peaks bestimmt wurden, stimmten innerhalb eines Fehlers von 10% überein. Die Intensitäten wurden auf einen Wert von 100 für die 834,8 keV-Linie bezogen.

³² WAINIO, K. M.: Thesis University of Michigan (1965).

Tabelle 1. γ -Linien aus dem Zerfall von Ga⁷²

γ -Energie keV	Relative Intensität	Klasse	Im Zer- falls- schema einge- ordnet (+)	γ -Energie keV	Relative Intensität	Klasse	Im Zer- falls- schema einge- ordnet (+)
286 \pm 3	0,2 \pm 1	A	+	1504	0,3	A	+
334 \pm 3	0,3 \pm 0,2	A		1570,5 \pm 1,5	1,2 \pm 0,3	A	+
355 \pm 3	0,2	B		1596,8 \pm 1	5,4 \pm 0,6	A	+
380 \pm 4	0,4 \pm 0,2	A	+	1682 \pm 2	1,8 \pm 0,4	A	+
410 \pm 3	0,4 \pm 0,3	A		1712 \pm 3	0,7 \pm 0,3	A	+
428 \pm 4	0,3 \pm 0,3	A	+	1796 \pm 3	0,3	C	
437 \pm 3	0,4 \pm 0,3	A		1853 \pm 3	0,6 \pm 0,3	B	
476 \pm 3	0,3 \pm 0,2	A		1861,5 \pm 1,2	6,2 \pm 0,5	A	+
511 \pm 1	0,5 \pm 0,3	B	+	1912	0,3	C	
601 \pm 1	6,5 \pm 1	A	+	2109,5 \pm 1,5	1,1 \pm 0,2	A	+
630,6 \pm 0,8	23,5 \pm 4	A	+	2144 \pm 4	0,2	C	+
735 \pm 3	0,3 \pm 0,2	A	+	2169 \pm 3	0,2	A	
786 \pm 0,8	3,1 \pm 0,4	A	+	2184 \pm 2,5	0,5 \pm 0,2	A	
811,3 \pm 1,2	2,9 \pm 0,4	A	+	2201,2 \pm 0,5	30,5 \pm 2,5	A	+
834,8 \pm 0,6	100	A ^a	+	2438 \pm 4	0,3 \pm 0,2	A	
861,2 \pm 1	0,7 \pm 0,2	A	+	2465 \pm 4	0,4 \pm 0,3	A	+
894,8 \pm 0,8	10,5 \pm 0,4	A	+	2491,8 \pm 0,6	10,2 \pm 1,2	A	+
940 \pm 2	0,3 \pm 0,1	A	+	2508,1 \pm 0,6	15,7 \pm 1,3	A	+
971,3 \pm 1	1,3 \pm 0,2	A	+	2548 \pm 4	0,2	B	
1000,6 \pm 1,2	1,0 \pm 0,2	A	+	2582 \pm 4	0,2	A	+
1051,1 \pm 1	7,6 \pm 0,8	A	+	2622 \pm 3	0,2 \pm 0,1	A	
1215,6 \pm 1	0,8 \pm 0,2	A	+	2832 \pm 4	0,1 \pm 0,1	A	+
1230,0 \pm 1,5	1,4 \pm 0,2	A	+	2845 \pm 2	0,55 \pm 0,15	A	+
1260,0 \pm 1,0	1,1 \pm 0,2	A	+	2978 \pm 4	0,5	A	+
1276,6 \pm 1,0	1,6 \pm 0,2	A	+	2988 \pm 4	0,03	A	+
1348 \pm 4	0,3	B	+	3097 \pm 4	0,02	A	+
1400 \pm 3	0,3	B	+	3168 \pm 4	0,008	A	+
1465,4 \pm 1	3,0 \pm 1	A ^b	+	3343 \pm 4	0,01	A	+

A sichere Linie; B unsichere Linie; C unsichere Linie, möglicherweise Doppel-Escape-Peak.

^a Eichlinie, Energie aus Ref. ⁴⁶.

^b Energie aus Summe (834,8 \pm 630,6) keV, Intensität aus Koinzidenzspektrum.

3.2. Koinzidenzmessungen

Im NaJ-Einzelspektrum in Fig. 3 sind die Energiebereiche angezeigt, zu denen Koinzidenzmessungen ausgeführt wurden. Durch Subtraktion von Koinzidenzspektren zu benachbarten Energiebereichen wurden Koinzidenzbeiträge des Comptonuntergrundes eliminiert. Fig. 4 enthält ein typisches Koinzidenzspektrum. Einige Summenkoinzidenzmessungen wurden ebenfalls ausgeführt (Fig. 5).

Die Ergebnisse der γ - γ -Koinzidenzmessungen und Summenkoinzidenzmessungen sind in Tabelle 2 zusammengefaßt. Gesicherte Koinzidenzen sind mit + bezeichnet. Das Zeichen (+) bedeutet, daß eine Koinzidenz der betreffenden Linie wahrscheinlich ist. Die Existenz dieser Koinzidenzen konnte jedoch entweder wegen geringer Intensität der γ -Linien oder wegen einer möglichen falschen Untergrundsubtraktion nicht eindeutig gesichert werden.

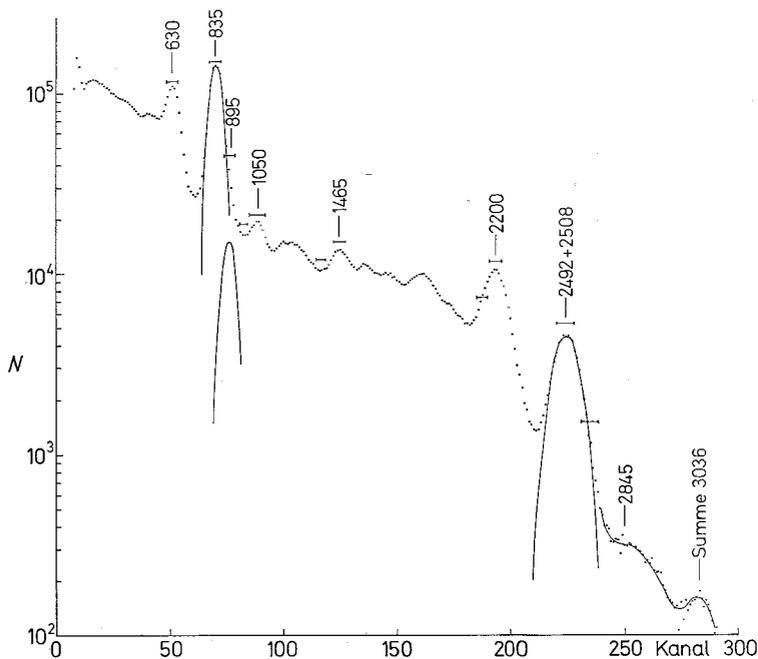


Fig. 3. Einzelnspektrum von Ga^{72} mit NaJ-Detektor ($1\frac{1}{2}'' \times 2''$)

4. Diskussion

4.1. Zerfallsschema

Das Zerfallsschema in Fig. 6 enthält 41 von den insgesamt 56 beobachteten γ -Übergängen, wobei die eingeordneten Übergänge 98% der Gesamtintensität aller beobachteten γ -Übergänge aufweisen. Die Lage im Zerfallsschema ist für jene γ -Übergänge eindeutig, die in Koinzidenzmessungen nachgewiesen wurden. Gesicherte Koinzidenzen sind durch Punkte angedeutet. Ein Teil der γ -Linien, für die sich keine Koinzidenzbeziehungen ergaben, ist zwischen bereits bekannte und gesicherte Energieniveaus eingefügt worden. Dabei galt die Forderung, daß die γ -Energie und die Energiedifferenz zwischen den beiden be-

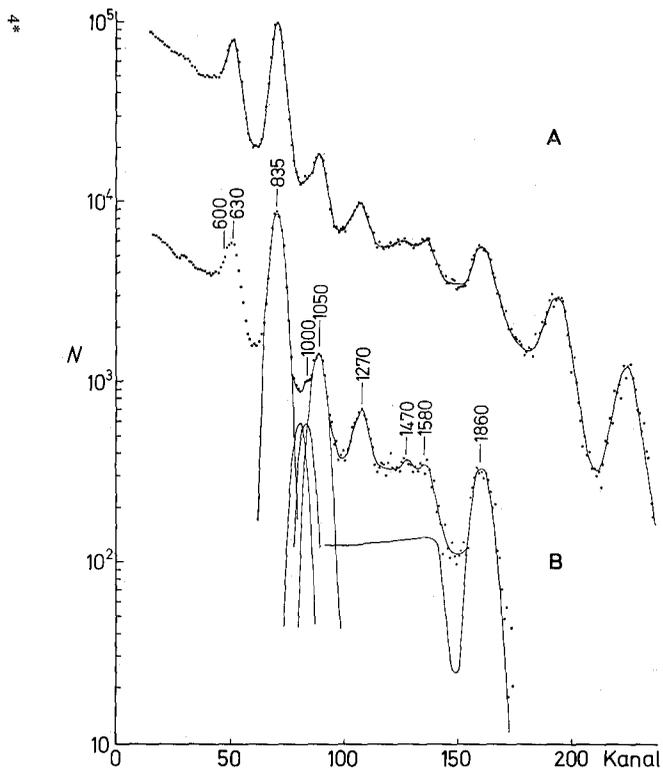


Fig. 4. Koinzidenzspektrum zum Energiebereich 600–660 keV. (A) unkorrigiert, (B) Comptonanteil von 835 keV subtrahiert

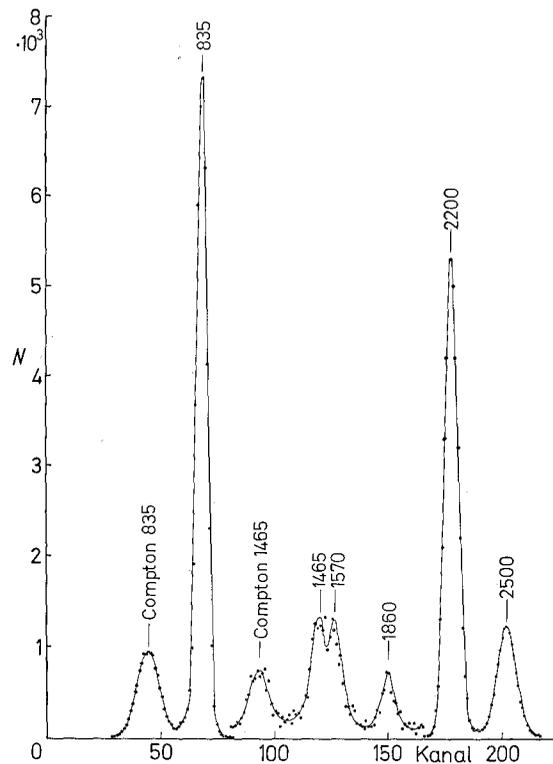


Fig. 5. Summenkoinzidenzspektrum zum Energiebereich 2980–3100 keV

Tabelle 2. Zusammenfassung der γ - γ -Koinzidenzmessungen.
Diskriminator (keV)

Koinzidente γ -Linien (keV)	600 -660	800 -860	860 -920	1020 -1080	1430 -1500	2090 -2180	2160 -2240	2460 -2540	2560 -2640
285				(+)					
380				(+)					
420					(+)				
600, 630	+			+	+				
735		(+)							
785		+	+						
835	+		+	+	+	+	+	+	+
895		+							
970, 1000	+	+			+				
1050	+	+			+				
1230		(+)	+						
1270	+				+				
1465	(+)	(+)		+					
1570	+				+				
1600			+						
1860	+	+			+				
2200		+							
2500		+							
2845		+							

treffenden Energieniveaus sich um nicht mehr als ± 3 keV unterscheiden sollten. Gestrichelte Linien zeigen γ -Linien an, die sich auf verschiedene Weise in das Zerfallsschema einordnen lassen.

Die vorliegenden Messungen bestätigen in ihren Grundzügen die bisherigen Vorstellungen vom Zerfallsschema des Ga^{72} . Bis zu dem Anregungsniveau bei 2402 keV stimmt die Termfolge mit den Ergebnissen anderer Autoren überein. Dabei ist der erste Anregungszustand bei 690 keV mit Spin und Parität 0^+ , dessen Existenz eindeutig gesichert ist, aus früheren Arbeiten^{17, 33} übernommen worden. NESSIN et al.³³ bestimmten durch Konversionselektronenuntersuchungen die energetische Lage dieses Niveaus zu 690 ± 1 keV.

Über den Anregungszustand bei 2402 keV wurden 8 Energieniveaus in das Termschema von Ge^{72} eingefügt, die im bisherigen Zerfallsschema von Ga^{72} nicht enthalten waren.

Das Niveau bei 2832 keV ist nicht identisch mit dem in Ref.¹⁸ angegebenen Energieniveau bei 2849 keV. Das Koinzidenzspektrum zum 835 keV-Übergang zeigt eine schwache Linie bei 2850 keV, deren Koinzidenzbeziehung durch wiederholte Messungen von echten und zufälligen Koinzidenzen gesichert ist. Ein Vergleich der Intensitäten der 2500 keV-Linie und der 2850 keV-Linie ergibt ein Verhältnis von 50:1.

³³ NESSIN, M., T. H. KRUSE, and K. E. EKLUND: Phys. Rev. **125**, 639 (1962).

Dieses Verhältnis stimmt mit dem aus dem $\text{Ge}(\text{Li})$ -Einzelspektrum ermittelten Wert $I(2492+2508):I(2845)=47:1$ überein. Somit führt der 2845 keV-Übergang nicht in den Grundzustand, sondern zu dem 835 keV-Niveau. Dafür entspricht die bisher unbekannte 2832 keV- γ -Linie mit großer Wahrscheinlichkeit einem Grundzustandsübergang.

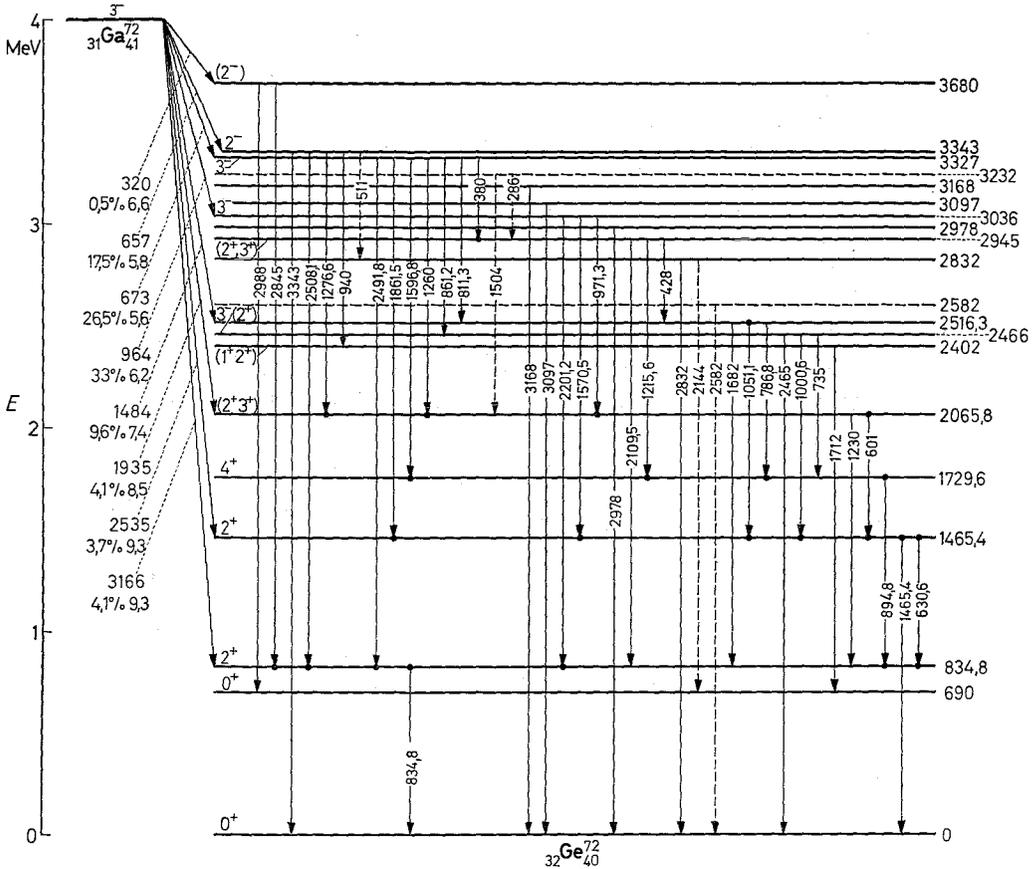


Fig. 6. Zerfallsschema von Ga^{72} . Energien in keV. Gesicherte Koinzidenzen sind durch Punkte angedeutet. Die Zuordnung gestrichelter Linien ist nicht eindeutig

Das 2945 keV-Niveau ist wahrscheinlich identisch mit dem von DARCEY¹⁴ bei (p, p') -Reaktionen an Ge^{72} beobachteten Energieniveau bei 2940 keV. BRUN et al.¹⁵ beobachteten nach dem Zerfall von As^{72} einen Anregungszustand bei 2910 keV, der sich überwiegend durch einen 2080 ± 20 keV-Übergang zum 835 keV-Niveau abregt. Möglicherweise entspricht dieses Niveau dem hier eingeführten 2945 keV-Zustand, dessen

Abregung in erster Linie durch einen 2110 keV-Übergang zum 835 keV-Niveau führt.

Die im Einzelspektrum gefundenen γ -Linien mit den Energien 2978 keV, 3097 keV und 3168 keV können aus energetischen Gründen als Übergänge von Anregungszuständen entsprechender Energie in den Grundzustand gedeutet werden. Andere Zuordnungen erscheinen sehr unwahrscheinlich. γ -Linien mit Energien 2976 keV und 3100 keV beobachteten bereits VITMAN et al.^{19, 20}. Eine 3100 keV-Linie findet sich auch bei JOHNS et al.¹⁸.

Die 835 keV – 2845 keV-Koinzidenz erfordert einen Anregungszustand bei 3680 keV. Eine γ -Linie mit dieser Energie und einer relativen Intensität von $5 \cdot 10^{-4}$ beobachteten VITMAN et al.²¹. Sie konnte in den vorliegenden Messungen nicht gefunden werden. Dafür kann die im Ge(Li)-Einzelspektrum auftretende 2988 keV-Linie als Übergang 3680 keV – 690 keV interpretiert werden.

Die Koinzidenz der 286 keV-Linie zum 1051 keV-Übergang deutet möglicherweise auf ein Niveau bei 3232 keV hin. Ferner könnte die 2582 keV-Linie ein Grundzustandsübergang sein. DARCEY¹⁴ fand einen Anregungszustand bei 2572 ± 10 keV, so daß ein Anregungszustand bei

Tabelle 3. *Energieniveaus in Ge⁷²*

KRAUSHAAR et al. ^a Ref. 17	Nucl. Data Sheets ^b Ref. 18	DARCEY ^c Ref. 14	Vorliegende Arbeit ^a
690	690	693	690
840	835	837	834,8 \pm 0,6
1460	1465	1468	1465,4 \pm 1
1730	1729	1724	1729,6 \pm 1
2060	2060		2065,8 \pm 1,8
2390	2400	2405	2402 \pm 2 2466 \pm 2
2510	2515	2520 2572 2765	2516 \pm 1,4 (2582 \pm 4)
2820	2849 2910	2940	2832 \pm 4 2945 \pm 1,5 2978 \pm 4
3050	3050	3041	3036,0 \pm 1,1 3097 \pm 4 3168 \pm 4 (3232 \pm 5)
3320	3325		3326,6 \pm 1
3340	3343		3343,0 \pm 1 3680 \pm 2,5
	3740		

^a Ga⁷²-Zerfall, ^b Zerfall von Ga⁷² und As⁷², ^c (p, p')-Reaktionen.

2582 keV nicht ausgeschlossen scheint. Die beiden möglichen Niveaus bei 2582 keV und 3232 keV sind im Zerfallsschema durch gestrichelte Linien angedeutet.

Für fünfzehn γ -Linien, darunter die in Tabelle 1 als unsicher gekennzeichneten sechs Übergänge, bleibt die Zuordnung im Zerfallsschema offen. Sie konnten in den Koinzidenzmessungen wegen ihrer geringen Intensität und dem mäßigen Auflösungsvermögen der NaJ-Detektoren nicht nachgewiesen werden. Für γ -Übergänge mit Energien > 2 MeV gibt es aufgrund der Tatsache, daß im Koinzidenzspektrum zum 1465 keV-Übergang keine γ -Linien oberhalb 2 MeV gefunden wurden, aus energetischen Gründen nur drei Möglichkeiten für eine Einordnung in das Zerfallsschema: sie können entweder zum Grundzustand oder zu den beiden ersten Anregungszuständen bei 690 keV und 835 keV führen. Da kein Argument für oder gegen eine der möglichen Kombinationen vorhanden ist, sind die fraglichen γ -Linien nicht im Zerfallsschema eingezeichnet.

Tabelle 3 enthält die beobachteten Energieniveaus von Ge⁷². Zum Vergleich sind die Ergebnisse früherer Arbeiten mitangeführt.

4.2. Log ft-Werte, Spins der Anregungszustände

Aus den Intensitäten der γ -Linien wurden die relativen Häufigkeiten der bekannten β -Gruppen neu bestimmt und daraus die log ft-Werte berechnet. Sie sind im Zerfallsschema in Fig. 6 eingetragen.

Spins und Paritäten für die drei ersten Anregungszustände wurden von anderen Autoren aus Konversionskoeffizienten^{17, 33}, Coulombanregung und Winkelkorrelationsmessungen^{34, 35} ermittelt. Die Zuordnung 3^- für den Anregungszustand bei 2516 keV ist von DARCEY¹⁴ aufgrund der charakteristischen Winkelverteilung in (p, p')-Reaktionen getroffen worden. BELJAEV et al.³⁶ ermittelten aus den Koeffizienten für innere Paarerzeugung für die 2201 keV-, 2492 keV- und 2508 keV- γ -Übergänge einen E1-Charakter. Die im Zerfallsschema in Fig. 6 angegebenen Spin- und Paritätswerte für die Anregungsniveaus bei 1730 keV, 3036 keV, 3327 keV und 3343 keV sind unter Berücksichtigung von β^- - und γ -Übergangswahrscheinlichkeiten die wahrscheinlichsten. BELJAEV beobachtete außerdem Elektron-Positron-Paare mit Energien, die einem 2400 keV-Übergang entsprechen. Aus dem Paarerzeugungskoeffizienten $\Gamma_p \geq 13$ für diesen Übergang und aus dem Fehlen von γ -Quanten mit dieser Energie schließt BELJAEV auf einen 0-0-Übergang.

³⁴ ARNS, R. G., and M. L. WIEDENBECK: Phys. Rev. **112**, 229 (1958).

³⁵ COLEMAN, C. F., Nuclear Phys. **7**, 448 (1958).

³⁶ BELJAEV, B. N., S. S. VASILENKO, V. S. GROZDEV, and V. N. GRIGOREV: Jader-naja fizika **3**, 13 (1966).

Für das 2402 keV-Niveau ist aber ein Spin 0 ausgeschlossen, da sich dieses Niveau durch einen γ -Übergang zum 0^+ -Niveau bei 690 keV abregt. Anregung und Abregung sprechen eher für einen Spin 1 oder 2.

Der Anregungszustand bei 2066 keV wird von Niveaus mit Spins und Paritäten 2^- und 3^- gespeist und regt sich zu den beiden 2^+ -Niveaus bei 835 keV und 1465 keV ab. Ein Übergang in den Grundzustand wird nicht beobachtet. Der $\log ft$ -Wert von 8,5 für die β -Gruppe zum 2066 keV-Niveau zeigt einen einfach verbotenen Übergang an. Spin 2 oder 3 und positive Parität für dieses Niveau sind sehr wahrscheinlich.

Anregung und Abregung beschränken die Spins der Anregungszustände bei 2466 keV und 2945 keV auf die Werte 2 bzw. 2 und 3.

Der $\log ft$ -Wert von 6,6 für die 320 keV- β -Gruppe zum Niveau bei 3680 keV weist auf einen erlaubten Übergang und damit auf negative Parität des Anregungszustandes hin. Wegen des 2988 keV-Überganges zum 690 keV- 0^+ -Niveau ist von den möglichen Spinwerten 2,3 ein Spin 2 am wahrscheinlichsten.

4.3. Interpretation des Niveauschemas von Ge^{72}

Das Termschema von Ge^{72} unterscheidet sich von den Termschemata aller anderen mittelschweren gg -Kerne dadurch, daß der erste Anregungszustand einen Spin 0 besitzt. Diese Erscheinung tritt sonst nur bei magischen Kernen (z. B. Ca^{40} und Zr^{90}) mit abgeschlossenen Protonen- oder Neutronenschalen auf. Bei diesen Kernen kann der 0^+ -Anregungszustand als innere Anregung eines Nukleonenpaares erklärt werden.

Nach dem Vibrationsmodell erwartet man bei den sphärischen mittelschweren gg -Kernen als ersten Anregungszustand ein 2^+ -Niveau (Eiophonon-Quadrupolvibration). Die kollektive Natur des 2^+ -Niveaus bei 835 keV ist wegen der starken Coulombanregung bei inelastischer Streuung geladener Teilchen gesichert. Die Deutung des 2^+ -Niveaus bei 1465 keV als Zweiphononen-Quadrupolzustand liegt nahe. Der stark behinderte Übergang in den Grundzustand stützt diese Annahme. Aus dem Koinzidenzspektrum zum 1050 keV-Übergang wurde ein Intensitätsverhältnis $I(630 \text{ keV})/I(1465 \text{ keV}) = 8 \pm 1$ ermittelt. Daraus ergibt sich das Verhältnis der reduzierten Übergangswahrscheinlichkeiten

$$\frac{B(E2 \ 630 \text{ keV})}{B(E2 \ 1465 \text{ keV})} = 540 \pm 70.$$

Nach dem einfachen Vibrationsmodell sollte der 1465 keV-Übergang ($\Delta n=2$) vollständig verboten sein. Als Test für die „Reinheit“ des Vibrationszustandes bei 1465 keV kann das $M1$ - $E2$ -Mischungsverhältnis für den 630 keV-Übergang gelten. Bei einem reinen Vibrationszustand nach dem kollektiven Modell sollte der 630 keV-Übergang reine $E2$ -

Strahlung sein. ARNS und WIEDENBECK³⁴ fanden in Winkelkorrelationsmessungen für den Quadrupolanteil des 630 keV-Überganges einen Wert $E2 \geq 90\%$. Interpretiert man die Anregungszustände bei 835 keV, 1465 keV und 1729 keV als Quadrupolvibrationen, so läßt sich nach der mikroskopischen Theorie von BELJAEV und ZELEVINKIJ³⁷ und der energetischen Lage dieser Niveaus die Lage des Zweiphononen 0^+ -Niveaus abschätzen. Danach sollte man das 0^+ -Niveaus des Zweiphononen-tripletts oberhalb 1800 keV erwarten. Die Interpretation des 0^+ -Niveaus bei 690 keV als Mitglied des Zweiphononen-tripletts scheint ziemlich ausgeschlossen. Eine mögliche Erklärung für dieses 0^+ -Niveau geben KREGAR und MIHAILOVIC³⁸. Sie berechneten bei den Germaniumisotopen Ge^{70} , Ge^{72} und Ge^{74} für verschiedene Schalenmodellkonfigurationen nach dem Nilsson-Modell die Gesamtenergie in Abhängigkeit des Deformationsparameters β . Bei allen drei Kernen erscheinen Energie-minima sowohl bei positiven β -Werten ($\beta \approx 0,17$, zigarrenförmige Deformation) als auch bei negativen β -Werten ($\beta \approx -0,13$, Diskusform des Kernes). Erstere entsprechen dem Grundzustand, letztere liegen 0,5 bis 1 MeV darüber. Niedrig gelegene 0^+ -Anregungszustände könnten danach als Gleichgewichtslagen sekundärer Deformationen aufgefaßt werden. Diese Aussagen können jedoch nur von grob qualitativer Art sein, da in den Rechnungen Restwechselwirkungen wie z.B. die Paarkraft nicht berücksichtigt wurden.

Betrachtet man allein die Abregung der beiden Niveaus bei 2066 keV und 2466 keV und berücksichtigt die Auswahlregel $\Delta n_1 = 1$ für Übergänge zwischen Vibrationszuständen, so könnten danach beide Niveaus als Dreiphononen-Quadrupolvibrationen interpretiert werden. Besonders die Abregung des 2066 keV-Niveaus ist bemerkenswert. Obwohl sowohl der 601 keV-Übergang wie der 1230 keV-Übergang zu einem 2^+ -Niveau führt, erhält man unter Annahme einer $E2$ -Strahlung für das Verhältnis der reduzierten Übergangswahrscheinlichkeiten $B(E2, 601 \text{ keV})/B(E2, 1230 \text{ keV}) = 180 \pm 40$. Gegen die Annahme einer kollektiven Natur der beiden Niveaus spricht jedoch die Tatsache, daß beide Zustände bei inelastischer Protonenstreuung, wo man eine starke Anregung kollektiver Zustände erwartet, nicht beobachtet werden¹⁴. Dagegen wird der 2402 keV-Anregungszustand bei dieser Reaktion beobachtet.

Die Anregung und Abregung des 2516 keV-Niveaus ist mit der von DARCEY getroffenen Spin- und Paritätszuordnung 3^- verträglich. Da dieses Niveau bei inelastischer Protonenstreuung stark angeregt wird, liegt hier vermutlich die Oktupol-Vibration vor.

³⁷ BELYAEV, S. T., i G. ZELEVINSKIJ: Soviet Phys. JETP **15**, 1104 (1964).

³⁸ KREGAR, M., and M. V. MIHAILOVIC: NLIJ Report R-484 (1966).

Nach dem Vibrationsmodell erwartet man bei Energien $E \approx E_1(2^+) + E_1(3^-)$ ein Quintett von Anregungszuständen mit Spins und Paritäten 1^- , 2^- , 3^- , 4^- , 5^- , die aus der Kopplung eines Quadrupol- und Oktupolphonons resultieren. Ein Teil der Zustände mit negativer Parität oberhalb

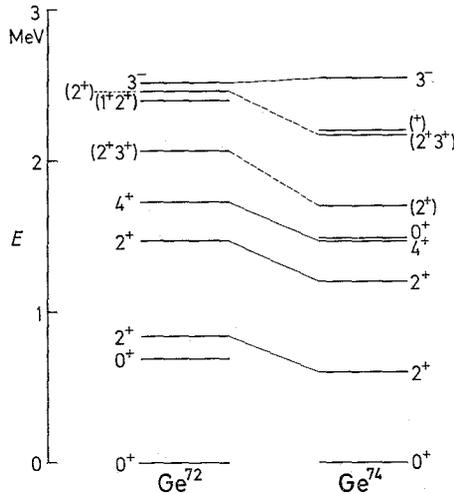


Fig. 7. Vergleich der Niveauschemata von Ge^{72} und Ge^{74} im Energiebereich 0–2,5 MeV (Niveauschema von Ge^{74} aus Ref.¹⁾)

3 MeV könnte auf solche gemischte Vibrationen zurückzuführen sein. Die Anregungszustände bei 2832 keV, 2978 keV, 3097 keV und 3168 keV, die sich überwiegend in den Grundzustand abregen, sind sehr wahrscheinlich auf innere Anregungen zurückzuführen. Ge^{72} besitzt mit 40 Neutronen eine abgeschlossene, halbmagische Neutronenschale, so daß als energetisch niedrigste Einteilchenanregungen Protonenanregungen in Frage kommen. Nach dem Schalenmodell erwartet man im einfachsten Bild Kopplungen von Protonen in der $p_{\frac{1}{2}}$ -, $p_{\frac{3}{2}}$ - und $f_{\frac{5}{2}}$ -Schale, woraus Anregungszustände mit positiver Parität folgen.

Interessant ist ein Vergleich mit dem Niveauschema von Ge^{74} . In Fig. 7 sind die Termschemata der beiden Kerne nebeneinander gezeichnet. Anregungszustände, die sich möglicherweise entsprechen, sind miteinander verbunden. Ge^{74} besitzt ein Neutronenpaar mehr, das in eine neue Schale ($g\ 9/2$) eingebaut wird. Die Systematik der kollektiven Anregungsenergien bei Schalenabschlüssen^{39, 40} (auch bei halben Schalenabschlüssen) spiegelt sich beim Vergleich der beiden Kerne deutlich

³⁹ MICHAELIS, W.: Unveröffentlicht.

⁴⁰ EICHLER, E.: Rev. Mod. Phys. **36**, 809 (1964).

wider. Bei Ge^{72} mit seiner abgeschlossenen Neutronenschale $N=40$ liegen die Quadrupolvibrationen energetisch höher als bei Ge^{74} , wo die beiden Neutronen jenseits der abgeschlossenen Schale den Kern weicher gegenüber Deformationen machen. Die allgemeine Tendenz eines Absinkens des Verhältnisses $E(2^{+}, 4^{+})/E(2^{+})$ kurz vor und bei Schalenabschlüssen kommt auch hier zum Ausdruck, bei Ge^{72} sind diese Energieverhältnisse kleiner als bei Ge^{74} . Dagegen unterscheiden sich die Energien der 3^{-} -Oktupolzustände nur wenig voneinander und bestätigen den allgemeinen Befund, daß die Energie der Oktupolvibrationen viel weniger von der Schalenstruktur abhängt als beispielsweise die der ersten 2^{+} -Anregungszustände.

Herrn Prof. K. H. BECKURTS danke ich für die Anregung und Unterstützung der Arbeit sowie Herrn Dr. W. MICHAELIS für wertvolle Diskussionen.