

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

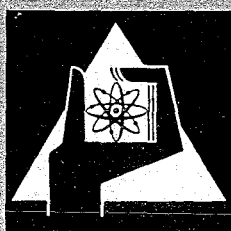
März 1967

KFK 562

Institut für Angewandte Kernphysik

Koinzidenzexperimente bei Neutroneneinfangreaktionen

W. Michaelis, U. Fanger, D. Lange, G. Markus, H. Schmidt,
C. Weitkamp



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

März 1967

KFK 562

Institut für Angewandte Kernphysik

Koinzidenzexperimente bei Neutroneneinfangreaktionen *

von

W. Michaelis, U. Fanger, D. Lange, G. Markus, H. Schmidt
und C. Weitkamp

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

* Kurzfassung eines Fachberichtes für die " Diskussionstagung
über Neutronenphysik an Forschungsreaktoren " vom 25. - 28. April
1967 in der Kernforschungsanlage Jülich

1. Einleitung

Durch die schnell fortschreitende Entwicklung der Experimentiermethoden in der (n,γ) -Spektroskopie ist die Neutroneneinfangreaktion zu einem der wichtigsten Hilfsmittel für die Untersuchung der Kernstruktur geworden. Hochauflösende Spektrometer für den unteren Energiebereich und die Anwendung des Ritz'schen Kombinationsprinzips gestatten ein detailliertes Studium der tiefliegenden Anregungszustände. Diese Methode versagt jedoch bei höheren Anregungen. Das gilt z.B. für die Untersuchung von Mehr-Quasiteilchenzuständen und Mehrphononenanregungen. Koinzidenzexperimenten kommt hier eine besondere Bedeutung zu. Auch im unteren Energiebereich macht die komplexe Struktur der Spektren in vielen Fällen eine Bestätigung der nach dem Ritz'schen Prinzip gewonnenen Resultate wünschenswert. Die Verwendung von Halbleiterzählern in verschiedenen Koinzidenzanordnungen ermöglicht zudem die Ausdehnung von Präzisionsmessungen der Einzelspektren auf den gesamten Energiebereich. Der vorliegende Bericht gibt eine zusammenfassende Darstellung der Koinzidenzuntersuchungen, die am Karlsruher Reaktor FR 2 durchgeführt werden.

2. Mehrparameter-Experimente

Den entscheidenden Fortschritt für die Koinzidenztechnik brachte die Entwicklung Lithium-gedrifteter Germaniumzähler, die heute mit Volumina bis etwa 50 cm^3 hergestellt werden können. Die Kombination Halbleiterzähler-NaJ(Tl)-Szintillationszähler stellt z.Z. die aussichtsreichste Methode dar. Probleme der Zeitauflösung sind weitgehend gelöst. Die maximal zulässige Quellstärke wird nicht durch die erreichbare Auflösungszeit, sondern durch die Zählrateneffekte in der Elektronik des Halbleitersystems bestimmt. Die Entnahme des Zeitsignals für den Germaniumzähler erfolgt zweckmäßig hinter dem ladungsempfindlichen Vorverstärker. Auf diese Weise kann jegliche Verschlechterung

des Energieauflösungsvermögens durch das Zeitsystem vermieden werden. Bewährt hat sich eine Schaltung, die nach der leading-edge-Methode arbeitet und aus einer Emitterfolger-Stufe, einer Clipping-Stufe und einem Breitbandverstärker mit Limiter und nachfolgendem Tunneliodendiskriminator aufgebaut ist [1]. Abb. 1 zeigt den Koinzidenzwirkungsgrad η als Funktion der Zeitauflösung für ein System bestehend aus einem 3" \varnothing x 3" NaJ(Tl)-Detektor und einem 34 cm³ Ge-Zähler mit geschlossenem Ende. η bezieht sich auf die integrale Zählrate oberhalb einer Schwelle von 80 keV bzw. 100 keV im Ge- bzw. im Szintillationszähler. Die Verwendung von Halbleitern mit durchgehendem p-Core gestattet eine weitere Verbesserung. Der ladungsempfindliche Vorverstärker mit gekühlten parallel geschalteten Feldeffekttransistoren [2,3] liefert für Zähler im Bereich von 30 cm³ eine Energieauflösung zwischen 4,2 und 4,8 keV FWHM. Als Beispiel ist in Abb. 2 das Ergebnis einer Koinzidenzmessung an der Reaktion Dy¹⁶⁴(n, γ) Dy¹⁶⁵ wiedergegeben. Die Berücksichtigung des koinzidenten Untergrundes unter den Linien mit Hilfe der Doppelfenster-Methode ist bei Messungen dieser Art von entscheidender Bedeutung. Durch Verwendung eines Doppel-ADC ($\geq 2 \times 12$ bit) wird die optimale Ausnutzung dieses Verfahrens erheblich erleichtert. Mit Germaniumzählern von ≈ 50 cm³ Volumen sind auch Koinzidenzmessungen zwischen zwei Halbleiterdetektoren erfolgversprechend. Der Aufbau eines solchen Systems wird z.Z. vorbereitet.

Je nach Struktur und Intensitätsverteilung des Gammaspektrums kann es in verschiedenen Fällen nach wie vor vorteilhaft sein, ausschließlich NaJ(Tl)-Detektoren zu verwenden. Auch hier ist das Doppelfenster-Verfahren von entscheidender Bedeutung. Die Leistungsfähigkeit dieser Methode demonstriert Abb. 3. Zu erwähnen ist ferner die Summenkoinzidenztechnik (Abb. 4), die mit gutem Erfolg auch in einer 3-Parameter-Anordnung angewendet werden kann [4]. Das Verfahren empfiehlt sich insbesondere dann, wenn keine angereicherten Isotope zur Verfügung stehen.

Der genaueren Identifizierung der Anregungszustände dient die Messung der Gamma-Gamma-Winkelverteilung. Die Verwendung eines Doppel-ADC in Verbindung mit der Karlsruher MIDAS-Anlage gestattet die gleichzeitige Messung mehrerer Kaskaden sowie die systematische Durchführung des

Doppelfenster-Verfahrens. Abb. 5 zeigt als Beispiel die Analyse der Winkelverteilung für die 3.010 MeV-1.836 MeV-Kaskade aus der Reaktion $\text{Sr}^{87}(n,\gamma)\text{Sr}^{88}$.

3. Koinzidenzmethoden zur Präzisionsmessung von Einzelspektren

Um das hohe Energieauflösungsvermögen von Ge(Li)-Zählern voll ausnutzen zu können, ist es wünschenswert, den Compton-Untergrund unter den Linien erheblich zu reduzieren. Für den Energiebereich von etwa 0.3 bis 2.5 MeV wurde ein Anti-Compton-Spektrometer entwickelt, das hohe Präzision mit vergleichsweise guter Ansprechwahrscheinlichkeit vereinigt [5,6]. Die Anordnung besteht aus einem $4,9 \text{ cm}^3$ Ge(Li)-Detektor, einem $50 \text{ cm } \varnothing \times 40 \text{ cm}$ Plastiksintillator und einem $4'' \varnothing \times 6''$ NaJ(Tl)-Zähler für den Streuwinkel $\vartheta = 0^\circ$. Zur Reduzierung des Compton-Untergrundes wird zusätzlich eine Impulsformdiskriminierung durchgeführt [7]. Die Energieauflösung beträgt 2.15 keV FWHM für die 662 keV Linie des Cs^{137} . Abb. 6 zeigt einen Ausschnitt aus dem Eingangsspektrum der Reaktion $\text{Yb}^{168}(n,\gamma)\text{Yb}^{169}$. Zur Bestimmung der genauen Energiewerte werden die gemessenen Linien durch modifizierte Gaussfunktionen approximiert. Ein Präzisionsimpulsgeber [8] dient zur Eliminierung der Nichtlinearitäten des elektronischen Systems.

Ein 5-Kristall-Paarspektrometer mit einem Ge(Li)-Zähler als Primär-detektor [9] liefert genaue Energiewerte für den hochenergetischen Teil der Eingangsspektren. Die Anordnung besteht z.Z. aus einem $2,8 \text{ cm}^2 \times 2 \text{ mm}$ Ge-Zähler sowie aus vier speziell zugeschnittenen $3'' \varnothing \times 3''$ NaJ(Tl)-Detektoren. Abb. 7 zeigt als Beispiel einen Ausschnitt aus dem Paarspektrum des Yb^{169} ,

Zur Untersuchung der Multipolaritäten der hochenergetischen Übergänge bietet sich die Ausnutzung der inneren Paarerzeugung an. Wegen des Auflösungsvermögens und der Koinzidenzfähigkeit von Halbleitern liegt der Versuch nahe, diese Zähler zur Spektroskopie der Positron-Elektron-Paare zu verwenden. Z.Z. laufen Vorstudien für ein Spektrometer, das im wesentlichen aus 3 Halbleiterteleskopen für die Elektronen sowie aus vier Szintillationszählern zum Nachweis der Positron-Vernichtungsstrahlung besteht. Die Anordnung soll die Messung sowohl des Paarerzeugungskoeffizienten als auch der Winkelverteilung der Positron-Elektron-Paare (Abb. 8) gestatten.

4. Einige Resultate

Koinzidenzuntersuchungen werden vor allem in den Massenbereichen $50 < A < 90$ sowie $160 < A < 170$ durchgeführt. In den Abb. 9 bis 11 sind einige der neueren Resultate zusammengefaßt (unveröffentlicht).

Abb. 9 zeigt das Niveauschema für ${}_{66}^{99}\text{Dy}^{165}$. Die Ergebnisse sind konsistent mit der Annahme folgender Bandenköpfe: 0 keV, $7/2^+$ [633]; 108.2 keV, $1/2^-$ [521]; 184.3 keV, $5/2^-$ [512]; 533.5 keV, $5/2^-$ [523]; 538.6 keV, $7/2^+$ [633] + Q_{22} ; 570.3 keV, $5/2^-$ [512] + Q_{22} + $1/2^-$ [510]; 573.6 keV, $3/2^-$ [521] + $1/2^-$ [521] + Q_{22} ; 1103.3 keV, $3/2^-$ [512] (?). Hierbei sind nur die überwiegenden Komponenten aufgeführt. Der Zustand bei 1167 keV stellt möglicherweise eine Drei-Quasiteilchenkonfiguration dar.

Von einigen Ausnahmen abgesehen sollte die Niveaustuktur des ${}_{70}^{99}\text{Yb}^{169}$ der des ${}_{66}^{99}\text{Dy}^{165}$ sehr ähnlich sein. Abb. 10 zeigt das Ergebnis einer vorläufigen Analyse der Daten, die mit dem Anti-Compton-Spektrometer gemessen wurden. Es ergeben sich folgende Bandenköpfe: 0 keV, $7/2^+$ [633]; 24.2 keV, $1/2^-$ [521]; 191.4 keV, $5/2^-$ [512]; 569.9 keV, $5/2^-$ [523]; 580.5 keV, $5/2^+$ [642]; 590.3 keV, $3/2^+$ [651] + $7/2^+$ [633] + Q_{22} (?); 659.5 keV, $3/2^-$ [521]; 806.9 keV, $5/2^-$ [512] + Q_{22} + $1/2^-$ [510]; 1262 keV, $3/2^-$ [512] (?).

Abb. 11 zeigt die tiefliegenden Anregungen im Fe^{58} . Ein Teil der Niveaus ist offensichtlich kollektiver Natur. Weitere Messungen zum Fe^{58} werden z.Z. ausgewertet.

Die Analyse der Winkelverteilung in Abb. 5 weist darauf hin, daß der Anregungszustand bei 4846 keV im Sr^{88} mit großer Wahrscheinlichkeit Spin und Parität 3^- hat. In diesem Energiebereich erwartet man nach dem Schalenmodell Zustände mit ungerader Parität durch Anregung eines Protons aus der $p_{3/2}$ oder $f_{5/2}$ Konfiguration in die $g_{9/2}$ Bahn. Die entsprechende Kopplung ergibt Zustände mit 3^- bis 6^- bzw. 2^- bis 7^- . Insgesamt wurden bisher die Winkelverteilungen von 6 Kaskaden im Sr^{88} ausgemessen.

Literatur:

- (1) W. Michaelis, Nuclear Instr. and Meth. (erscheint demnächst)
- (2) K.F. Smith und J.E. Cline, IEEE Trans. Nucl. Science, NS-13, No. 3 (1966) 468
- (3) U. Tamm, KFK 509 (1967)
- (4) H. Schmidt, W. Michaelis, C. Weitkamp und G. Markus, Z. Physik 194 (1966) 373
- (5) W. Michaelis und H. Schmidt, KFK 429 (1966); Proc. of a IAEA Panel, Vienna, 6-10 June 1966
- (6) W. Michaelis und H. Küpfer, Nuclear Instr. and Meth. (erscheint demnächst)
- (7) U. Tamm, W. Michaelis und P. Coussieu, Nuclear Instr. and Meth. (im Druck)
- (8) F. Horsch, KFK 558 (1967)
- (9) G. Markus, W. Michaelis, H. Schmidt und C. Weitkamp, Z. Physik (erscheint demnächst)

Abbildungen

- Abb. 1 Koinzidenzwirkungsgrad für ein Ge(Li)-NaJ(Tl)-System als Funktion der Zeitauflösung τ für alle Signale oberhalb einer Schwelle von 80 keV bzw. 100 keV, gemessen mit einer Co^{60} -Quelle.
Ge-Zähler: 34 cm^3 , koaxial gedriftet mit geschlossenem Ende
NaJ(Tl)-Zähler: $3'' \varnothing \times 3''$, Photomultiplier RCA 8054
- Abb. 2 Koinzidenzspektrum zur 184.3 keV Linie des Dy^{165} , aufgenommen mit der in der Bildunterschrift zu Abb. 1 beschriebenen Anordnung. Das untere Spektrum gibt den koinzidenten Untergrund wieder. Unterstrichene Linien treten in Koinzidenz zur 184.3 keV Strahlung auf.
- Abb. 3 Koinzidenzspektrum zur 7.264 MeV Linie im Fe^{58} , aufgenommen mit zwei $4'' \varnothing \times 5''$ NaJ(Tl) Detektoren. Gezeigt ist das Differenzspektrum nach der Doppelfenstermethode. Die Einstellung des inneren Fensters ist rechts oben wiedergegeben.

- Abb. 4 Untere Hälfte des Summenkoinzidenzspektrums für die Reaktion $\text{Fe}^{57}(n,\gamma)\text{Fe}^{58}$.
- Abb. 5 Analyse der Winkelverteilung der 3.010 MeV-1.836 MeV Kaskade im Sr^{88}
- Abb. 6 Ausschnitt aus dem Gammaspektrum der Reaktion $\text{Yb}^{168}(n,\gamma)\text{Yb}^{169}$, aufgenommen mit dem Anti-Compton-Spektrometer. Energiebereich 552 - 769 keV. Kanalbreite 197 eV.
- Abb. 7 Ausschnitt aus dem Paarspektrum des Yb^{169} . Energiebereich 4.37 bis 6.20 MeV.
- Abb. 8 Verhältnis der Zahl der Positron-Elektron-Paare mit $\theta = 0$ zu der Zahl mit $\theta = \theta'$ als Funktion der Gammaenergie bei der inneren Paarerzeugung. $\theta' = 45^\circ$ und 90° .
- Abb. 9 Niveauschema des Dy^{165} . Neben den primären Übergängen sind nur solche Übergänge eingezeichnet, die in Koinzidenzuntersuchungen beobachtet wurden. Punkte markieren eindeutig nachgewiesene Koinzidenzbeziehungen. Die Lage nicht gekennzeichnete Übergänge ist wahrscheinlich. Gestrichelte Übergänge sind entweder unsicher oder können in Übereinstimmung mit den Koinzidenzspektren an zwei Stellen eingeordnet werden.
- Abb. 10 Niveauschema des Yb^{169} (vorläufige Daten). Dicke Pfeile kennzeichnen direkte Übergänge vom Einfangzustand.
- Abb. 11 Anregungen des Fe^{58} aus der Reaktion $\text{Fe}^{57}(n,\gamma)\text{Fe}^{58}$. Punkte markieren eindeutig nachgewiesene Koinzidenzbeziehungen.

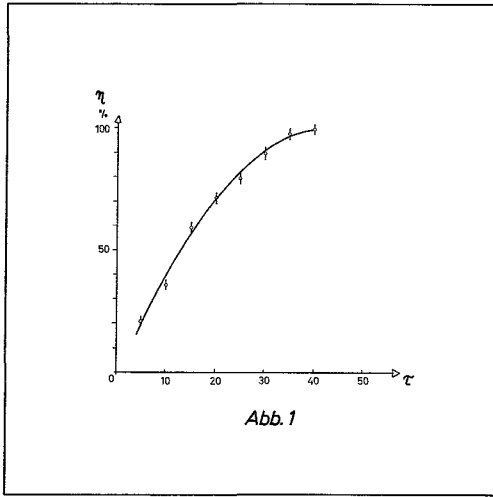


Abb. 1

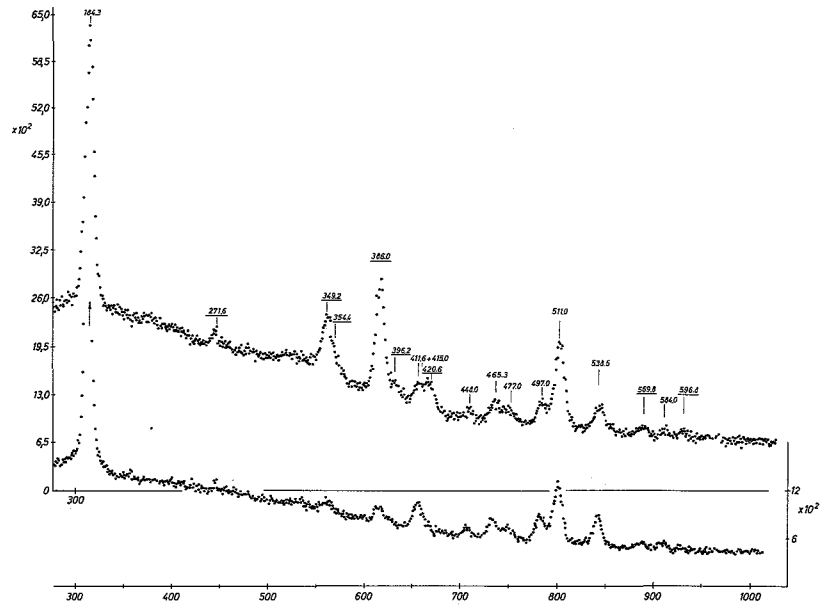


Abb. 2

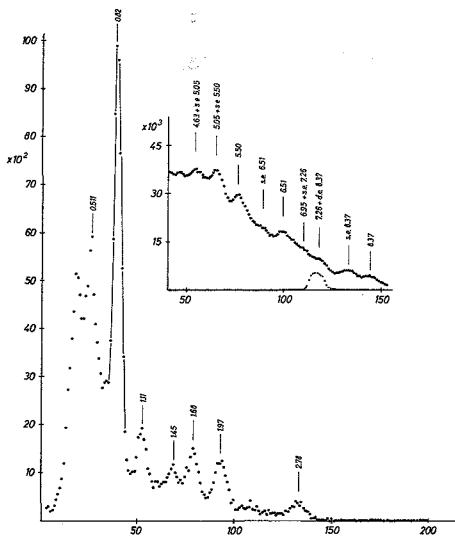


Abb. 3

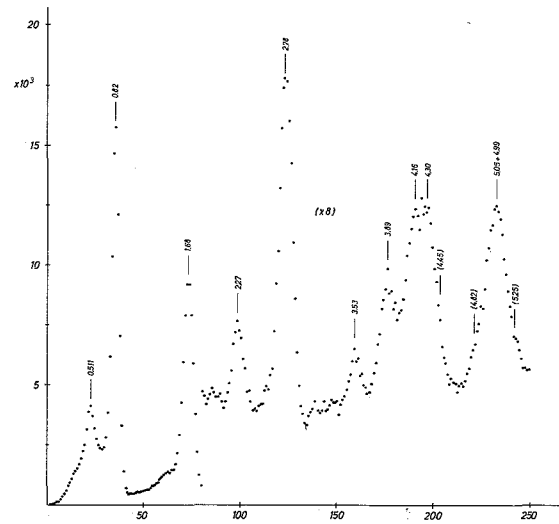


Abb. 4

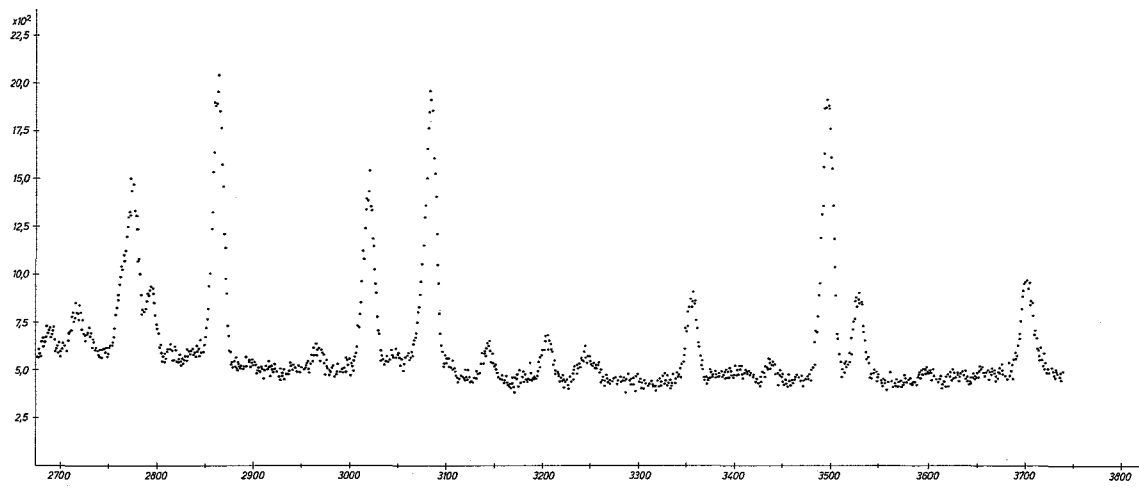


Abb.6

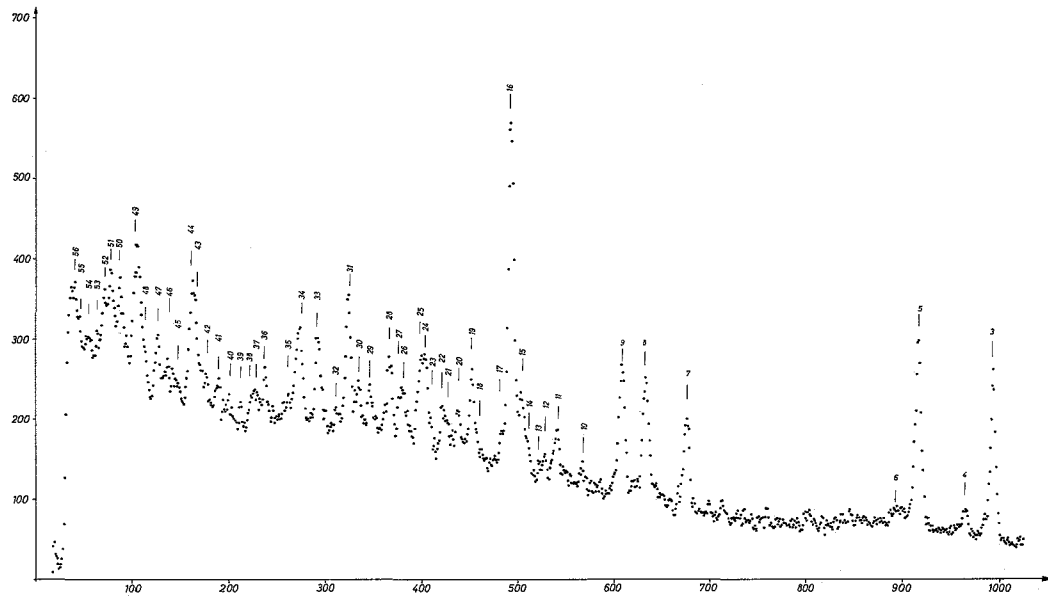


Abb.7

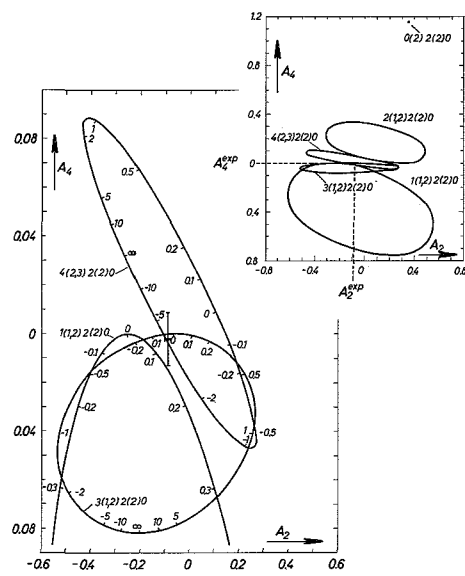


Abb.5

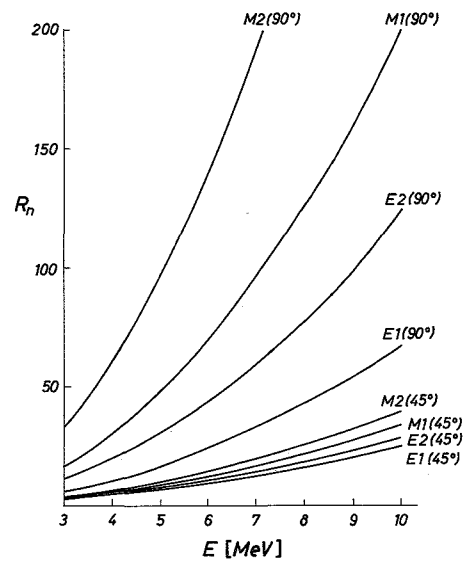


Abb.8

Dy + n
164

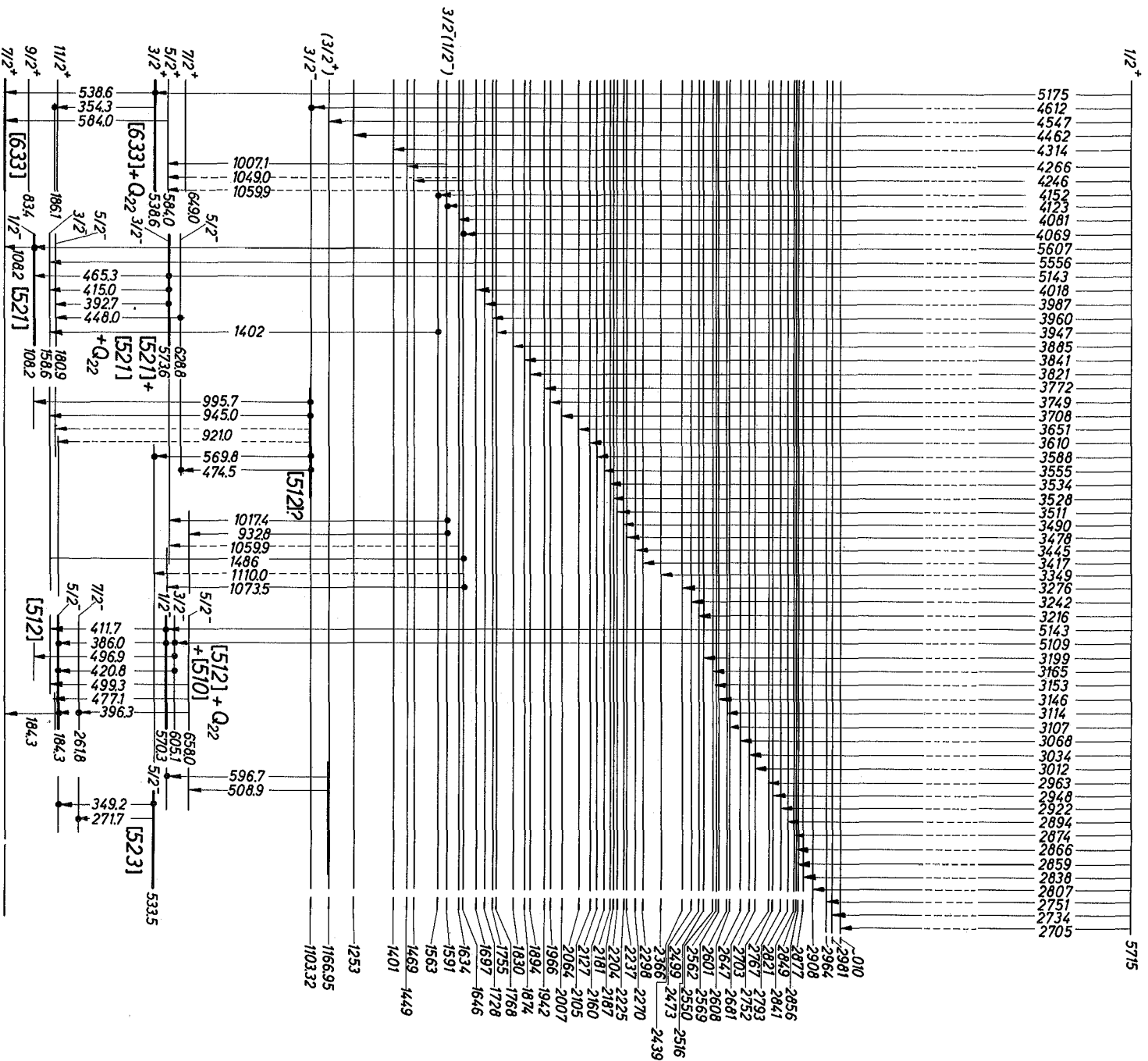


Abb.9

DY
165

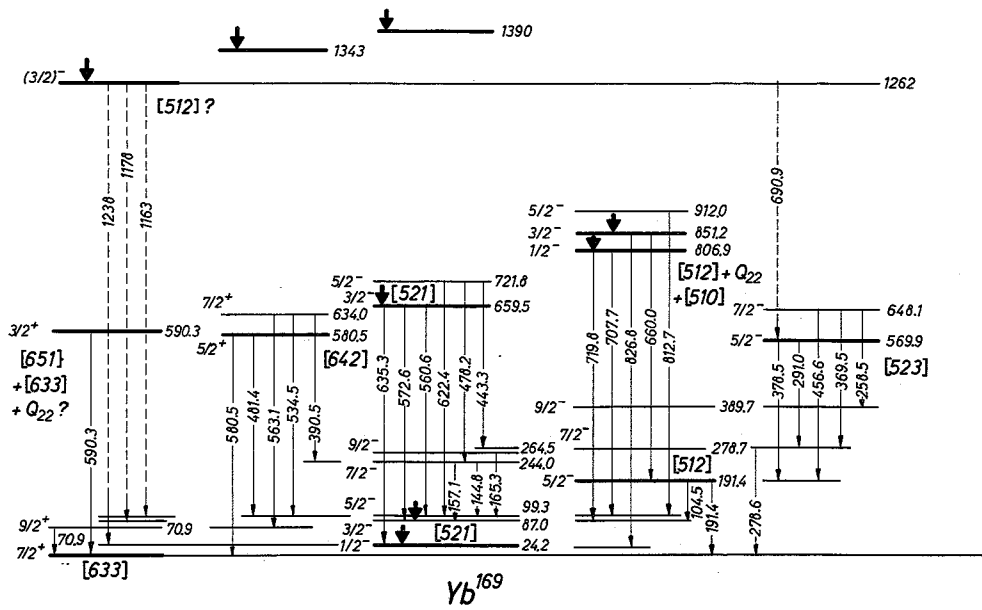


Abb. 10

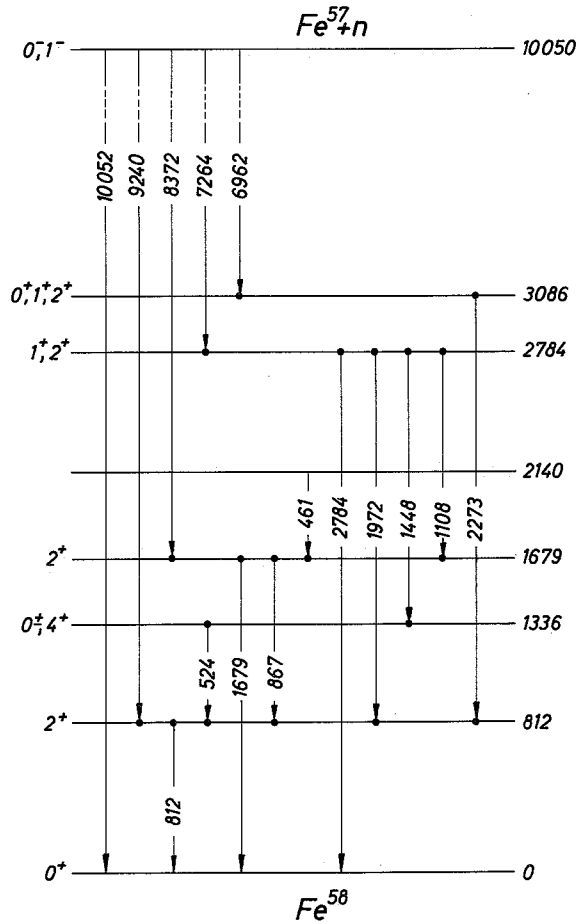


Abb. 11