

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

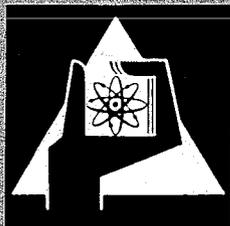
März 1971

KFK 1382

**Differentieller Wirkungsquerschnitt für die elastische $^3\text{He} + ^4\text{He}$ -Streuung
bei Energien von 28 bis 44 MeV im Schwerpunktsystem**

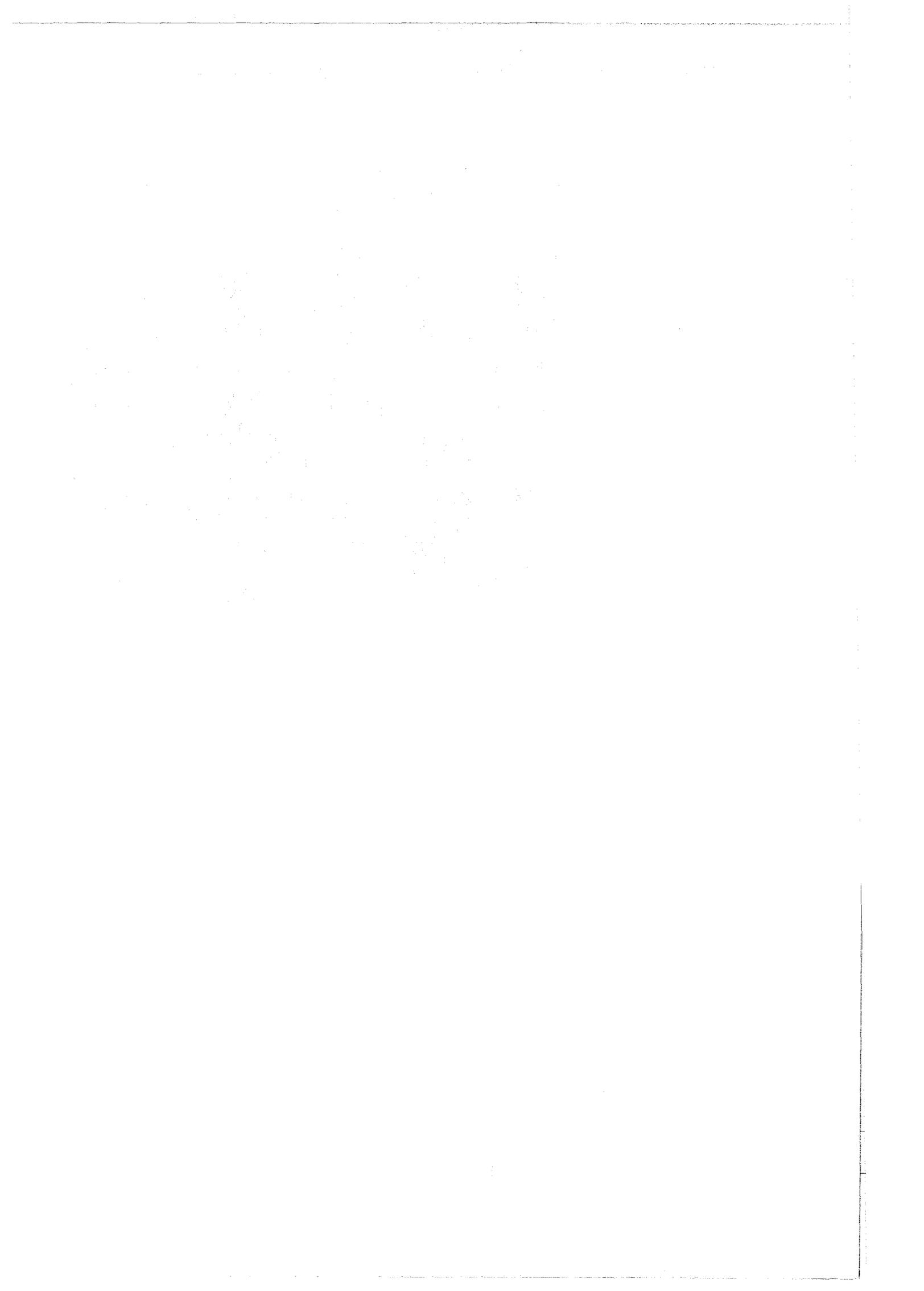
W. Fetscher, E. Seibt, Ch. Weddigen
Institut für Experimentelle Kernphysik der Universität
und des Kernforschungszentrums Karlsruhe

E. J. Kanellopoulos
Institut für Theoretische Physik der Universität Tübingen



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

März 1971

KFK 1382

Differentieller Wirkungsquerschnitt für die elastische
 $^3\text{He}+^4\text{He}$ -Streuung bei Energien von 28 bis 44 MeV im
Schwerpunktsystem[†]

W. Fetscher, E. Seibt, Ch. Weddigen

Institut für Experimentelle Kernphysik der Universität
und des Kernforschungszentrums, Karlsruhe

und

E.J. Kanellopoulos

Institut für Theoretische Physik der Universität Tübingen

[†] Vorgetragen von Ch. Weddigen am 2. März 1971 auf der
Frühjahrstagung des Fachausschusses Kernphysik der
Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Würzburg.

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M.B.H., KARLSRUHE

Summary:

The elastic scattering of 103 MeV ^4He -particles on ^3He is possibly an interesting candidate for the production of a high energy polarized ^3He -beam. The methods which were used to describe the scattering mechanism at center-of-mass energies E_{CM} below 24 MeV are discussed. Angular distributions for E_{CM} from 28 to 44 MeV have been measured at the Karlsruhe cyclotron in order to get information about the reaction mechanism involved. The experimental results clearly favour the cluster model interpretation of the scattering process. Especially the enhancement of differential cross section in backward direction is definitely attributed to neutron exchange as a direct consequence of Pauli principle and not to spin-orbit effects. Nucleon-Nucleon spin-orbit effects are expected to be small in this angular region for E_{CM} above 30 MeV.

Zusammenfassung:

Die elastische Streuung von ^4He an ^3He ist möglicherweise eine interessante Reaktion zur Erzeugung eines hochenergetischen polarisierten ^3He -Strahles. Die Methoden werden diskutiert, welche zur Beschreibung des Streuprozesses für Schwerpunktsenergien E_{CM} bis zu 24 MeV angewandt wurden. Winkelverteilungen für E_{CM} von 28 bis 44 MeV wurden am Karlsruher Isochronenzyklotron gemessen, um den Streumechanismus bei mittleren Energien zu untersuchen. Die experimentellen Ergebnisse bevorzugen eindeutig die Cluster-Modell-Interpretation des Streuprozesses. Speziell der beobachtete Anstieg des Streuquerschnittes bei Rückwärtswinkeln ist auf Neutronenaustausch als direkte Folge des Pauli-Prinzips zurückzuführen und nicht auf Spin-Bahneffekte. Nukleon-Nukleon-Spin-Bahn-Kräfte haben für E_{CM} oberhalb 30 MeV geringen Einfluß auf die Winkelverteilungen.

Die elastische Streuung von 103 MeV α -Teilchen an ^3He ist möglicherweise geeignet, einen hochenergetischen polarisierten ^3He -Strahl zu erzeugen. Die unter Vorwärtswinkeln austretenden ^3He -Rückstoßteilchen (Abb. 1) haben eine Energie von

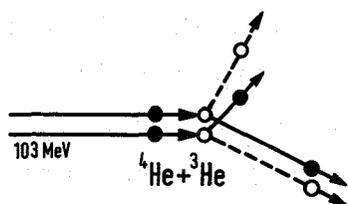


Abb. 1: Kinematik

etwa 80 MeV. Doppelstreuexperimente zum Nachweis der ^3He -Polarisation sind am Karlsruher Isochronzyklotron in Vorbereitung ¹⁾. Zuvor wurde die Energieabhängigkeit des elastischen Streuquerschnittes für Schwerpunktsenergien E_{CM} von 28 bis 44 MeV gemessen, da für E_{CM} oberhalb 24 MeV bisher keine Winkelver-

teilungen veröffentlicht wurden. Es stellte sich heraus, daß bei den untersuchten Energien eindeutige Rückschlüsse auf den Streumechanismus gezogen werden können, die bei niedrigeren Energien bisher nicht möglich waren. Von diesen Wirkungsquerschnittsmessungen und ihrer Interpretation soll im folgenden berichtet werden.

Um die elastische $^3\text{He} + ^4\text{He}$ Streuung zunächst qualitativ zu erläutern, ist in Abb. 2 der differentielle Streuquerschnitt für einen festen Winkel in Abhängigkeit von der Schwerpunktsenergie

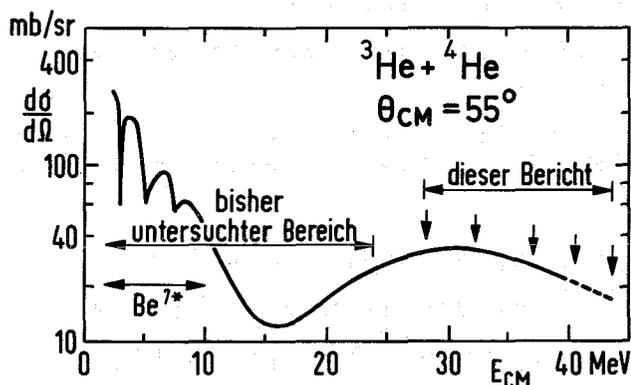


Abb. 2: Die senkrechten Pfeile geben die Energien an, bei denen die Messungen dieses Berichts durchgeführt wurden.

festen Winkel in Abhängigkeit von der Schwerpunktsenergie schematisch aufgetragen.

Bis $E_{\text{CM}} < 10$ MeV treten aufgrund angeregter Zustände im Compoundsystem $^7\text{Be}^*$ starke Strukturen auf. Bis $E_{\text{CM}} = 24$ MeV liegen zahlreiche Messungen von Winkelverteilungen und einige Polarisationsmessungen vor ²⁾. Im Energiebereich von 24 bis 40 MeV wurden bisher lediglich Streuquerschnitte für diskrete Streu-

winkel ausgewertet ³⁾. Alle Winkelverteilungen für die elastische Streuung von ^4He an ^3He oberhalb $E_{\text{CM}} = 10$ MeV sind sich darin äh-

lich, daß sie ein ausgeprägtes Minimum bei einem Schwerpunkts-
winkel θ_{CM} um 100° besitzen. Abb. 3 zeigt einige typische Bei-
spiele für $E_{CM} = 10$ ⁴⁾, 17 ⁵⁾, 24 ⁶⁾
und 44 MeV ⁷⁾. Die Struktur in Vor-

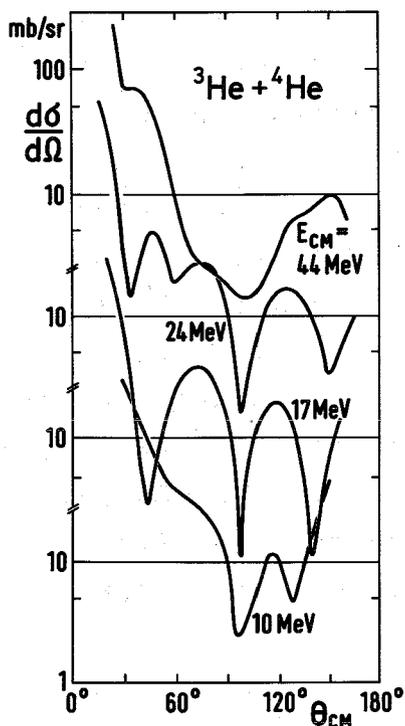


Abb. 3: Beispiele für
die Winkelabhängigkeit
des Streuquerschnitts

wärts- und Rückwärtsrichtung ist stark
energieabhängig. Interessant für die
Erzeugung eines polarisierten ^3He -
Strahles ist insbesondere der Rück-
wärtsanstieg des Streuquerschnittes.
Denn hochenergetische ^3He -Rückstoß-
teilchen, die im Laborsystem in Vor-
wärtsrichtung austreten, haben im
CM-System einen Streuwinkel in Rück-
wärtsrichtung. Für das Auftreten von
 ^3He -Polarisation ist jedoch die Art
des Streumechanismus wesentlich.

Um den beobachteten Rückwärtsanstieg
zu beschreiben, sind bis $E_{CM} = 24$ MeV
die folgenden Methoden erfolgreich
angewandt worden ⁷⁾:

- 1 - Streuphasenanalyse
- 2 - Rechnungen nach dem Optischen
Modell
- 3 - Rechnungen nach dem Cluster-Modell
(oder 'resonating group method')

Bekanntlich liefert die Streuphasenanalyse immer einen idealen
Fit, sofern man genügend hohe Partialwellendrehimpulse berück-
sichtigt. Die Ergebnisse sind im allgemeinen nicht eindeutig.
Man erhält jedoch brauchbare Hinweise auf die beteiligten Bahn-
drehimpulse, insbesondere auf Compound-Resonanzen bei nieder-
energetischer Streuung und auf die Absorption von Partialwellen
bei höheren Energien.

Beim Optischen Modell werden die inelastischen Beiträge in einem imaginären Teil zusammengefaßt. Es eignet sich zur Beschreibung von Streuprozessen bei Energien oberhalb der Compoundzustände. Der Spin-Bahn-Term beeinflusst besonders den berechneten Streuquerschnitt bei Rückwärtswinkeln. Unter Verwendung derartiger Rechnungen konnte der beobachtete Rückwärtsanstieg bei der $^3\text{He}+^4\text{He}$ -Streuung wiedergegeben werden ^{4,8)}. Die gewonnenen Werte für die Stärke des Spin-Bahn-Potentials zwischen ^3He und ^4He schwanken jedoch zwischen 0.5 und 15 MeV.

Bei den Cluster-Modell-Rechnungen in 1-Kanal-Näherung wird das 7-Nukleonen-System im Eingangs- und Ausgangskanal nach Clustern der Massen 3 und 4 zusammengefaßt. Die Gesamtwellenfunktion des Systems wird vollständig antisymmetrisiert, wie es vom Pauli-Prinzip her gefordert wird. Ausgangspunkt der Theorie ist der Hamilton-Operator des 7-Nukleonen-Systems mit einem Zwei-Nukleonen-Potential, das aus einem Zentralanteil mit räumlichen Spin- und Isospin-Austauschtermen, einem skalaren Spin-Bahn-Potential und gegebenenfalls einem Coulombanteil besteht. Die Wechselwirkung zwischen den Clustern ^3He und ^4He wird aus diesen Nukleon-Nukleon-Potentials aufgebaut. Im Wechselwirkungsbereich treten infolge der Antisymmetrisierung der Wellenfunktion und des Austauschcharakters im Zwei-Nukleonen-Potential nicht-lokale Terme auf, welche die Rechnungen analytisch und numerisch aufwendig machen. Aus diesem Grund konnte der Einfluß inelastischer Kanäle bisher noch nicht realistisch berücksichtigt

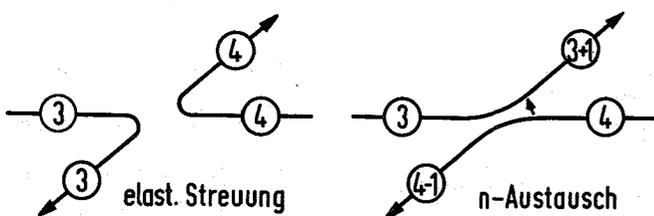


Abb. 4: Elastische Streuung und Neutronenaustausch unter dem gleichen Messwinkel

werden. Der Vorteil der Cluster-Modell-Rechnungen liegt darin, daß ein zusätzlicher Streumechanismus, nämlich der Neutronenaustausch zwischen ^3He und ^4He , automatisch mitbeschrieben wird. Dieser wirkt sich wie der Spin-Bahn-Term beim Optischen Modell hauptsächlich

in Rückwärtsrichtung aus: Eine Vorwärtsstreuung mit Neutronenaustausch kann von einer elastischen Streuung in Rückwärtsrichtung experimentell nicht unterschieden werden (Abb. 4).

Die Fragen, die durch die zu beschreibenden Messungen und Rechnungen beantwortet werden sollten, lauteten somit:

- 1 - Ist der beobachtete Rückwärtsanstieg bei der $^3\text{He}+^4\text{He}$ -Streuung im wesentlichen auf Spin-Bahn-Effekte im Sinne des Optischen Modells oder auf Neutronenaustausch im Sinne des Cluster-Modells zurückzuführen?
- 2 - Wie groß ist der Einfluß von Spin-Bahn-Effekten auf den Neutronenaustausch bei der $^3\text{He}+^4\text{He}$ -Streuung?

Bevor wir auf die Ergebnisse näher eingehen, einen Blick auf die experimentelle Anordnung:

Abb. 5 zeigt die Apparatur, welche wir sowohl für Wirkungsquerschnittsmessungen (oben) als auch zur Durchführung von Doppelstreuexperimenten (unten) verwenden. Vor der Blende bei S2 wurde der ^4He -Strahl durch Be-Absorber von anfänglich 103 MeV auf die erforderliche Einfallenergie (minimal 65.8 MeV mit 2.4 mm Be) abgebremst und durch das Quadrupoltriplett Q1 bis Q3 auf das Gas-

target T2 fokussiert. Die durch die Abbremsung bedingte maximale Energieverbreiterung ⁹⁾ betrug ± 0.46 MeV.

Gestreute ^4He - und ^3He -Rückstoßteilchen wurden in Zählerteleskopen (Abb. 6) gleichzeitig nachgewiesen und identifiziert. Die Zählerteleskope bestanden während der Messungen bei

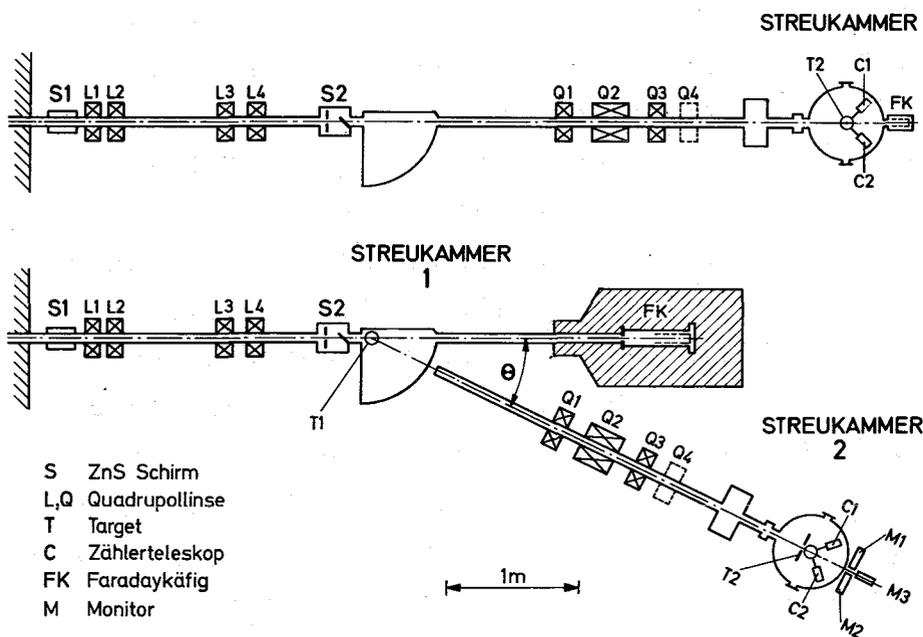


Abb. 5: Die verwendete Apparatur bei Einfach- (oben) und Doppelstreuexperimenten (unten)

103 MeV ($E_{CM} = 44$ MeV)
aus 0.5 mm Si-Oberflächen-
sperrschichtzählern und
Plastik-Szintillations-
zählern. Bei 68.5 bis
94.8 MeV ($E_{CM} = 28$ bis
41 MeV) wurden 0.3 und
3 mm Oberflächensperr-
schichtzähler bei einer
Temperatur von ca. $-25^{\circ}C$
verwendet. Durch Schlitz-
blenden von 1 mm Breite
wurde die Winkelauflösung
auf $\pm 0.3^{\circ}$ im Laborsystem
reduziert.

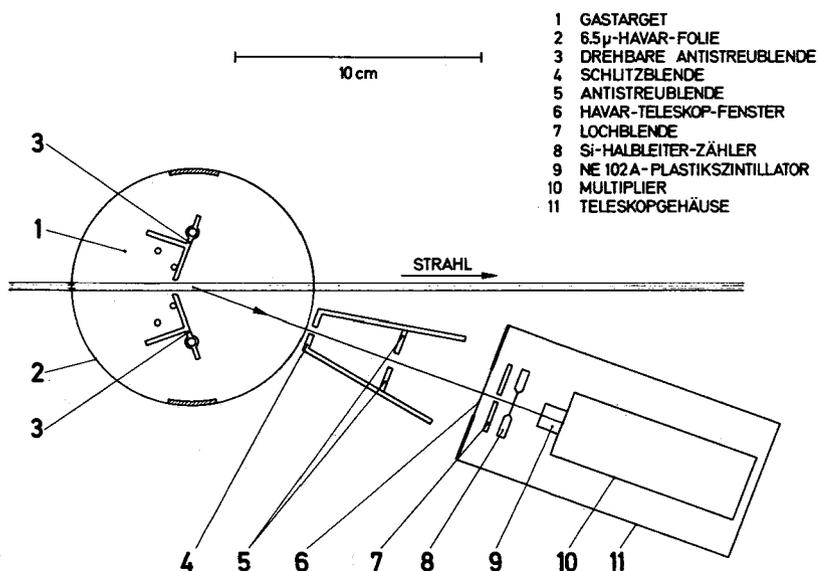


Abb. 6: Gastarget und Zähleranordnung

Abb. 7 gibt einen Blick in die Experimentierhalle des Karlsruher Isochronzyklotrons mit der verwendeten Apparatur. Diese befindet sich hier in der Doppelstreuposition.

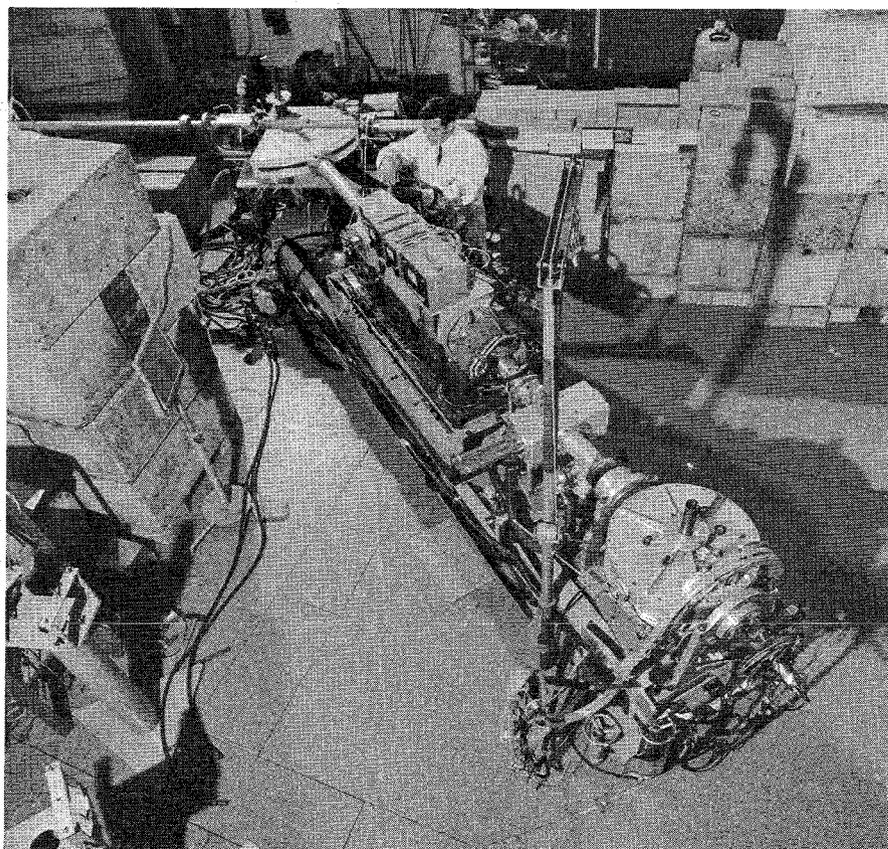


Abb. 7: Gesamtansicht der Apparatur in der Doppelstreuposition

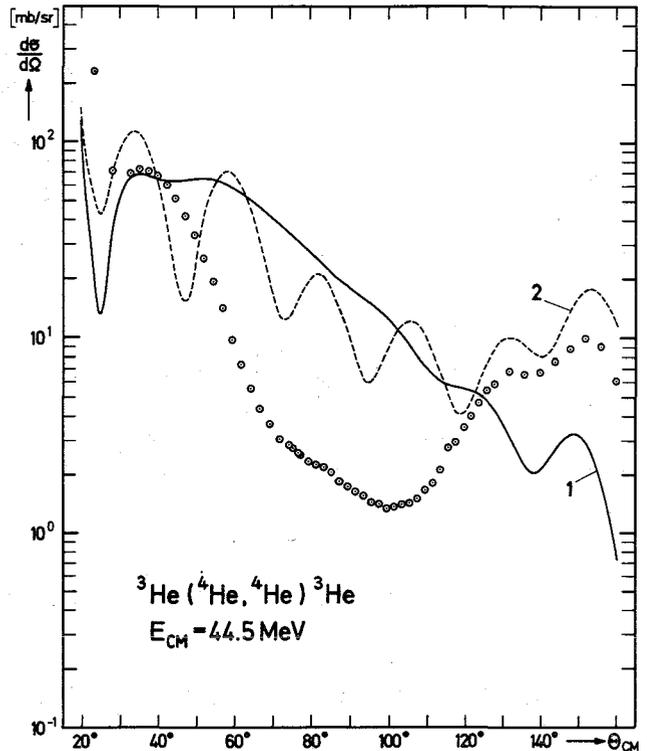
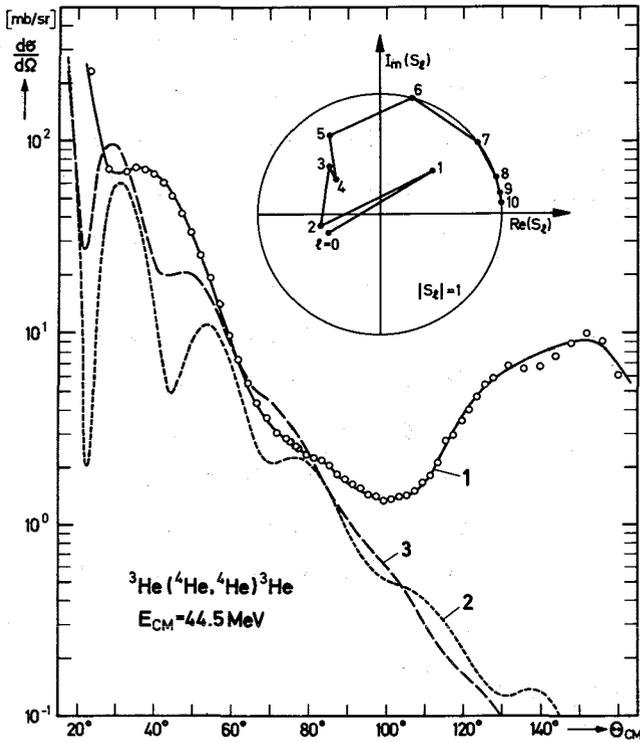


Abb. 8: Messwerte, Streuphasenanalyse (1) und Optische-Modell-Rechnungen (2,3)

Abb. 9: Messwerte und Optische-Modell-Rechnungen

Zunächst wurden unsere experimentellen Ergebnisse bei $E_{CM} = 44 \text{ MeV}$ (Meßpunkte in Abb. 8 bis 10) nach den oben erwähnten Methoden analysiert ⁷⁾.

Abb. 8 zeigt das Ergebnis einer Streuphasenanalyse ¹⁾ (Kurve 1) und das dazugehörige Streuphasendiagramm. Diesem entnimmt man, daß zur Beschreibung der Winkelverteilung absorptive Beiträge nur bei Partialwellen bis zu einem Bahndrehimpuls $\ell = 5$ erforderlich sind. Ferner beobachtet man einen Unterschied zwischen dem Verhalten der geraden und der ungeraden Partialwellen, der aus der Sicht des Optischen Modells nicht zu erwarten ist. Dieses unterschiedliche Verhalten weist darauf hin, daß die Wechselwirkung zwischen ^3He und ^4He drehimpulsabhängig ist: denselben Effekt zeigen auch die aus Clustermodell-Rechnungen abgeleiteten optischen Potentiale ¹⁰⁾.

Versuche, die beobachtete Winkelverteilung mit Hilfe des Optischen Modells zu beschreiben, schlugen fehl. Die Kurven 2 bzw. 3 in Abb. 8 wurden mit einem Radiusparameter für das Zentralpotential von 2.1 fm, einem Spin-Bahn-Potential von 3 MeV und einer Difusität von 0.5 fm gerechnet. Ein mittleres Spin-Bahn-Potential bei einem Parametersatz ¹⁾, der die Vorwärtsstreuung richtig wiedergibt, reicht also zur Erzeugung einer hinreichend großen Rückwärtsstreuung nicht aus.

Durch Verringern des Radius-Parameters auf 1.57 fm ohne (Kurve 1 in Abb. 9) und mit einem Spin-Bahn-Term von 10 MeV (Kurve 2 in Abb. 9) konnte die Rückwärtsstreuung zwar annähernd wiedergegeben werden. Dabei wurde jedoch das beobachtete breite Minimum bei $\theta_{CM} = 100^\circ$ aufgefüllt.

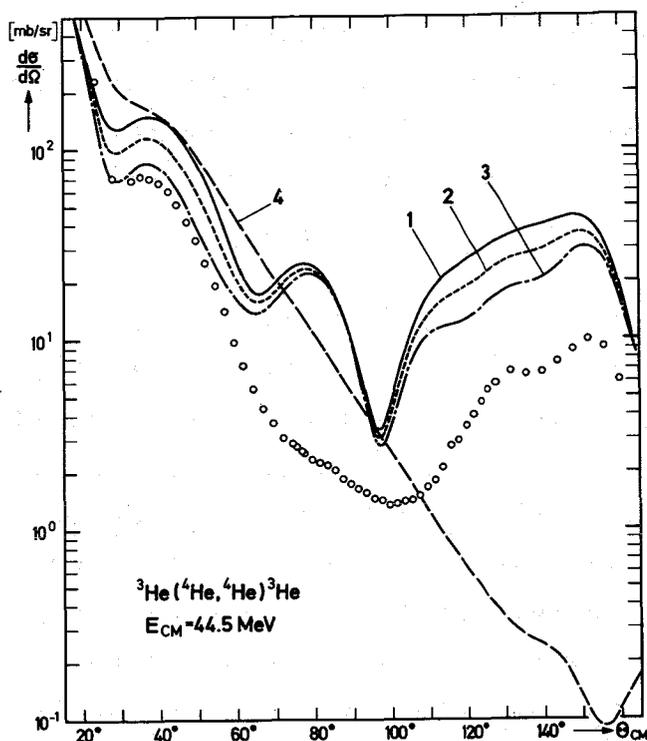


Abb. 10: Messwerte und Cluster-Modell-Rechnungen

Ein Vergleich der gemessenen Winkelabhängigkeit mit dem Ergebnis einer Cluster-Modell-Rechnung in 1-Kanal-Näherung (Kurve 1 in Abb. 10) führt schließlich zu einer qualitativen Übereinstimmung. Die stärkste qualitative Diskrepanz tritt bei dem Maximum um 80° auf, das in der gemessenen Winkelverteilung nur andeutungsweise erkennbar ist. Diese Rechnungen ¹⁰⁾ berücksichtigen keine inelastischen Prozesse. Daher wurden versuchsweise phänomenologische Absorptionen für die Partialwellen eingeführt ⁷⁾ (Kurven 2 und 3 in Abb. 10). Diese Absorptionen, die monoton mit

zunehmendem Partialwellendrehimpuls abnehmen, senken zwar den berechneten Wirkungsquerschnitt, führen aber gerade im Bereich um 80° zu keiner Verbesserung

Die Kurve 4 in Abb. 10 ist wie Kurve 1 berechnet, jedoch ohne Antisymmetrisierung. Aus dem Verlauf dieser Kurve ist zu schließen, daß der beobachtete Rückwärtsanstieg im wesentlichen durch Neutronenaustausch als direkte Folge des Pauli-Prinzips bedingt ist.

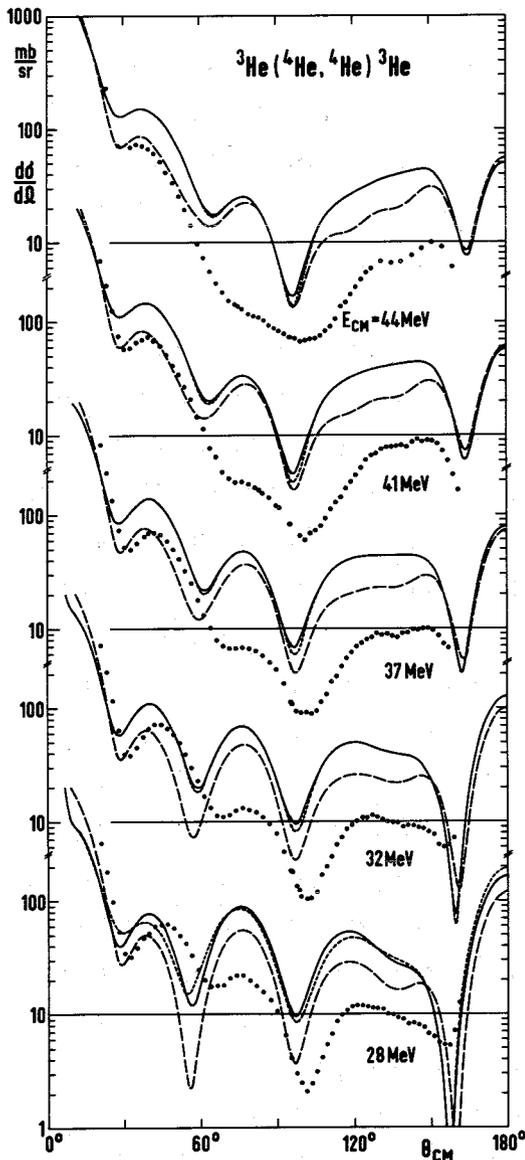


Abb. 11: Die Ergebnisse der beschriebenen Messungen und Cluster-Modell-Rechnungen

die Absorption der Partialwellen gleich $(l+1)^{-1}$ gesetzt (vollständige Absorption der s-Wellen).

Die Energieabhängigkeit der Winkelverteilungen ¹¹⁾ (Abb. 11) zeigt schließlich, daß sich der quantitative Unterschied zu den Cluster-Modell-Rechnungen erwartungsgemäß mit der Energie monoton vergrößert. Unsere experimentellen Ergebnisse und die Rechnungen stimmen qualitativ darin überein, daß sich die Minima in der gleichen Richtung bewegen, daß das mittlere relative Maximum bei 80° gegenüber den benachbarten Maxima zurücktritt, und daß sich die Form des breiten Maximums um 130° auf die gleiche charakteristische Weise ändert.

Die Kurven in Abb. 11 wurden auf verschiedene Weise berechnet. Kurzgestrichelte Kurven: Cluster-Modell-Rechnungen in 1-Kanal-Näherung nach der herkömmlichen Art ¹⁰⁾. Durchgezogene Kurven: Zusätzliche Berücksichtigung der Spin-Bahn-Kopplung für die Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung, angepaßt an $n\text{-}^4\text{He}$ -Streudaten und an die Aufspaltung des Li^7 -Grundzustandes ^{11,12)}. Langgestrichelte Kurven: Zusätzliche phänomenologische Berücksichtigung von Teilchenabsorption ^{7,11)}. Hierbei wurde

Man sieht, daß der Einfluß des 2-Nukleonen-Spin-Potentials mit wachsender Energie abnimmt. Dies gilt insbesondere auch für Rückwärtswinkel. Dies steht im Gegensatz zu einer Optischen-Modell-Interpretation, bei der sich die Spin-Bahn-Wechselwirkung zwischen ^3He und ^4He stark auswirkt.

In Anbetracht der vereinfachten Beschreibung der absorptiven Beiträge kann eine bessere quantitative Übereinstimmung zwischen Experiment und Cluster-Modell-Rechnungen nicht erwartet werden.

Die Ergebnisse des vorliegenden Berichtes können folgendermaßen zusammengefaßt werden:

- 1 - Das Cluster-Modell ist tatsächlich eine geeignete Methode, um die elastische $^3\text{He}+^4\text{He}$ -Streuung zu beschreiben. Der beobachtete Anstieg des Streuquerschnittes unter Rückwärtswinkeln ist auf Neutronenaustausch als direkte Folge des Pauli-Prinzips zurückzuführen.
- 2 - Bei Energien oberhalb $E_{\text{CM}} = 30 \text{ MeV}$ ist der Einfluß von Spin-Bahn-Kräften gering.
- 3 - Quantitative Unterschiede zwischen Ergebnissen der Experimente und der Cluster-Modell-Rechnungen sind im wesentlichen auf den Einfluß inelastischer Kanäle zurückzuführen. Diese Frage kann weiter dadurch untersucht werden, daß man eine Streuphasenanalyse durchführt, bei der man von den reellen Streuphasen ausgeht, die nach dem Cluster-Modell berechnet wurden.

Wir danken den Herren Professoren K. Wildermuth, A. Citron, W. Heinz, H. Schopper und H.W. Wittern für aufschlußreiche Diskussionen sowie für ihr ermutigendes Interesse am Fortgang der Arbeiten. Unser Dank gilt ferner Herrn Dr. G. Schatz und seinem Stab für die Bereitstellung des Strahles am Zyklotron.

Literatur

- 1) W. Fetscher, K. Sattler, N.C. Schmeing, E. Seibt und Ch. Weddigen
Technical Report KFK 1204 (1970)
- 2) siehe Literaturangaben in 7)
- 3) T.A. Tombrello
private Mitteilung
- 4) F. Dunnill, T.J. Gray, H.T. Fortune, and N.R. Fletcher
Nucl. Phys. A93 (1967) 201
- 5) C.G. Jackson and R.E. Brown
Phys. Rev. C1 (1970) 1615
- 6) P. Schwandt, B.W. Ridley, S. Hayakawa, L. Put, and J.J. Kraushaar
Phys. Lett. 30B (1969) 30
- 7) W. Fetscher, K. Sattler, N.C. Schmeing, E. Seibt, Ch. Weddigen, and E.J. Kanellopoulos
Phys. Lett. 34B (1971) 171
- 8) S. Vincent and E.T. Boschitz
Nucl. Phys. 143A (1970) 121
- 9) Ch. Weddigen
Technical Report KFK 994 (1969) und
E. Seibt, I. Schouky und Ch. Weddigen
Technical Report KFK 1173 (1970)
- 10) siehe z.B. K. Wildermuth and W. McClure
Springer Tracts in Modern Physics 41, Springer, Berlin (1966), oder
Y.C. Tang
Proc. Intern. Conf. on Clustering Phenomena in Nuclei, Bochum (1969), p. 109
- 11) W. Fetscher, E. Seibt, Ch. Weddigen und E.J. Kanellopoulos
erscheint in Phys. Lett.
- 12) E.J. Wurster-Kanellopoulos
Technical Report BMwF-FB K 67-69 (1967)