Der Deuteronenaufbruch an mittelschweren Kernen

Autor(en): Viatte, P. / Micek, S. / Müller, R.

Objekttyp: Article

Zeitschrift: Helvetica Physica Acta

Band (Jahr): 49 (1976)

Heft 4

PDF erstellt am: 23.05.2024

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-114783

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek* ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Der Deuteronenaufbruch an mittelschweren Kernen

von P. Viatte, S. Micek¹), R. Müller, J. Lang, J. Unternährer, C. M. Teodorescu²) und L. Jarczyk¹)

Laboratorium für Kernphysik ETH Zürich, Schweiz

(6. II. 1976)

Abstract. Spins, parities and partial widths of proton unbound states in 41 Sc and 59 Cu have been determined by proton-neutron angular correlation measurements on the reactions 40 Ca $(d, n){}^{41}$ Sc $(p){}^{40}$ Ca and 58 Ni $(d, n){}^{59}$ Cu $(p){}^{58}$ Ni at deuteron energies of 11 and 10 MeV respectively, for a fixed neutron angle (25°) and various proton angles. The data were analyzed in the framework of the DWBA theory using a resonance form factor. The calculations were performed following the approach of Vincent and Fortune.

Seven levels in ⁴¹Sc were studied in the excitation energy range of 3 to 7 MeV. Compared with values given in the literature, the consistence of the spins and parities assigned proves the applicability of the particle-particle correlation method as an alternative tool for the investigation of stripping reactions to resonant states. The agreement of the extracted resonance widths with those known from elastic proton scattering is an important test for the reliability of DWBA calculations. In the case of ⁵⁹Cu new spectroscopic information was obtained in the excitation energy range of 5.4 to 8.4 MeV. Thirty resonances could be identified as levels in ⁵⁹Cu, 17 of which could be interpreted.

The stripping reaction turns out to be a complementary technique to elastic proton scattering for the study of higher angular momentum states which, considering the different barrier transmission factor, are easier to observe in transfer reactions.

1. Einleitung

Verschiedene Reaktionsmechanismen können zum Aufbruch des Deuterons in ein Proton und ein Neutron beitragen. Bei schweren Kernen ($Z \sim 80$) und niedrigen Deuteronenenergien (<12 MeV) ist die einfache Spaltung im Coulombfeld vorherrschend (Fig. 1a). Die Spektren der auslaufenden Teilchen sind glatt und ohne ausgeprägte Struktur [1]. Für leichte Kerne hingegen weisen die Spektren gut getrennte Linien auf, die isolierten Resonanzen in einem Zwischenkern entsprechen [2]. In diesen Stufenzerfällen kann entweder das Proton oder das Neutron eingefangen werden und zusammen mit dem Targetkern einen Zwischenkern R bilden (Fig. 1c). Dieser Zwischenkern R emittiert das eingefangene Teilchen (Teilchen 2) wieder und zerfällt zum Grundzustand oder zu angeregeten Zuständen des Targetkerns (Teilchen 1: nicht eingefangenes Teilchen). Dieser Prozess wird als Stripping zu teilcheninstabilen Zuständen bezeichnet. Es kann auch sein, dass das einfallende Deuteron mit dem Targetkern einen 'Compound-Kern' bildet, der dann in ein Proton bzw. Neutron (Teilchen 1) und den Kern R zerfällt, der seinerseits dann in ein Neutron bzw. Proton

¹) Ständige Adresse: Instytut Fizyki, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, Polen.

²) Ständige Adresse: Institut für Atomphysik, Bukarest, Rumänien.



a-c: Drei Graphen, welche mögliche Aufbruchmechanismen darstellen; a) Einfache Spaltung im Coulombfeld; b) 'Compound'-Prozess; c) Strippingreaktion mit 'Off-shell' Streuung; d) Elastische ('On-shell') Streuung.

(Teilchen 2) und den Targetkern zerfällt (Fig. 1b). Im allgemeinen ist für kleine Emissionswinkel von Teilchen 1 und Deuteronenenergien oberhalb der Coulombbarriere der Strippingmechanismus überwiegend.

Die Untersuchung teilcheninstabiler Zustände mit Hilfe von Strippingreaktionen ist in letzter Zeit auf einiges Interesse gestossen, insofern als der Strippingprozess zu resonanten Zuständen mit der elastischen Streuung in Verbindung gebracht werden kann (Fig. 1d). Der Strippingprozess wird in diesem Zusammenhang als 'Off-energyshell'-Streuung bezeichnet, gemäss der Tatsache, dass in diesem Fall das gestreute Teilchen ein virtuelles Teilchen ist, das nicht auf der Energieschale liegt.

Die Untersuchung von Strippingreaktionen bildet deshalb eine komplementäre Technik zur elastischen und inelastischen Streuung, um Information über meistens hochangeregte Zustände zu gewinnen. Auf diese Art und Weise können oft Zustände bevölkert werden, die in der elastischen Streuung nur schwach angeregt und deshalb experimentell schlecht ausgemessen werden können. Aber auch ein Vergleich von elastischer Streuung und Stripping-prozess ist von Interesse. Die Resonanzparameter (Spin, Parität, Breite), welche mit Hilfe einer DWBA-Analyse ermittelt werden, können mit denjenigen aus der elastischen Streuung verglichen werden. Ein Vergleich dieser Grössen aus beiden Experimenten liefert Auskunft über die Güte der Näherungen, welche der DWBA zugrunde liegen. Ein solcher Test ist für Reaktionen zu gebundenen Zuständen nicht möglich.

In den letzten Jahren wurde dem Problem, wie resonante Endzustände im Rahmen der DWBA behandelt werden können, besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Es tauchen in diesem Fall zusätzliche Konvergenzprobleme auf. Verschiedene Lösungswege sind vorgeschlagen worden, die vergleichbare Resultate liefern [3]. Es liegen aber bis jetzt nur begrenzt experimentelle Daten vor, die einen Vergleich von elastischer Streuung und Strippingreaktion erlauben. Solche Experimente sind vorwiegend auf (d, p) Reaktionen beschränkt und hauptsächlich an leichten Kernen ausgeführt worden [4-7].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der Deuteronenaufbruch an mittelschweren Kernen wie ⁴⁰Ca und ⁵⁸Ni durch gleichzeitige Messung beider Aufbruchteilchen in einem kinematisch vollständigen Experiment untersucht. Die Neutron-Proton-Winkelkorrelation gibt Auskunft über die Polarisation und damit über den Entstehungsprozess sowie den Spin des kurzlebigen Zwischenkerns. Die Teilchen-Teilchen-Winkelkorrelationsmethode ist bis jetzt nur vereinzelt, vorwiegend an leichten Kernen [2, 15, 27] zur Untersuchung teilcheninstabiler Zustände angewendet worden, da erst seit kürzerer Zeit zweidimensionale Analysen, wie sie durch die Koinzidenzmessung zweier Teilchen bedingt werden, mit genügender Auflösung möglich sind.

Sowohl im Falle des ⁴⁰Ca als auch im Falle des ⁵⁸Ni können dank der niedrigen Protonseparationsenergie protoninstabile Zwischenkernzustände (⁴¹Sc, ⁵⁹Cu) in einem Bereich nicht allzu hoher Niveaudichte untersucht werden. Wegen des Einteilchencharakters des ⁴¹Sc, dessen Niveaus von andern Arbeiten [8–11] her gut bekannt sind, ist der doppelt magische Kern ⁴⁰Ca einerseits als Test für die Teilchen-Teilchen-Winkelkorrelationsmethode anderseits als Prüfstein für die DWBA geeignet. Im Falle des ⁵⁸Ni ist ein Vergleich mit (*p*, *p*) Streuexperimenten [13, 14, 36] im Zusammenhang mit den kollektiven Eigenschaften, welche dem ⁵⁹Cu zugeschrieben werden [12], von Interesse.

Es existieren (d, np) Messungen an ⁴⁰Ca und ⁵⁸Ni von Nemets et al. [16] mit 13,6 MeV Deuteronen, deren Spektren, ähnlich wie für schwere Kerne, einen kontinuierlichen Verlauf aufweisen, der einem Diffraktionsmechanismus zugeschrieben wird. Unsere Messungen, dank besserer Auflösung und verfeinerter Akquisitionstechnik, haben es erlaubt, eine Reihe Resonanzen zu trennen, die einem schwachen kontinuierlichen Untergrund überlagert sind und demonstrieren damit eindeutig die Vermutung von Fink et al. [17], dass hauptsächlich Stufenprozesse für den Aufbruch verantwortlich sind.

2. Messprinzip

Ein kinematisch vollständiges Experiment erfordert bei Reaktionen mit drei Teilchen im Endzustand, wie dies für den Deuteronenaufbruch der Fall ist, die Festlegung der Richtungen von Teilchen 1 und 2 sowie der Energien eines der Teilchen, z.B. von 2.

Mit der zusätzlichen Bestimmung der Energie von Teilchen 1 wird eine kinematische Ueberbestimmung erreicht, die es erlaubt, Zerfälle zu verschiedenen Anregungszuständen des Endkerns zu trennen. Weiter können Beiträge, herrührend von möglichen Konkurrenzreaktionen am Targetkern oder verursacht durch Sauerstoff- und Kohlenstoffkontaminationen im Target, abgetrennt werden. Schliesslich ergibt sich dadurch die Möglichkeit, den Untergrund, der durch zufällige Koinzidenzen bedingt ist, abzuziehen. Im zweidimensionalen Energiespektrum liegen alle wahren Ereignisse, die von einer bestimmten Dreikörperreaktion stammen, auf einer kinematisch gegebenen Kurve.

Die Verteilung entlang dieser Kurve gibt darüber Aufschluss, ob ein- oder zweistufige Prozesse vorliegen. Während die einfache Spaltung im Coulombfeld (Fig. 1a) zu einem kontinuierlichen Verlauf führt, sind bei einem Stufenzerfall (Fig. 1b und c) die von einem bestimmten Niveau im Zwischenkern R herrührenden Ereignisse in einem Gebiet um einen Punkt der kinematischen Kurve konzentriert.

Nicht zu unterscheiden ist auf Grund der Lage im zweidimensionalen Energiespektrum, ob der Zwischenkern *R* durch Anlagerung eines Protons oder eines Neutrons gebildet wurde. Nun ist aber die Relativenergie des Teilchenpaares (2, Endkern), die gleich der Zerfallsenergie ist, unabhängig sowohl von der Einfallsenergie des Deuterons wie auch vom Winkel, unter dem Teilchen 2 gemessen wird. Untersucht man demnach für eine bestimmte Resonanz die Relativenergien Neutron-Endkern und Proton-Endkern als Funktion der Projektilenergie, lässt sich abklären, ob ein proton- oder neutroninstabiler Zustand vorliegt. Die Anregungsenergie ist dann gleich der Relativenergie plus der Separationsenergie von Teilchen 2.

Ueber den Bildungsmechanismus (Fig. 1b oder c) und die Eigenschaften dieses Zwischenkerns gibt neben der Winkelverteilung des Teilchens 1 auch die Winkelkorrelation mit dem vom Zerfall herrührenden Teilchen 2 Auskunft. Für eine bestimmte Emissionsrichtung von Teilchen 1 und damit vom Zwischenkern R wird die Winkelverteilung des beim Zerfall von R emittierten Teilchens 2 durch die geraden Tensormomente der Polarisation von R bestimmt und ist damit abhängig vom Reaktionsmechanismus. Der Verlauf der Winkelkorrelationskurve (Anzahl Maxima und Minima, Breite des Hauptmaximums) ist abhängig vom Spin des Zwischenkerns R.

Im Fall von teilcheninstabilen Zuständen bietet damit die Winkelkorrelationsmethode eine Alternative zu üblichen Polarisationsexperimenten, bei denen entweder das einlaufende Teilchen polarisiert oder die Polarisation eines der auslaufenden Teilchen gemessen wird. Misst man beispielsweise bei Stripping-Reaktionen nur die Winkelverteilung von Teilchen 1, so erhält man zwar Aufschluss über den an den Kern R übertragenen Drehimpuls *l*. Polarisationsmessungen sind jedoch erforderlich, damit die Aussagen über den Spin der Zwischenkernzustände eindeutig werden (für Targets mit Spin 0⁺ gilt: $J_R = l \pm \frac{1}{2}$, $\pi_R = (-1)^l$).

Wird nur Teilchen 1 gemessen, so taucht bei (d, n)-Reaktionen zur Untersuchung protoninstabiler Zustände zusätzlich die Schwierigkeit auf, dass die Energien von schnellen Neutronen (bis 8 MeV) genügend genau bestimmt werden müssen. Nebst den obenerwähnten Vorteilen einer kinematischen Ueberbestimmung bietet die gleichzeitige Messung von Proton und Neutron die Möglichkeit, die Neutronenenergien aus den mit guter Auflösung messbaren Protonenenergien mittels kinematischer Beziehungen auszurechnen, so dass auf eine extrem gute Zeitauflösung verzichtet werden kann.

3. Experiment

3.1. Messanordnung und Messtechnik

Die Messungen, über die hier berichtet wird, wurden mit Deuteronenstrahlen des EN-Tandem-Van-de-Graaff-Beschleunigers der ETH Zürich durchgeführt. Die Strahlströme lagen im Bereich von 0,1–0,6 μ A. Der Deuteronenstrahl wurde durch ein 20 cm langes Kollimationssystem mit einer Eintrittsblende von 4 mm Durchmesser auf das Target fokussiert und ungefähr 4 m hinter der Kammer in einem mit 5 cm Blei sowie 1 m³ Paraffin und Bor abgeschirmten Faradaycup gestoppt.

Es wurden Targets aus natürlichem Ca, das zu 97% aus ⁴⁰Ca besteht, verwendet. Die Calciumschicht wurde auf eine Kohlenstoffträgerfolie aufgedampft und war ca. $300 \mu g/cm^2$ dick. Um eine zu rasche Oxydation und ein Auseinanderfallen der Vol. 49, 1976 Der Deuteronenaufbruch an mittelschweren Kernen

Targets zu verhindern, waren sie auf der anderen Seite ebenfalls mit einer dünnen Kohlenstoffschicht bedeckt. Das Nickeltarget bestand aus einer aufgedampften, selbsttragenden Folie von isotopenreinem $(99,9^{\circ}_{0})^{58}$ Ni mit einer Dicke von 250 µg/cm².

Das Experiment bestand darin, die auslaufenden Teilchen in Koinzidenz zu messen, das Proton in einem Halbleiterzähler, das Neutron in einem Szintillationszähler. Die gemessenen Grössen, d.h. die Energie des Protons und die Flugzeitdifferenz zwischen der Ankunft der beiden Teilchen in den Detektoren wurden in einem zweidimensionalen Spektrum abgespeichert. Die ganze experimentelle Anordnung war so aufgebaut, dass gleichzeitig vier Protonenzähler in Koinzidenz mit dem Neutronenzähler betrieben werden konnten.

Die Protonenzähler, mit einer aktiven Fläche von je 80 mm², waren in der Streukammer in 11 cm Distanz vom Target aufgestellt, während sich der Neutronendetektor, bestehend aus einem NE213 Flüssigkeitsszintillator (10 cm Durchmesser, 2,5 cm Dicke) und einem XP-1040 Photomultiplier, ausserhalb der Kammer in 50 cm Distanz befand (Fig. 2).



Figur 2 Schema der Messanordnung.

Die für dieses Experiment verwendete Streukammer (Fig. 3) zeichnete sich im Hinblick auf die Neutronenmessungen durch materialsparende Konstruktionen aus. Die Kammer bestand aus zwei Halbkugeln aus Stahl mit einer Wandstärke von 2 mm, die an einem Trägerring aus Aluminium angeschraubt werden konnten. Das Ganze bildete eine kugelförmige Kammer von 40 cm Durchmesser. Statt auf einer massiven Grundplatte wurden die Zählerhalterungen auf radialen Stäben, die zwischen zwei konzentrische Ringe eingeführt werden konnten, montiert. Diese Ringe, wie auch Targethalter und Monitorzähler, wurden vom Aluminiumring getragen.

Ein vereinfachtes Schema der Elektronik ist in Figur 4 dargestellt. Um die computerorientierte Datenakquisition [18] mit den vorhandenen Mitteln (ADC, Interface) für mehrere Koinzidenzpaare gleichzeitig durchführen zu können, wurde ein Multiplex-System entwickelt [19]. Dieses sehr allgemein konzipierte System benötigte einen Analog-Digital-Konverter (ADC) pro gemessenen Parameter und konnte beliebige Zweifach-Koinzidenzen (schnelle Koinzidenzlogik) aus 6 Teilchendetektoren feststellen und deren Signale multiplexen (Lineare Gates). Es lieferte





Figur 4

Blockdiagramm der Elektronik. ADC = Analog-Digital-Konverter, TAC = Zeit-Amplituden-Konverter, PFA = Pulsformanalysator, $\ll = Verstärker$.

ausserdem ein Analog-Signal, dessen Grösse der Zeitspanne zwischen der Registrierung der beiden Teilchen entsprach (TAC-Signal) und sechs logische Signale, die angaben, von welchem Zählerpaar die Koinzidenz stammte.

Die Zeitsignale für die schnelle Koinzidenzeinheit wurden beim Neutronenzähler über einen Nulldurchgangsdiskriminator gewonnen, während sie bei den Halbleiterzählern aus der ansteigenden Flanke des zusätzlich vom Goldkontakt abgenommenen Stromimpulses abgeleitet wurden.

Die Koinzidenzeinheit war für das Aufbruchexperiment so programmiert, dass sie nur Koinzidenzen zwischen dem Neutronendetektorsignal einerseits und einem Signal der vier Protonenzähler andererseits akzeptierte und die Gates für die linearen, auf konventionelle Weisse von der Aluminiumseite der Halbleiterzähler abgeleiteten Protonensignale aufmachte.

Akzeptierte Ereignisse wurden durch Oeffnen der ADC Gates nur weiter verarbeitet, wenn

1) die linearen Pulse des Neutronenzählers über einer bestimmten Schwelle lagen, welche die Ansprechwahrscheinlichkeit des Neutronendetektors definierte (der diese Schwelle festlegende Diskriminator wurde auf 60 keV aequivalente Elektronenenergie eingestellt);

2) ein Pulsformdiskriminator das im Neutronenzähler registrierte Teilchen als Neutron identifizierte.

Aus den von beiden ADC's gelieferten Informationen und den Erkennungsbits baute der Computer vier zweidimensionale Spektren mit 256 \times 64 Kanälen on-line auf Magnetspeicherplatten auf [20].

ADC 3 nahm unabhängig davon ein eindimensionales Spektrum des Monitorzählers auf, der während der Messung die elastische Streuung der Deuteronen unter 45° registrierte.



Figur 5

Zweidimensionales Spektrum der Reaktion ⁵⁸Ni(d, pn)⁵⁸Ni^{*}. Als Abszisse ist die Neutronenflugzeit aufgetragen (1 ns/K), als Ordinate (es wurden je vier Kanäle summiert) die Protonenenergie (20 keV/K). Die drei auseinanderlaufenden kinematischen Kurven entsprechen verschiedenen Anregungs-zuständen des Endkerns. Längs der Linie am linken Bildrand liegen die Koinzidenzen, welche von Gammastrahlen stammen.

576

Der Faradaycup war an einen Strom-Frequenz-Wandler angeschlossen, dessen Ausgangssignale in Antikoinzidenz mit den Totzeitimpulsen der ADC's gezählt wurden. Auf diese Weise konnten etwaige Totzeitkorrekturen berücksichtigt werden.

3.2. Auswertung der Spektren

Figur 5 zeigt ein Beispiel eines zweidimensionalen Energiespektrums (64×64 Kanäle, in der Ordinate wurde über je vier Kanäle summiert) im Fall von ⁵⁸Ni. Die Protonenenergieachse (Ordinate) wurde mit Hilfe von Reaktionen der Deuteronen am Kohlenstoff geeicht; die Kanalbreite war etwa 20 keV pro Kanal. Der Zeitmassstab (Abszisse) wurde durch Einschalten einer Verzögerungsleitung bekannter Länge bestimmt und betrug etwa 1 ns/Kanal.

In einem ersten Schritt wurden die verschiedenen kinematischen Kurven berechnet, zusammen mit dem Spektrum auf dem Fernsehschirm dargestellt und durch Verschieben eingepasst (der Zeitnullpunkt ist nicht festgelegt). Eine Korrektur berücksichtigte die bei kleinen Protonenenergien auftretende Verflachung des schnellen Protonensignals, die bewirkte, dass der auf die ansteigende Flanke empfindliche Diskriminator später ansprach, was die Flugzeitmessung verfälschte.

In dem zu jedem Protonenkanal gehörenden Zeitspektrum (vgl. Fig. 6) wurde



Figur 6

Flugzeitspektrum der Reaktion ⁵⁸Ni(d, pn)⁵⁸Ni^{*}. In diesem Bild, das einen horizontalen Schnitt durch das zweidimensionale Spektrum darstellt (vgl. Fig. 5), ist die Koinzidenzrate N als Funktion der Neutronenflugzeit T_n für eine bestimmte Protonenenergie aufgetragen. Der Zeitmassstab beträgt 1 ns/K. Die Linien entsprechen Aufbruchereignissen mit verschiedenen Endkernzuständen. Die Kurve, deren auf Grund von ausgewählten Zeitspektren ermittelte Form vorgegeben war, wurde durch Verschieben eingepasst. den auftretenden Linien eine vorgegebene Kurve durch diskretes Verschieben der Lage eingepasst und die Fläche darunter bestimmt. Als Anfangsposition wurde die berechnete Lage der Kinematik gewählt. Die zufälligen Koinzidenzen, die einen konstanten Untergrund längs der Zeitachse bildeten, wurden in der Anpassung durch eine Horizontale mitberücksichtigt. Die von der Flugzeit, resp. Neutronenenergie abhängige Kurvenform wurde auf Grund von ausgewählten Zeitspektren ermittelt und durch eine rationale Funktion angenähert.

Dieses Verfahren wurde sukzessive für alle Protonenkanäle durchgeführt. Aus der daraus resultierenden Intensität N_p längs der Kinematik ergab sich dann der absolute dreifach-differentielle Wirkungsquerschnitt,

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_n \, d\Omega_p \, dE_p} = \frac{N_p}{N_m} \frac{1}{\eta \Delta \Omega_n} \underbrace{\frac{\Delta \Omega_m}{\Delta \Omega_p} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{el,m}}_{NC}$$
(3-1)

 $N_{p,m}$: Stosszahl im Protonen- bzw. Monitorzähler $\Delta\Omega_{n,p,m}$: Raumwinkel des Neutronen- bzw. Protonen- bzw. Monitorzählers $(d\sigma/d\Omega)_{el,m}$: Elastischer Wirkungsquerschnitt für 45° (Monitor)

der auf den Wirkungsquerschnitt der elastischen Streuung normiert ist, so dass weder Strahlintensität noch Targetdicke eingehen. Die Stosszahlen sind auf dieselbe totzeitkorrigierte Ladung bezogen.

Der Term NC wurde in einer separaten Eichmessung (E) bestimmt, indem mit den vier Protonenzählern die elastische Streuung in einem Winkelbereich von 30° bis 105° gemessen wurde. Die Grösse NC ergab sich aus der Anpassung der auf den Monitor normierten Stosszahlen an die auf Grund des optischen Modells berechneten Wirkungsquerschnitte mit NC als freiem Parameter

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{el,p} = NC \frac{N_{Ep}}{N_{Em}}$$
(3-2)

 $N_{Ep,Em}$: Stosszahl im Protonen- bzw. Monitorzähler für die Eichmessung (E) $(d\sigma/d\Omega)_{el,p}$: Elastischer Wirkungsquerschnitt für den Winkel des Protonenzählers

Die Ansprechwahrscheinlichkeit η des Neutronenzählers wurde berechnet, indem die Reaktionen des Neutrons im Szintillationszähler mit einem Monte-Carlo-Programm simuliert wurden und die Detektionsschwelle bei 60 keV äquivalenter Elektronenenergie angenommen wurde. Dies entspricht der Gamma-Energie einer ²⁴¹Am-Quelle. Diese wurde verwendet, um den diese Schwelle definierenden Diskriminator bei jeder Messung neu einzustellen oder während der Messung nachzuprüfen. Die Antwortkurve als Funktion der Neutronenenergie wurde über einen weiten Bereich ($E_n = 0,4$ -5,0 MeV) mit Hilfe der Reaktion $p(T, \tau)n$ mittels der 'associated particle' Methode experimentell bestimmt. Sie gab den berechneten Verlauf wieder, mit einer geringfügigen Abweichung im Absolutwert [21].

3.3. Messergebnisse

Für beide untersuchten Elemente war der Zerfall zum Grundzustand des Endkerns am stärksten. Die ermittelten Aufbruchspektren ergaben immer ein ähnliches Bild wie die Beispiele in den Figuren 7 und 8: Eine Anzahl von Resonanzen ist einem schwachen kontinuierlichen Untergrund überlagert.



Figur 7

Protonenspektrum der Reaktion ${}^{40}Ca(d, pn){}^{40}Ca$ (Endkern im Grundzustand), welches sich aus der Intensität längs der Kinematik im zweidimensionalen Spektrum ergibt. Die Resonanzen entsprechen Zuständen im ${}^{41}Sc$ mit einer Anregungsenergie $E_x = E_r (p{}^{-40}Ca) + 1,086$ MeV = Relativenergie Proton-Endkern + Separationsenergie des Protons.

Um diese Resonanzen identifizieren zu können, wurde für jede beobachtete Resonanz untersucht, ob die Proton-Endkern oder Neutron-Endkern-Relativenergie für verschiedene Deuteronenenergien (${}^{40}Ca: 10,5/10,75/11$ MeV; ${}^{58}Ni: 10/10,25/10,5$ MeV) bei festgehaltenen Zählerkonfigurationen konstant blieb (cf. Abschnitt 2). Auf diese Weise liessen sich sowohl im Fall von ${}^{40}Ca$ als auch im Fall von ${}^{58}Ni$ alle auftretenden Linien als Resonanzen im intermediären (p + T)-System, d.h. als



Figur 8

Protonenspektrum der Reaktion ⁵⁸Ni(*d*, *pn*)⁵⁸Ni (Endkern im Grundzustand), welches sich aus der Intensität längs der Kinematik im zweidimensionalen Spektrum ergibt. Die Resonanzen entsprechen Zuständen im ⁵⁹Cu mit einer Anregungsenergie $E_x = E_r (p^{-58}Ni) + 3,417 \text{ MeV} =$ Relativenergie Proton-Endkern + Separationsenergie des Protons.

protoninstabile Zustände in ⁴¹Sc und ⁵⁹Cu, identifizieren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass teilcheninstabile Neutronenzustände nur oberhalb 8 MeV Anregungsenergie erreichbar sind, da die Neutronenseparationsenergie von dieser Grössenordnung ist (für die Protonen sind die Separationsenergien zwischen 1 und 3,4 MeV). In diesen Bereichen ist die Niveaudichte zu gross, als dass die Zustände noch aufgelöst werden könnten.

Die Winkelverteilung der beim Zerfall der Protonenzustände emittierten Protonen wurde zwischen 30° und 170° sowie 190° und 330° (dem Neutronenzähler entgegengesetzte Seite) für eine Anzahl Niveaus bestimmt, bei einem festgehaltenen Neutronenwinkel von 25° und bei einer Deuteronenenergie von 11 MeV für ⁴⁰Ca resp. 10 MeV für ⁵⁸Ni.

Zur Bestimmung der Winkelkorrelation $d\sigma/d\Omega_n d\Omega_p$ wurde über die Resonanzen integriert. Der zu subtrahierende Untergrund wurde durch eine glatte Kurve angenähert, der durch die Talpunkte zwischen den Resonanzen gezogen wurde. Der kontinuierliche Anteil war, wie dies auch aus den Spektren von den Figuren 7 und 8 ersichtlich ist, im allgemeinen klein, so dass er beim Bestimmen der Fläche unter einer Resonanz nicht von grosser Bedeutung war. Er spielte nur beim ⁵⁸Ni oberhalb 4 MeV Protonenenergie eine Rolle. Der Beitrag herrührend vom einfachen Aufbruch im Coulomb- oder Kernfeld war demnach, verglichen mit andern Reaktionsmechanismen, schwach.

Um zusätzliche Information über den Drehimpuls des transferierten Teilchens zu erhalten, wurde über einen beschränkten Winkelbereich ($\theta_n = 16^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ$) eine Neutronenwinkelabhängigkeit gemessen, für vier festgehaltene Protonenwinkel (100°, 120°, 140°, 160° für ⁴⁰Ca resp. 105°, 125°, 145°, 165° für ⁵⁸Ni) und für Deuteronenenergien $E_d = 11$ MeV (⁴⁰Ca) resp. 10 MeV (⁵⁸Ni). Engere Schritte waren wegen des Oeffnungswinkels von 11,4° des Neutronendetektors nicht sinnvoll und wegen der raschen Abnahme des Wirkungsquerschnitts kamen grössere Winkel für eine Koinzidenzmessung nicht mehr in Frage.

Alle in diesem Abschnitt angegebenen Winkel sind als Winkel im Laborsystem zu verstehen. Diese wurden jeweils in das Ruhesystem des gebildeten Zwischenkerns (⁴¹Sc, ⁵⁹Cu) transformiert. Die Wirkungsquerschnitte in diesem System (Schwerpunktsystem des Zerfalls) ergaben sich durch eine Umrechnung mit Hilfe der geeigneten Phasenraumfaktoren.

Beim ⁴⁰Ca bildete sich im zweidimensionalen Energiespektrum praktisch nur eine kinematische Kurve aus, d.h. es trat fast ausschliesslich der Zerfall vom ⁴¹Sc-Kern zum Grundzustand des Endkerns auf. Kein Zerfall zum ersten angeregten 0⁺ Zustand (3,37 MeV) war zu sehen und nur ein schwacher Beitrag (5%) vom Zerfall zum niedrigsten 2⁺ Zustand (3,90 MeV) konnte beobachtet werden. (Letzterer ist experimentell nicht von einem Zerfall zum niedrigsten 3⁻ Zustand (3,74 MeV) zu unterscheiden.) Beim ⁵⁸Ni hingegen ist neben der dem Zerfall zum Grundzustand entsprechenden kinematischen Linie auch die zum ersten angeregten 2⁺ Zustand (1,45 MeV) gehörende Kurve deutlich sichtbar (siehe Fig. 5). Trotz Messzeiten von 5–6 Stunden ergab aber deren Auswertung infolge des kleinen Wirkungsquerschnittes nur unsichere Spektren, so dass keine Winkelkorrelationskurven bestimmt werden konnten.

4. Theorie

Für die theoretische Beschreibung der Reaktion T(d, n)R(p)T wurden folgende Annahmen gemacht: Vol. 49, 1976 Der Deuteronenaufbruch an mittelschweren Kernen

1) In der Reaktion T(d, n)R wird ein isolierter Zustand mit definiertem Spin und definierter Parität (J_R^n) angeregt.

2) Für die Entstehung des Zwischenkerns R ist hauptsächlich der Strippingmechanismus verantwortlich, so dass zur Beschreibung dieser Reaktion die DWBA herangezogen werden kann.

3) Der Zerfall von R in ein Proton und den Targetkern wird durch das Neutron nicht beeinflusst, so dass sich der Korrelationswirkungsquerschnitt $d\sigma/d\Omega_n d\Omega_p$ in zwei Teile aufspalten lässt: er setzt sich zusammen aus dem Wirkungsquerschnitt für den ersten Reaktionsschritt T(d, n)R, bei dem der Zwischenkern R gebildet wird, multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit, dass beim Zerfall von R das Proton in die Richtung (θ'_p, ϕ'_p) emittiert wird.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_n d\Omega_p} = \frac{d\sigma}{d\Omega_n} \left(\theta_n\right)_{\text{DWBA}} \cdot W(\theta_n; \theta'_p, \phi'_p). \tag{4-1}$$

Diese zwei Anteile des Wirkungsquerschnitts sollem im folgenden kurz besprochen werden. Es wird auf eine umfassende Darstellung der DWBA verzichtet, da viele ausführliche Herleitungen in der Literatur existieren [22, 23].

4.1. Bildung des Zwischenkerns: DWBA-Beschreibung

Bei Anwendung der Zero Range Approximation (Normierungskonstante D_0) und nach Partialwellenzerlegung weist die DWBA Uebergangsamplitude in abgekürzter Schreibweise folgende Form auf

$$T_{fi} = D_0 \sum_{\{k\}} C_{\{k\}}(\vec{k}_{nR}, \vec{k}_{pT}, \vec{k}_{dT}) 2\pi^{1/2} \frac{m_R}{m_T} \frac{1}{k_{dT} k_{pT} k_{nR}} \int_0^\infty \frac{dr}{r} u_{l_n j_n} \left(\frac{m_T}{m_R} r\right) u_{l_p j_p}(r) u_{l_d j_d}(r)$$
(4-2)

wobei $\{k\} = \{l_n, j_n, l_d, j_d\}$ ist und $\hbar k_{dT}$, $\hbar k_{pT}$, $\hbar k_{nR}$ die Relativimpulse Deuteron-Target etc. bedeuten. Die C's beinhalten geometrische Konstanten. Der eigentliche physikalische Vorgang wird durch die radialen Integrale festgelegt.

Die $u_{l_d j_d}$ und $u_{l_n j_n}$ sind die radialen Anteile der gestörten, ausserhalb des Wechselwirkungsbereichs asymptotisch oszillierenden Wellenfunktionen.

Im Fall von resonanten Zwischenkernzuständen ist auch die Wellenfunktion des eingefangenen Teilchens eine Kontinuumwellenfunktion, was zur Folge hat, dass das radiale Integral nur sehr schlecht konvergiert. Vincent und Fortune [24] haben gezeigt, dass durch Verlegung des Integrationsweges in die komplexe *r*-Ebene eine schnellere Konvergenz erreicht werden kann.

Der Zusammenhang zwischen der Uebergangsamplitude T_{fi} und dem messbaren Wirkungsquerschnitt $d\sigma/d\Omega_n$ ist für schmale Resonanzen $(\Gamma_r/E_r \ll 1)$ und bei vernachlässigbarem Untergrund näherungsweise durch folgende Beziehung gegeben [24]:

$$d\sigma \simeq \underbrace{\frac{\mu_{pT}k_{pT}(E_{r})\Gamma_{r}}{\hbar^{2}}}_{K} \underbrace{\frac{\mu_{dT}\mu_{nR}}{(2\pi\hbar^{2})^{2}} \frac{k_{nR}}{k_{dT}} \frac{2J_{R}+1}{(2J_{T}+1)(2s_{d}+1)} \sum |T_{fi}|^{2}}_{\frac{d^{F}\sigma(E_{r})}{d\Omega n}}$$
(4-3)

wobei μ_{pT} , μ_{dT} , μ_{nR} die reduzierten Massen Proton-Target etc. bedeuten. s_d , J_T , J_R sind die Spins des Deuterons, des Targets und des Zwischenkerns. Der Term $d^F \sigma/d\Omega$

hat dieselbe Form wie der Wirkungsquerschnitt für Stripping zu einem gebundenen Zustand mit dem Drehmoment (l_p, j_p) , wobei aber im Matrixelement T_{fi} für das Proton eine resonante Wellenfunktion verwendet wird. Es wird angenommen, dass nach Abzug des Untergrundes nur Beiträge von einer Partialwelle eine Rolle spielen. E_r ist die Resonanzenergie. In der Konstanten K, die von der Integration über die Resonanz herrührt, taucht die Resonanzbreite Γ_r auf. Die Resonanz wurde durch eine Breit-Wigner Form angenähert.

4.2. Zerfall des Zwischenkerns

In einem zweiten Schritt zerfällt der Zwischenkern R mit Spin J_R in ein Proton mit Spin s(=1/2) und den Endkern (3 = T) mit Spin J_3 . Die Winkelverteilung der beim Zerfall emittierten Protonen ist durch folgende Beziehung gegeben [25, 26]:

$$\overline{W}(\theta_n; \theta'_p, \phi'_p) = \sum_{kq} t_{kq}(\theta_n) A_k Y^*_{kq}(\theta'_p, \phi'_p)$$
(4-4)

wobei die über den Raum integrierte Zerfallswahrscheinlichkeit auf 1 normiert ist.

 θ_n ist der Winkel des nicht eingefangenen Neutrons im Schwerpunktsystem, während das Winkelpaar (θ'_p , ϕ'_p) die Emissionsrichtung des Zerfallteilchens (p) im Ruhesystem von R bezüglich des einfallenden Deuterons definiert. Die Y_{kq} sind Kugelfunktionen.

Die t_{kq} sind renormierte statistische Tensoren (mit Rang $k \leq 2J_R$ und magnetischen Zuständen $-k \leq q \leq k$), die den Polarisationszustand des Zwischenkerns beschreiben. Sie hängen damit vom Erzeugungsprozess ab und sind mit den Uebergangsamplituden für den ersten Reaktionsschritt verknüpft [22]. Paritätserhaltung limitiert die Summe in (4-4) auf gerade k's, so dass nur Tensormomente geraden Ranges zur Winkelkorrelation beitragen.

Die A_k (k gerade) sind reelle, q-unabhängige Konstanten, welche den Zerfallsmechanismus beschreiben und mit den Zerfallsamplituden verbunden sind. Ist $J_3 = 0$, so tritt nur eine Kopplungskonstante auf und die A_k sind festgelegt; sie gehorchen folgender Beziehung:

$$A_{k} = \delta_{k,\text{gerade}}(-1)^{J_{R}-1/2} \left(\frac{2J_{R}+1}{4\pi(2k+1)}\right)^{1/2} (J_{R} 1/2 J_{R} 1/2 \mid k0)$$
(4-5)

wobei der Ausdruck in der hintersten Klammer ein Clebsch-Gordan Koeffizient ist.

Für die messbare Zerfallsrate W gilt dann

$$W(\theta'_p, \phi'_p) = \frac{\Gamma_i^p}{\Gamma_r} \,\overline{W}(\theta'_p, \phi'_p) \tag{4-6}$$

 Γ_i^p ist die partielle Zerfallsbreite für die Emission eines Protons beim Zerfall des Zwischenkerns *R* von einem Niveau mit Spin J_R zu einem bestimmten Endkernzustand *i* mit Spin J_3 . Γ_r ist die totale Zerfallsbreite.

4.3. (d, pn)-Wirkungsquerschnitt

Aus (4-3) und (4-6) ergibt sich dann der Winkelkorrelationswirkungsquerschnitt zu

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_n \, d\Omega_p} = \frac{\mu_{pT} k_{pT}(E_r)}{\hbar^2} \frac{d^F \sigma(E_r)}{d\Omega_n} \, \Gamma_i^p \, \overline{W}$$

Vol. 49, 1976 Der Deuteronenaufbruch an mittelschweren Kernen

wobei sich die Grössen $d^F \sigma / d\Omega_n$ und t_{kq} aus den Uebergangsamplituden T_{fi} berechnen lassen.

Beim ⁴⁰Ca und ⁵⁸Ni können auf Grund der Zerfälle, die den Endkern im Grundzustand zurücklassen ($J_3 = 0$), aus dem Verlauf der Winkelkorrelation Spin und Parität der auftretenden Zwischenkernzustände bestimmt werden.

Aus dem Verhältnis von experimentellem und theoretischem Wirkungsquerschnitt erhält man Auskunft über die partielle Protonenbreite Γ_0^p . Die Zuverlässigkeit dieser Breiten hängt ab von der Vertrauenswürdigkeit der berechneten Grössen $d^F \sigma / d\Omega_n$ ab, d.h. von der Richtigkeit des DWBA-Formalismus. Durch einen Vergleich dieser Resonanzbreiten mit denjenigen aus der elastischen Streuung kann deshalb die quantitative Anwendbarkeit der DWBA geprüft werden.

4.4. Numerische Rechnungen

Tabelle 1

Die numerischen Rechnungen wurden mit Hilfe des DWBA-Computerprogramms VENUS von Tamura et al. [28] durchgeführt, das nach der von Vincent und Fortune vorgeschlagenen Methode [24] für die Anwendung auf resonante Zustände modifiziert wurde und für die Berechnung von Teilchen-Teilchen Winkelkorrelationen erweitert wurde.

Gemäss dieser Methode wurde zuerst auf der reellen Achse in Schritten von 0,1 fm bis zu einem Punkt ausserhalb des Wechselwirkungsbereichs (r = 16 fm) integriert. Dann wurde die Integration entlang einer Parallelen zur Imaginärachse bis zu einem Abstand von 40 fm in Schritten von 1 fm weitergeführt. Da die Wellenfunktionen ausserhalb der reellen Achse exponentiell abklingen, fällt der Beitrag von dem den Integrationsweg vervollständigenden Kreisbogen, der zurück auf die reelle Achse führt, dahin.

Für die Normierungskonstante wurde der Wert $D_0^2 = 1,48 \cdot 10^4 \text{ MeV}^2 \text{ fm}^3$ eingesetzt. Sowohl für das Deuteron als auch für das Neutron wurden 15 Partialwellen berücksichtigt.

Die optischen Potentiale, mit deren Hilfe die gestörten Wellenfunktionen erzeugt wurden, waren in der üblichen Form parametrisiert [28]. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle I zusammengefasst.

V W $V_{\rm s}$ ror a_r roi a_i ros as roc Teilchen (MeV) (fm) (MeV) (fm) (fm) (MeV) (fm) (fm) (fm) Ref. (fm)Targetkern: 40Ca 0,90 [29] 106.0 0,85 7,5 0,60 1,25 Deuteron 1,05 10,9 1,60 0,56 1,29 0,66 9,3 1,25 0,48 6,2 1,10 0,75 [31] Neutron 45,8 a) 1,25 Proton 0,75 6,2 1,01 0,75 [31] 1,17 Targetkern: 58Ni 9,6 0,84 0,46 1,25 [30] Deuteron 107,1 0,85 14,8 1,42 0,72 1,05 1,29 Neutron 0,66 9,2 1,25 0,48 6,2 1,10 0,75 [31] 45,6 7,5 a) 1,25 0,65 1,25 [31] Proton 0,65 1,25

Parameter der optischen Potentiale für die DWBA-Analyse der Reaktionen	$^{40}Ca(d, n$	$)^{41}Sc(p)^{4}$	¹⁰ Ca
bei $E_d = 11$ MeV und ⁵⁸ Ni(d, n) ⁵⁹ Cu(p) ⁵⁸ Ni bei $E_d = 10$ MeV.		1	

^a) Durch Computerprogramm angepasst.



Figur 9

Proton-Neutron Winkelkorrelation. Winkelverteilungen der Protonen in der Reaktion ${}^{40}Ca(d, n){}^{41}Sc(p){}^{40}Ca$ für die untersuchten Zustände im ${}^{41}Sc$ in der Reihenfolge zunehmender Anregungsenergie, für eine Deuteronenenergie von 11 MeV und bei einem Neutronenwinkel von 25°. In der Ordinate ist der Wirkungsquerschnitt $d\sigma/d\Omega_n d\Omega_p$ aufgetragen, in der Abszisse der Emissionswinkel des Protons im Ruhesystem des ${}^{41}Sc$ -Kerns bezüglich der Richtung des einfallenden Deuterons. Die ausgezogenen Kurven entsprechen den DWBA-Rechnungen für jene Spin-Paritätskombinationen, welche die beste Uebereinstimmung mit den experimentellen Daten ergaben. Die gestrichelte Linie im Falle des 5,04 MeV Zustandes ist das Ergebnis einer Rechnung mit einem Deuteronenpotential ohne Spin-Bahn-Term, wobei die resultierende Abweichung von der Standardrechnung überraschend klein ist, wenn man bedenkt, dass die Winkelkorrelation den Polarisations zustand des Zwischenkerns reflektiert.

Das eingefangene Teilchen wurde durch eine Einteilchenwellenfunktion in einem Woods-Saxon-Potential, bestehend aus einem reellen zentralsymmetrischen Teil und einem Spin-Bahn-Term, beschrieben. Bei vorgegebenen geometrischen Parametern (cf. Tabelle I) wurde die Tiefe des Realteils so angepasst, dass die experimentell gefundene Resonanzenergie reproduziert wurde. Die Wahl der Knotenzahl hat sich als unkritisch herausgestellt, da eine Aenderung dieser Knotenzahl wohl drastische Verschiebungen in der Potentialtiefe zur Folge hatte, aber ohne jeglichen Effekt auf Winkelkorrelation und Resonanzbreite blieb. Dies zeigt, dass die Wellenfunktion im Innern des Kerns nur eine untergeordnete Rolle spielt. Die Anzahl Knoten wurde so gewählt, dass die Potentialtiefe derjenigen eines Nukleons entsprach (40–65 MeV).

Die Abhängigkeit von den optischen Parametern wurde anhand des 5,04 MeV Zustandes im ⁴¹Sc geprüft. Die unten aufgeführten Tests ergaben in jedem Fall eine Aenderung vom χ^2 -Wert um weniger als einen Faktor 1,3, wobei der Einfluss auf die ermittelten Resonanzbreiten durchwegs unterhalb 10% lag.

1) In einem ersten Schritt wurde die Tiefe V des Realteils des Deuteronenpotentials um $\pm 20\%$ verändert und dementsprechend der Radius r_{0r} , so dass das Produkt $Vr_{0r}^{1,35}$ konstant blieb.

2) Weiter wurden Rechnungen mit einem Deuteronenpotential ohne Spin-Bahnkopplungsterm durchgeführt. Die gemittelten Parameter stammten von Bassel et al. [32]. Die resultierende Winkelkorrelation, als gestrichelte Kurve in der Abbildung des 5,04 MeV-Niveaus (Fig. 9) dargestellt, lässt Abweichungen von der Standardrechnung erkennen, doch sind diese überraschend gering, wenn man bedenkt, dass die statistischen Tensoren t_{kq} (4-4) und damit die Winkelkorrelation den Polarisationszustand des Zwischenkerns reflektieren.

3) Für das Potential des nicht eingefangenen Neutrons wurden nebst den Parametern von Wilmore und Hodgson die Werte von Rosen [33] eingesetzt.

4) Um den Effekt der Nichtlokalität der optischen Potentiale im Kerninnern zu simulieren, wurden die Wellenfunktionen des Deuterons und des Neutrons, die mit Hilfe der aequivalenten lokalen Potentiale berechnet wurden, mit dem Korrekturfaktor $F(r) = \{1 - \beta^2 (m/2h)V(r)\}^{-1/2}$ [28] multipliziert, wobei $\beta_d = 0,54$ fm und $\beta_n = 0,85$ fm gewählt wurden.

5) Für das Potential des eingefangenen Teilchens wurden die Parameter von Perey [31] mit einem grösseren Radius für den Realteil vorgegeben.

5. Analyse der Messresultate

5.1. Calcium-40

In den Aufbruchspektren am ⁴⁰Ca wurden bis zu 25 (meistens schwache) Resonanzen gefunden, die Zuständen im ⁴¹Sc entsprechen. Für sieben davon konnten die Winkelkorrelationen bestimmt und analysiert werden. Die gemessenen Kurven sind zusammen mit den theoretischen Kurven, welche die beste Uebereinstimmung mit den experimentellen Daten ergaben, in den Figuren 9 und 10 dargestellt. Die aus der Analyse stammenden Resonanzparameter Spin, Parität und Protonenbreite sind in Tabelle II zusammengefasst, zusammen mit den entsprechenden Werten aus Protonstreuexperimenten [8–10].

Für jede einzelne Resonanz wurde jeweils die gemessene Kurve mit den für Spin-Paritätskombinationen zwischen $3/2^-$ und $9/2^+$ berechneten Winkelkorrelationen verglichen. Die Bilder in Figur 10 illustrieren anhand der 6,46 MeV-Resonanz die

 $E_{x} = 6,46 \text{ MeV}$



Vergleich zwischen experimenteller Winkelkorrelation und DWBA-Rechnungen für verschiedene Spin-Paritätskombinationen anhand der 6,46 MeV Resonanz, wobei für 5/2⁻ die beste Uebereinstimmung resultierte.

theoretischen Ueberlegungen von Abschnitt 2 und 4, wonach die Winkelkorrelationsmethode die Möglichkeit bietet, eindeutige Spin-Paritätzuordnungen machen zu können, sofern die Qualität der Messpunkte dies erlaubt. Dazu drängen sich folgende Feststellungen auf:

1a) Die Lage der Maxima und Minima verschiebt sich mit änderndem Bahndrehimpuls *l*. Dieser Effekt ist auf Wechselwirkungen im Ein- und Ausgangskanal zurückzuführen, die in der DWBA miteinbezogen werden. Vernachlässigt man diese

silia. Die Alliegu	IIRSCIICI BICII			siliu ili nu auige			18	
$E_x^{d}(d, pn)$	$E_x^{d})(p, p$	($J^{\pi}(d, pn)$	$J^{\pi}\left(p,p ight)$		$\Gamma^{p}_{0}{}^{c})$ (d, pn)	$\Gamma^{n}_{\delta}(p,p)$	
	a)	(q		a)	(q		a) a	(q
3470	3469	3478	1/2 -	1/2-	1/2-	73 ± 10	60 ± 6	80 ± 20
4950	4951	4947	5/2-	5/2-	5/2-	$1,7 \pm 0,4$	$1,0 \pm 0,4$	$2,0 \pm 0,4$
5040	5034	5036	9/2+	9/2+	9/2+	$0,40 \pm 0,07$	$0,4 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,1$
5700	<pre>{5651 5706</pre>	{ 5647	5/2-	{5/2 ⁻ ,7/2 ⁻ 5/2 ⁻ ,7/2 ⁻	{ 5/2 - 5/2 -	14 ± 3	$\begin{cases} 1,0 \pm 0,3 \\ 7+3 \end{cases}$	$\begin{cases} 3 \pm 1 \\ 12 + 4 \end{cases}$
5860	5869	5863	5/2-	5/2-,7/2-	5/2-,7/2-	$8,8 \pm 1,7$	5 ± 2	8,5 ± 2,6
5970	5972	5966	5 2-,7 2-	5 2-, 7 2-	5/2-,7/2-	$(2,6 \pm 0,5:5/2^{-})$		$1,6 \pm 0,5$
6460		{ 6432 6466	5/2-		{ 5/2 - 5/2 -	18 ± 3		$\begin{cases} 5,0 \pm 1,5 \\ 7 \pm 2 \end{cases}$

Vergleich, für sieben protoninstabile Zustände im ⁴¹Sc, zwischen den Resonanzparametern, welche durch die DWBA-Analyse von Proton-Neutron-

Tabelle 2

(a) Ref. [8]. (b) $E_x \le 57$ (c) Die Fehl

a d

 $E_x \le 5706 \text{ keV}$: Ref. [10]; $E_x > 5706 \text{ keV}$: Ref. [9].

Die Fehler sind hauptsächlich durch Unsicherheiten in der absoluten Normierung und in der Ansprechwahrscheinlichkeit des Neutronenzählers Die Fehler auf die Anregungsenergien betragen: $E_x(d, pn)$: $\pm 20 \text{ keV}$; $E_x(p, p)$: $\pm 5-9 \text{ keV}$ Ref. [8]; $\pm 5 \text{ keV}$ Ref. [10]; $\pm 10 \text{ keV}$ Ref. [9]. bedingt.

Vol. 49, 1976

Effekte, so haben die Winkelkorrelationen für alle *l*-Werte das Maximum beim selben Winkel, der dem Emissionswinkel des Zwischenkerns entspricht.

1b) Die Breite des Hauptmaximums der Winkelkorrelationskurven ist spinabhängig und ist bei gleichem Bahndrehimpuls l für J = l + 1/2 immer schmäler als für J = l - 1/2.

2) Die Protonenbreite Γ_0^p , die sich aus der Anpassung der theoretischen Kurven an die experimentellen Punkte ergibt, ist nicht nur *l*-abhängig, sondern unterscheidet sich auch für verschiedene Spins.

In praxi ist es so, dass aus der Lage des Winkelkorrelationsmaximus der Bahndrehimpuls gut bestimmt werden kann. Sehr oft sind aber die Fehler der Messwerte relativ gross (10-20%), so dass der Spin nicht in evidenter Weise aus der Form der Winkelkorrelationskurve hervorgeht. Dies ist auch für die 6,46 MeV Resonanz der Fall, wo die Kurven für l = 3 die Position des Maximums am besten wiedergeben, die Unterscheidung zwischen $5/2^-$ und $7/2^-$ aber nicht so klar ersichtlich ist.

Für die definitive Spinzuordnung stand aber zusätzlich noch die Information aus der Neutronenwinkelabhängigkeit (4 × 4 Punkte) zur Verfügung. Als Mass für die Vertrauenswürdigkeit einer eindeutigen Spinzuordnung wurde das Verhältnis der χ^2 -Werte gewählt, das sich bei einem definierten Drehimpuls für die Kurven mit beiden möglichen Spins ergab. Nur wenn dieses Verhältnis sowohl bei der Winkelkorrelationskurve als auch bei der Neutronenwinkelabhängigkeit für denselben Spinwert kleiner war, und mindestens in einem Fall kleiner als 0,5 oder in beiden Fällen kleiner als 0,7 war, wurde die Spinmöglichkeit mit dem schlechteren χ^2 verworfen und der übrigbleibende Spinwert eindeutig zugeordnet. Auf Grund dieses Kriteriums konnte der Resonanz bei 6,46 MeV Anregungsenergie der Spin 5/2⁻ zugeteilt werden. Diese Resonanz entspricht einem 5/2⁻ Dublett im ⁴¹Sc [9]. Die gefundene Breite von 18 ± 3 keV ist konsistent mit der Summe der Breiten dieses Dubletts, wie sie aus der elastischen Streuung bestimmt wurde.

Für das Niveau bei 5,04 MeV ergaben sich die Werte $J^{\pi} = 9/2^+$ und $\Gamma_0^p = 0,4 \pm 0,07$ keV in Uebereinstimmung mit den entsprechenden Grössen aus (p, p) Messungen [8, 10].

Im Einklang mit der Literatur [8, 10] ergab die Analyse für den Zustand bei 4,95 MeV $J^{\pi} = 5/2^{-}$ und $\Gamma_{0}^{p} = 1.7 \pm 0.4$ keV.

Für die Niveaus bei 5,70 MeV und 5,86 MeV für welche von Ref. [8] und Ref. [9] $J_{\pi} = (5/2^{-}, 7/2^{-})$ angegeben wird, konnte in beiden Fällen eine eindeutige Spinzuordnung vorgenommen werden. Im Fall des ersteren Niveaus wird dieses Resultat durch die Werte aus dem jüngsten Streuexperiment von Koltay et al. [10] unterstützt. Bei beiden ist zu beobachten, dass das Verhältnis von Maximum zu Minimum nicht ganz richtig wiedergegeben wird, speziell im Falle des 5,70 MeV Zustandes, was auf einen Untergrund hindeutet, der möglicherweise auf einen Beitrag aus einem 'Compound'-Prozess zurückzuführen ist. Die ermittelten Resonanzbreiten ($\Gamma_0^p = 14 \pm 3 \text{ keV}$ und $8.8 \pm 1.7 \text{ keV}$) stimmen gut mit den Werten von Ref. [9] und Ref. [10] überein, etwas weniger gut mit denjenigen von Ref. [8]. Dazu ist zu bemerken, dass, obwohl in Ref. [8] beide Spinwerte (5/2, 7/2) aufgeführt werden, nirgends hervogeht, unter welcher Spinannahme die Breiten berechnet werden. Doch auf Grund der Uebereinstimmung der Γ_0^p (d, pn) Werte mit den erstgenannten (p, p)-Quellen (Ref. [9] benützte eine J-unabhängige Methode für die Bestimmung der Breite) ist zu vermuten, dass dies für J = 7/2 geschah und somit diese Breiten mit dem Faktor 8/6 multipliziert werden müssten, was eine Annäherung an die andern Werte bewirken würde.

588

Wenig Aussagen lassen sich im Falle des 5,97 MeV-Zustandes machen, da die experimentellen Daten zu unsicher sind. Doch ergibt sich bei Annahme von $5/2^-$ ebenfalls ein konsistenter Wert für die Resonanzbreite ($\Gamma_0^p = 2,6 \pm 0,5$ keV).

Im Falle der Resonanz bei 3,47 MeV ergab sich aus der Neutronenwinkelabhängigkeit für den Drehimpuls des eingefangenen Protons der Wert $l_p = 1$ (Fig. 11). Die isotrope Winkelkorrelation ist aber nur mit einem Spin 1/2 kompatibel. Die Werte $J_{\pi} = 1/2^{-1}$ und $\Gamma_0^p = 73 \pm 10$ keV sind mit den Literaturwerten [8, 10] vereinbar.



Figur 11

Neutronenwinkelabhängigkeit für die Reaktion ${}^{40}Ca(d, n){}^{41}Sc$ im Falle der 3,47 MeV Resonanz im ${}^{41}Sc$. Die eingezeichneten Kurven entsprechen den DWBA-Rechnungen für l = 0 und l = 1.

Abschliessend lassen sich die Resultate von Tabelle 2 folgendermassen zusammenfassen:

1) Es waren Spin- und Paritätszuordnungen möglich, die mit andern Arbeiten im Einklang sind.

2) Die Werte für die Resonanzbreiten sind konsistent mit denjenigen, die aus Protonstreuexperimenten stammen und stimmen in allen Fällen innerhalb der Fehlergrenzen überein.

Zwar sind die Fehler für die Γ_0^p (p, p)-Werte im allgemeinen recht gross. Dies ist darauf zurückzuführen, dass wegen Coulomb- und Zentrifugalbarriere in der elastischen Streuung Zustände mit hohem Drehimpuls $(l \ge 2)$ stark unterdrückt und deshalb nur schlecht zu beobachten sind. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, dass diese Werte auf Grund von verschiedenartigen Experimenten bestätigt werden, und zwar gerade mit Hilfe von Strippingreaktionen, wo selektiv Zustände mit hohem Drehimpuls bevölkert werden, wie das unsere Messungen bestätigen. In der (d, n)-Reaktion besitzt ein Proton, das durch das Deuteron an den Kern herangetragen wird, mehr Impuls als ein entsprechendes freies Proton derselben Energie. Wegen dieses

					P.	Via	atte	e et al.	•	H.]	P. A.
	$\Gamma_0^{pb}(p,p)$	40 ± 10	275 ± 30	40 ± 15		40 ± 15	01 - 00	$\begin{cases} 20 \pm 10 \\ 20 \pm 10 \\ 60 + 20 \end{cases}$		$\begin{cases} 25 \pm 10 \\ 60 \pm 20 \end{cases}$	1000 ± 700
1	$\Gamma_{0}^{\mathfrak{gc}}(d,pn)$	66 ± 10	270 ± 70	59 土 9		$150 \pm 30, 83 \pm 13$	$31 \pm 5, 20 \pm 4$	$300 \pm 60, 170 \pm 25$		510 ± 110, 370 ± 50	850 ± 140, 470 ± 90
cben.	$J^{\pi b}$) (p,p)	1/2-	1/2+	5/2+	3/2+	5/2+		$\begin{cases} 3/2^+, 5/2^+ \\ 3/2^+, 5/2^+ \\ 3/2^+ \end{cases}$		$\left\{ (5/2)^{+} (5/2)^{+} \right\}$	(5/2)+
1^{p} in eV angege	$J^{\pi}(d,pn)$	1/2-	1/2 -	5/2 +		3/2+, 5/2+	5/2-,7/2-	3/2+, 5/2+		3/2+, 5/2+	3/2+, 5/2+
die Protonenbreiten	$E_x^{b,d}(p,p)$	5227	5595	5838	6033	6103		631/ 6320 6356	6411	{6492 {6493	6734
E_x sind in keV,	$E_{x}^{a,d})\left(au,d ight)$	5248 5321 5503	5625 5680	5868		6124	6204	6314		6525	6740
regungsenergien	E_x^d) (d, pn)	5240 5330 5400	5620 5710	5850	6030	6120	6210	6330	6410	6520	6620 6750

Uebersicht über die protoninstabilen Zustände im ⁵⁹Cu, die in der Reaktion ⁵⁹Ni(d, n)⁵⁹Cu(p)⁵⁹Ni zwischen 5,2 und 9,4 MeV Anregungsenergie beobachtet wurden. Spin und Parität sowie Resonanzbreite, soweit sie bestimmt werden konnten, stammen aus der DWBA-Analyse der Winkelkorrelationen. Diese Resonanzparameter werden den entsprechenden Grössen aus Protonstreuexperimenten gegenübergestellt. Die **Tabelle 3** Anre

590

	(100 ± 600)	1900 ± 1300	1200 ± 800	2900 ± 2000											
$(5/2^{-}: 220 \pm 40)$ 490 \pm 80, 320 \pm 50	$3400 \pm 500, 1900 \pm 300$	$1900 \pm 400, 1000 \pm 150$	1900 ± 300	4700 ± 700				$10800 \pm 1500, 6400 \pm 1000$			$13000 \pm 6500, 8000 \pm 4000$	$13000 \pm 6500, 8000 \pm 4000$			[7]] J-
	$\left\{ (5/2)^{+} (3/2)^{+} \right\}$	(5/2)+	(3/2)+	(3/2)+											T. 12-10105
$l = 2, 3^{e}$) $5/2^{-}, 7/2^{-}$	3/2+, 5/2+	3/2+, 5/2+	3/2 +	3/2 +				3/2+, 5/2+			3/2+, 5/2+	3/2+, 5/2+			7 - 12 J - 4 - 12 - 1
	{7096 {7131	7177	7256	7436				7910				8220		14	
6845 6910	7128														
6850 6940	7120	7200	7290	7400	7550	7680	7810	7920	8020	8100	8210	8270	8390		Ref. [55].

660

 $E_x \leq 6493$ keV: Ref. [13]: 6734 keV $\leq E_x \leq 7436$ keV: Ref. [36]; $E_x \leq 7910$ keV: Ref. [14]. Die Fehler sind hauptsächlich durch Unsicherheiten in der absoluten Normierung und in der Ansprechwahrscheinlichkeit des Neutronenzählers Die Fehler auf die Anregungsenergien betragen: $E_x(d, pn)$: ± 20 -30 keV; $E_x(\tau, d)$: ± 25 keV; $E_x(p, p)$: ± 2 keV Ref. [13]; ± 15 keV Ref. [36]. bedingt.

 $J_T = 0^+$; $J_R = l \pm 1/2$; $\pi_R = (-1)^l$. Für $J = 5/2^+$; $\Gamma_0^2 = 600 \pm 400$ eV. 5.5

zusätzlichen Impulses ('Off-shell'-Effekt [34]) werden höhere Drehimpulse in Strippingreaktionen gegenüber der elastischen Streuung stark bevorzugt. Die $\Gamma_{0}^{p}(d, pn)$ -Werte der vorliegenden Arbeit weisen durchwegs kleinere Fehler auf als die entsprechenden $\Gamma_{0}^{p}(p, p)$ -Werte. Die Fehler der einzelnen Messpunkte sind zwar recht gross, was für die Spinbestimmung von Nachteil ist, mitteln sich aber bei der Anpassung aus und haben somit nur unbedeutenden Einfluss auf die Ermittlung der Resonanzbreite. Die eigentlichen Fehler rühren hauptsächlich von Unsicherheiten in der absoluten Normierung (~12%) und in der Ansprechwahrscheinlichkeit des Neutronenzählers (~8%) her.

Die gute Uebereinstimmung, die im Falle des ⁴⁰Ca erzielt wurde, lässt folgende Schlüsse zu:

1) Teilchen-Teilchen-Winkelkorrelationsmessungen erlauben es, eindeutige Aussagen über die Eigenschaften von teilcheninstabilen Zwischenkernzuständen zu machen.

2) Die DWBA liefert glaubwürdige spektroskopische Faktoren (Resonanzbreiten), wenn die Einteilchennäherungen, wie das für die Zustände im ⁴¹Sc erwartet werden darf, erfüllt sind.

5.2. Nickel-58

Im Falle von ⁵⁸Ni wurden in den Aufbruchspektren 30 Resonanzen als Zustände im ⁵⁹Cu identifiziert für Anregungsenergien zwischen 5,2 und 8,4 MeV. Siebzehn davon konnten mit Hilfe der Winkelkorrelationen näher untersucht werden. In Tabelle III sind alle Informationen über die im Korrelationsexperiment auftretenden Zustände zusammengefasst, zusammen mit den entsprechenden Werten aus der Literatur. Die experimentellen Winkelkorrelationen, soweit sie ausgewertet werden konnten, sind in der Figur 12 aufgetragen. Für die dargestellten theoretischen Kurven war die Anpassung an die Messpunkte am besten.

Es ist bis jetzt relativ wenig bekannt über ⁵⁹Cu-Zustände bei so hohen Anregungsenergien. Für das Gebiet von 5,2 MeV bis 6,5 MeV existieren die Feinstrukturmessungen von Browne et al. [13]. Oberhalb 6,5 MeV aber werden nur einige wenige Zustände von Guzhovskii et al. [14] auf Grund von Streuexperimenten als Analogzustände rapportiert. Deshalb wurden diese Daten durch Messungen der elastischen Protonstreuung an unserem Institut ergänzt [36]. Mit Strippingreaktionen sind praktisch nur Pullen und Rosner [35], welche Zustände bis 7,128 MeV anführen, mit Hilfe von (τ, d) -Messungen in dieses Gebiet vorgestossen, doch konnten von ihnen mangels einer DWBA-Analyse für diese teilcheninstabilen Zustände weder Drehimpuls noch Resonanzbreite angegeben werden. Tabelle III zeigt, dass alle Zustände, welche von Pullen und Rosner aufgeführt werden, im vorliegenden Experiment ebenfalls beobachtet werden konnten.

Bis auf die Niveaus bei 5,24 MeV und 5,62 MeV konnten alle analysierten Resonanzen als Zustände mit Bahndrehimpuls $l \ge 2$ identifiziert werden. All die l = 0 und l = 1 Zustände, die in den (p, p)-Messungen besonders häufig und ausgeprägt zu beobachten sind, treten hier praktisch nicht in Erscheinung. Die ermittelten Resonanzbreiten sind sehr klein. Die Feststellungen, die schon beim Calcium bezüglich der elastischen Streuung vermerkt wurden, treffen hier deshalb noch in vermehrtem Masse zu. Der hohe Drehimpuls und die kleinen Breiten implizieren, dass diese Zustände in den (p, p)-Messungen nur schwach angeregt werden und schwierig zu untersuchen sind. Spinzuordnungen sind für diese Zustände kaum mehr zuverlässig und die Breiten sind sehr unsicher. Schon Browne et al. [13] weisen auf die Schwierigkeiten hin, für l = 2 Resonanzen Spinwerte zu unterscheiden und geben für die Breiten bis 50% Fehler an. Noch viel stärker gelten diese Einschränkungen für die Messungen von Ref. [36] (schlechte Auflösung, hohe Niveaudichte). Diese Tatsachen unterstreichen noch einmal die Bedeutung der Strippingreaktion als komplementäre Methode zur Untersuchung von Zuständen mit hohem Spin, umsomehr als Figur 8 zeigt, dass diese Zustände selektiv und vergleichschweise stark angeregt werden.





Proton-Neutron-Winkelkorrelationen. Winkelverteilungen der Protonen in der Reaktion ⁵⁸Ni(d, n)⁵⁹Cu(p)⁵⁸Ni für die untersuchten Zustände im ⁵⁹Cu in der Reihenfolge zunehmender Anregungsenergie. In der Ordinate ist der Wirkungsquerschnitt $d\sigma/d\Omega_n d\Omega_p$ aufgetragen, in der Abszisse der Emissionswinkel des Protons im Ruhesystem des ⁵⁹Cu-Kerns bezüglich der Richtung des einfallenden Deuterons. Die eingezeichneten Kurven entsprechen den DWBA-Rechnungen für jene Spin-Paritätskombinationen, welche die beste Uebereinstimmung mit den experimentellen Daten ergaben.





In Anbetracht dieser Situation zeigt ein Vergleich der Resonanzparameter beider Experimente sicher übereinstimmenden Charakter:

1) Spin und Parität

Die Resonanzen, die in der (d, pn)-Reaktion auftreten und bis auf vier Ausnahmen als l = 2 Zustände identifiziert werden konnten, entsprechen praktisch allen l = 2 Zuständen, die durch elastische Streuung in diesem Energiebereich bevölkert wurden, obwohl im Korrelationsexperiment nicht alle l = 2 Zustände aufgelöst werden konnten.

Die beiden untersten Resonanzen bei 5,24 MeV und 5,62 MeV offenbaren sich auf Grund ihrer isotropen Winkelkorrelationen als Spin 1/2 Zustände. Aus der Neutronenwinkelverteilung (Fig. 13) ergibt sich für beide Niveaus l = 1. Die Zuordnung $J^{\pi} = 1/2^{-}$ ist im ersteren Fall in Uebereinstimmung mit derjenigen von Browne et al. [13] für den Zustand bei 5,227 MeV, während sie im zweiten Fall der $J_{\pi} = 1/2$ Zuteilung von Ref. [13] für ein Niveau bei 5,595 MeV widerspricht. Diese Unverträglichkeit ist umso schwerer verständlich, als dass es sich in beiden Messungen um eine isolierte Resonanz handelt. Die Tatsache, dass durch den grossen Raumwinkel des Neutronenzählers die ausgeprägte Struktur, welche die Neutronenwinkelverteilungen für l = 0 aufweisen, verwischt wird, scheint diese Diskrepanz alleine nicht erklären zu können.

Im Strippingexperiment wurden zusätzlich zwei (eventuell drei) Resonanzen (6,21 MeV; 6,85 MeV; 6,94 MeV) als Zustände mit Bahndrehimpuls l = 3 identifiziert, die in den Streuexperimenten nicht angeregt wurden und l = 2 Zustände verdecken, welche in den (p, p)-Messungen bei diesen Energien beobachtet wurden.





Neutronenwinkelverteilungen der Reaktion ⁵⁸Ni(d, n) ⁵⁹Cu im Falle der Resonanzen bei 5,24 MeV und 5,62 MeV welche eine isotrope Winkelkorrelation aufweisen. Die eingezeichneten Kurven entsprechen den DWBA-Rechnungen für l = 0 und l = 1. In beiden Fällen ergibt sich auf Grund der isotropen Winkelkorrelation (nur mit Spin 1/2 vereinbar) und der Neutronenwinkelabhängigkeit $(l = 1)J^{\pi} = 1/2^{-}$.

Vol. 49, 1976 Der Deuteronenaufbruch an mittelschweren Kernen

Oberhalb 7,6 MeV wurden noch acht Resonanzen beobachtet, wobei drei (7,92 MeV; 8,21 MeV; 8,27 MeV) analysiert und als l = 2 Zustände identifiziert werden konnten.

2) Resonanzbreiten

Bei der Gegenüberstellung der Resonanzbreiten müssen die allgemeinen Erwägungen über die Vertrauenswürdigkeit dieser Grössen (vgl. Calcium) in Betracht gezogen werden. Der Vergleich wird noch dadurch erschwert, dass in mehreren Fällen verschiedene Resonanzen, die in den Messungen der elastischen Streuung beobachtet wurden, im Korrelationsexperiment nicht aufgelöst werden konnten. Wo aber die Resonanzen gut getrennt sind, schält sich die Tendenz heraus, dass die Γ_0^p (*d*, *np*)-Werte bei gleicher Spinannahme im Mittel ungefähr um einen Faktor zwei grösser sind.

Die Resultate in Tabelle III geben abschliessend zu folgenden Feststellungen Anlass:

1) Die Analyse von (d, pn)-Messungen am ⁵⁸Ni hat spektroskopische Erkenntnisse hinsichtlich protoninstabiler Zustände im ⁵⁹Cu, vornehmlich von höherem Drehimpuls $(l \ge 2)$, gebracht, wobei einerseits Resultate aus Streuexperimenten bekräftigt und andererseits Auskünfte über zusätzliche Niveaus $(l = 3, E_x > 7, 6$ MeV) gewonnen werden konnten.

2) Da nicht immer eindeutige Spinzuordnungen möglich waren, ist es schwierig, klare Schlussfolgerungen bezüglich der Resonanzbreiten zu ziehen. Glaubt man, trotz der grossen Schwankungsbreite der Γ_0^p -Werte, dass eine echte Diskrepanz zwischen den beiden Experimenten vorliegt, so ist die Ursache in einer Unzulänglichkeit der DWBA-Wirkungsquerschnitte zu suchen. In Anbetracht der guten Uebereinstimmung, die im Falle des ⁴⁰Ca erzielt wurde, deutet dies darauf hin, dass beim Nickel die Einteilchennäherungen nicht so gut zutreffen. Diese Tatsache wird noch dadurch untermauert, dass, während im ⁴¹Sc einige Zustände, welche als Zustände mit ausgeprägtem Einteilchencharakter verstanden werden können, besonders stark angeregt werden, im ⁵⁹Cu alle Resonanzen etwa gleich stark auftreten. Der Vergleich der Resonanzbreiten gibt in diesem Fall somit Auskunft, wie glaubwürdig spektroskopische Faktoren (Resonanzbreiten) überhaupt sind, wenn nicht ausgesprochene Einteilchenzustände vorliegen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] L. JARCZYK, J. LANG, R. MÜLLER, D. BALZER, P. VIATTE and P. MARMIER, Phys. Rev. C8 68 (1973).
- [2] J. F. VALLEY, J. LANG, R. MÜLLER and P. MARMIER, Nucl. Phys. A184, 577 (1972).
- [3] H. W. BARZ, V. E. BUNAKOV and A. M. EL-NAIEM, Nucl. Phys. A217, 141 (1973).
- [4] H. FUCHS, H. HOMEYER, TH. LORENZ and H. OESCHLER, Phys. Lett. 37B, 285 (1971); H. FUCHS, H. HOMEYER, H. OESCHLER, R. LIPPERHEIDE and K. MÖHRING, Nucl. Phys. A196, 286 (1972); J. BOMMER, M. EPKO, H. FUCHS, K. GRABISCH and H. OESCHLER, Phys. Lett. 52B, 421 (1974); J. BOMMER, M. EPKO, H. FUCHS, K. GRABISCH and H. KLUGE, Nucl. Phys. A251, 257 (1975).
- [5] M. D. COOPER, W. F. HORNYAK and P. G. ROOS, Nucl. Phys. A218, 249 (1974); L. R. MEDSKER, H. E. JACKSON and Y. L. YNTEMA, Phys. Rev. C9, 1851 (1974); L. R. MEDSKER, H. T. FORTUNE and S. C. HEADLEY, Phys. Rev. C12, 401 (1975).
- [6] S. E. DARDEN, S. SEN, H. R. HIDDLESTON, J. A. AYMAR and W. A. YOH, Nucl. Phys. A208, 77 (1973); S. SEN, S. E. DARDEN, H. R. HIDDLESTON and W. A. YOH, Nucl. Phys. A219, 429 (1974).

- [7] D. A. GEDCKE, S. T. LAM, S. M. TANG, G. M. STINSON, J. T. SAMPLE, T. B. GRANDY, W. J. MCDONALD, W. K. DAWSON and G. C. NEILSON, Nucl. Phys. A134, 141 (1969).
- [8] P. M. ENDT and C. VAN DER LEUN, Nucl. Phys. A214, 481 (1973).
- [9] W. MITTIG, Thèse, Université de Paris-Sud (unveröffentlicht).
- [10] E. KOLTAY, L. MESKO and L. VÉGH, Nucl. Phys. A249, 173 (1975).
- [11] D. H. YOUNGBLOOD, R. L. KOZUB, R. A. KENEFICK and J. C. HIEBERT, Phys. Rev. C2, 477 (1970).
- [12] B. CASTEL, I. P. JOHNSTONE, B. P. SINGH and K. W. C. STEWART, Can. J. Phys. 50, 1630 (1972).
- [13] J. C. BROWNE, H. W. NEWSON, E. G. BILPUCH and G. E. MITCHELL, Nucl. Phys. A153, 481 (1970).
- [14] I. M. BORKIN, B. YAI. GUZHOVOSKII, V. S. RUDNEV, A. P. SOLODOVNIKOV, and S. V. TRUSILLO, Bull. Acad. Sci. USSR Phys. Ser. 30, 277 (1967); B. YA. GUZHOVSKII, I. M. BORKIN, A. G. ZVENIGORODSKII, V. S. RUDNEV, A. P. SOLODOVNIKOV and S. V. TRUSILLO, Bull. Acad. Sci. USSR Phys. Ser. 33, 119 (1969).
- [15] H. EICHNER, H. STEHLE and P. HEISS, Nucl. Phys. A205, 249 (1973); J. C. HEGGIE and P. W. MARTIN, Nucl. Phys. A212, 78 (1973).
- [16] O. F. NEMETS, M. V. SOKOLOV and B. G. STRUZHKO, SOV. J. Nucl. Phys. 1, 722 (1965); O. F. NEMETS, V. M. PUGACH, M. V. SOKOLOV and B. G. STRUZHKO, Bull. Acad. Sci. USSR Phys. Ser. 32, 235 (1968); O. F. NEMETS, V. M. PUGACH, M. V. SOKOLOV and B. G. STRUZHKO, Bull. Acad. Sci. USSR Phys. Ser. 34, 1523 (1970).
- [17] C. L. FINK, B. L. COHEN, J. C. VAN DER WEERD and R. J. PETTY, Phys. Rev. 185, 1568 (1969).
- [18] R. MÜLLER, U. PEYER, W. WÖLFLI, J. HALL and M. SUTER, Nucl. Instr. and Meth. 104, 125 (1972).
- [19] J. UNTERNÄHRER und R. MÜLLER, Nucl. Instr. and Meth. 128, 373 (1975).
- [20] R. MÜLLER, Jahresbericht des Laboratoriums für Kernphysik, ETH Zürich (1972), p. 163.
- [21] J. JARCZYK, J. LANG, R. MÜLLER, J. UNTERNÄHRER und P. VIATTE, Jahresbericht des Laboratoriums für Kernphysik, ETH Zürich (1972), p. 180.
- [22] G. R. SATCHLER, Nucl. Phys. 55, 1 (1964).
- [23] W. TOBOCMAN, Theory of Nuclear Reactions (Oxford University Press, New York 1961).
- [24] C. M. VINCENT and H. T. FORTUNE, Phys. Rev. C2, 782 (1970).
- [25] F. RYBICKI, T. TAMURA and G. R. SATCHLER, Nucl. Phys. A146, 659 (1970); H. J. ROSE and D. M. BRINK, Phys. Rev. 39, 306 (1967).
- [26] M. SIMONIUS, Phys. Lett. 37B, 446 (1971).
- [27] S. GALES, S. FORTIER, H. LAURENT, J. M. MAISON and J. P. SCHAPIRA, Phys. Lett. 56B 449 (1975).
- [28] T. TAMURA, W. R. COKER and F. RYBICKI, Comp. Phys. Comm. 2, 94 (1971).
- [29] P. SCHWANDT and W. HABERLI, Nucl. Phys. A123, 401 (1969).
- [30] J. A. R. GRIFFITH, M. IRSHAD, O. KARBAN and S. ROMAN, Nucl. Phys. A146, 193 (1970).
- [31] C. M. PEREY and F. G. PEREY, Nucl. Data Tables 13, 296 (1974).
- [32] L. L. LEE, JR., J. P. SCHIFFER, B. ZEIDMANN, G. R. SATCHLER, R. M. DRISKO and R. H. BASSEL, Phys. Rev. 136, B971 (1964); R. H. BASSEL, R. M. DRISKO, G. R. SATCHLER, L. L. LEE, JR., J. P. SCHIFFER and B. ZEIDMANN, Phys. Rev. 136, B960 (1964).
- [33] L. ROSEN, Proc. 2nd Internat. Symposium on Polarization Phenomena of Nucleons (Karlsruhe, September 1965), edited by P. HUBER and H. SCHOPPER, Helv. Phys. Acta, Exp. Suppl. 12, 410 (1966).
- [34] R. LIPPERHEIDE and K. MÖHRING, Nucl. Phys. A211, 125 and 136 (1973).
- [35] D. J. PULLEN and BARUCH ROSNER, Phys. Rev. 170, 1034 (1968).
- [36] P. VIATTE, Dissertation, ETH Zürich (1975), unveröffentlicht.