

# Die Untersuchung fast-adiabatischer Stöße mit Spaltprodukten

Von P. ARMBRUSTER \*, E. RÖCKL \*, H. J. SPECHT  
und A. VOLLMER

Laboratorium für Technische Physik der Technischen Hochschule München

(Z. Naturforsch. **19 a**, 1301—1304 [1964]; eingegangen am 4. Juli 1964)

Spaltprodukte wurden in Targets verschiedener Ordnungszahlen abgebremst. Die dabei auftretende Ionisation innerer Elektronenschalen wurde mit Hilfe der charakteristischen RÖNTGEN-Strahlung als Funktion der Energie der Spaltprodukte, der Masse der Spaltprodukte und der Ordnungszahl der Target-Atome gemessen. Ferner wurde eine Abhängigkeit der Energie der L-Strahlung der Spaltprodukte von der Ordnungszahl der Target-Atome gefunden.

Die verschiedenen Stoßprozesse zwischen schweren Teilchen können mit Hilfe eines Parameters  $\eta$  unterschieden werden, der das Verhältnis der im freien Stoß auf ein ruhendes Elektron maximal übertragbaren Energie  $T_m$  zur Bindungsenergie  $J$  eines anzuregenden Elektrons darstellt. Ist  $v$  die Relativgeschwindigkeit der Stoßpartner und  $u$  die Umlaufgeschwindigkeit des anzuregenden Elektrons, so ist

$$\eta = (2 v/u)^2.$$

Fast-adiabatische Stöße sind gekennzeichnet durch  $\eta < 1$ ; die Störung der Elektronenbahnen erfolgt langsam im Vergleich zur Geschwindigkeit der Elektronen in den gestörten Bahnen. Eine Ionisation ist nur deshalb möglich, weil für schwere Teilchen auch bei  $\eta < 1$  die kinetische Energie die Bindungsenergie  $J$  erheblich übersteigt und die „effektive Masse“ der Elektronen durch die Bindung an den Kern erhöht ist. Fast-adiabatische Stöße sind seltene Prozesse; der Wirkungsquerschnitt ist klein und nimmt stark ab mit abnehmender Relativgeschwindigkeit  $v$  der Stoßpartner und zunehmender Ionisationsenergie  $J$  der Elektronen.

Die Ionisation innerer Elektronenschalen durch fast-adiabatische Stöße ist vielfach mit Protonen und  $\alpha$ -Teilchen als Geschossen untersucht worden. Einen Überblick über die vorhandenen Arbeiten und den derzeitigen Stand der zuerst von HENNEBERG<sup>1</sup> ausgearbeiteten Theorie geben MERZBACHER und LEWIS<sup>2</sup>. Die Verwendung schwerer Ionen als Geschosse ist

neu, abgesehen von einigen frühen Arbeiten<sup>3, 4</sup> mit langsamem ( $< 1$  MeV) Ionen. Im Energiebereich 10—100 MeV stellen Spaltprodukte ein ausgezeichnetes Hilfsmittel dar, das zuerst von ARMBRUSTER<sup>5</sup> benutzt wurde. L-Strahlung der Spaltprodukte und charakteristische Eigenstrahlung verschiedener Target-Atome konnten nachgewiesen werden.

## 1. Versuchsaufbau

Der mit Helium gefüllte magnetische Massenseparator des Münchner Reaktors<sup>6, 7</sup> liefert einen Spaltprodukt-Strahl mäßiger Massenauflösung (ca.  $\pm 5\%$ ) bei einer Intensität von ca.  $5 \cdot 10^4$  Teilchen/min in den Maxima der leichten und der schweren Gruppe. Abb. 1 zeigt den schematischen Aufbau. Die Spaltprodukte durchlaufen eine mit Methan gefüllte Abbremsstrecke, deren Druck im Bereich 0—7 Torr einstellbar ist und eine Variation der kinetischen Energie der Spaltprodukte im Bereich 10—80 MeV erlaubt; die Eichung geschieht mit einem Halbleiterzähler<sup>8</sup>.

Nach Durchtritt durch ein fensterloses Transmissions-Proportionalzählrohr<sup>9</sup>, das sich am Ende der Methan gefüllten Abbremsstrecke befindet und daher beim gleichen Druck wie sie arbeitet, werden die Spaltprodukte in Targets verschiedener Ordnungszahlen abgebremst. Intensität und Energie der nach der Ionisation innerer Elektronenschalen auftretenden charakteristischen RÖNTGEN-Strahlung werden mit Hilfe eines Proportionalzählrohres (90% Ar + 10% CH<sub>4</sub>) hoher Auflösung in einem TMC-Vielkanal-Analysator gemessen. Koinzidenzen zwischen dem Spaltprodukt-Signal des Transmissions-Zählrohrs und den RÖNTGEN-Quanten unterdrücken den Hallenuntergrund nahezu vollständig.

\* jetzt: Kernforschungsanlage Jülich.

<sup>1</sup> W. HENNEBERG, Z. Phys. **86**, 592 [1933].

<sup>2</sup> E. MERZBACHER u. H. W. LEWIS, Handbuch der Physik Bd. 34, Springer-Verlag, Berlin 1958.

<sup>3</sup> W. M. COATES, Phys. Rev. **46**, 542 [1934].

<sup>4</sup> M. TANAKA u. J. NONAKA, Proc. Phys. Math. Soc., Japan **20**, 33 [1938].

<sup>5</sup> P. ARMBRUSTER, Z. Phys. **166**, 341 [1962].

<sup>6</sup> C. FULMER u. B. L. COHEN, Nucl. Phys. **6**, 547 [1958].

<sup>7</sup> P. ARMBRUSTER, Nukleonik **3**, 188 [1961].

<sup>8</sup> W. REISDORF, Diplomarbeit, Techn. Hochschule München, 1963.

<sup>9</sup> P. ARMBRUSTER u. H. J. SPECHT, erscheint in Nukleonik.



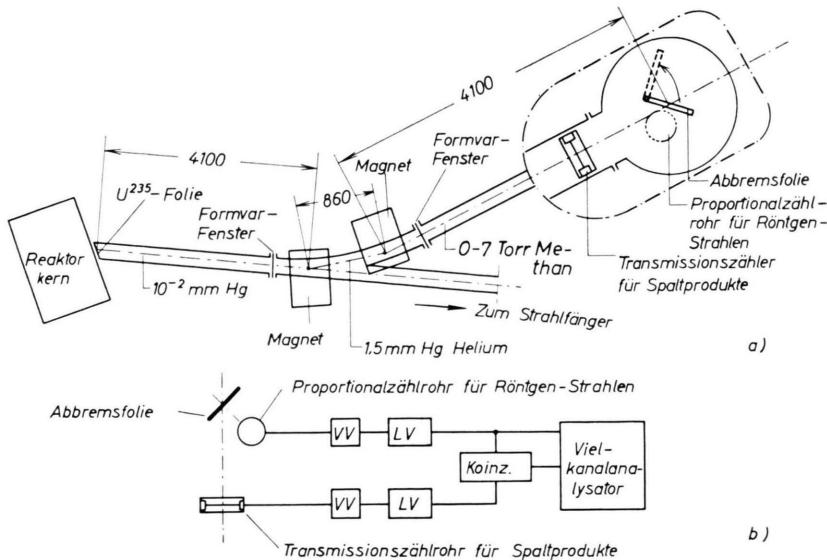


Abb. 1. Versuchsaufbau (a) und Blockschaltbild der Elektronik (b).

## 2. Messungen

Der Wirkungsquerschnitt für die Ionisation innerer Elektronenschalen hängt ab von der kinetischen Energie der Spaltprodukte, der Kernladung der Spaltprodukte, möglicherweise der Ionenladung der Spaltprodukte und der Ordnungszahl der Target-Atome. Der Versuchsaufbau erlaubt, all diese Parameter leicht zu variieren.

Die Ermittlung des Wirkungsquerschnitts für die Ionisation innerer Schalen aus der gemessenen Zahl der RÖNTGEN-Quanten/min erfordert umfangreiche Korrekturen:

a) Da die Spaltprodukte in den Targets voll abgebremst werden, geht die Energie-Reichweite-Beziehung der Spaltprodukte für die verschiedenen Targets in die Meßgröße ein; die Korrektur hängt von der Energie der Spaltprodukte und der Ordnungszahl der Target-Atome ab.

b) Aus dem gleichen Grunde spielt die Selbstabsorption der RÖNTGEN-Strahlung in den Targets eine entscheidende Rolle; die Korrektur hängt ab von der Energie der RÖNTGEN-Strahlung und der Ordnungszahl der Target-Atome.

c) Die Auffüllung der Schalen verursacht neben der Emission von charakteristischer RÖNTGEN-Strahlung auch die Emission von AUGER-Elektronen; die Fluoreszenzausbeute hängt ab von der Ordnungszahl der ionisierten Atome und der Hauptquantenzahl der ionisierten Schale (K, L, ...).

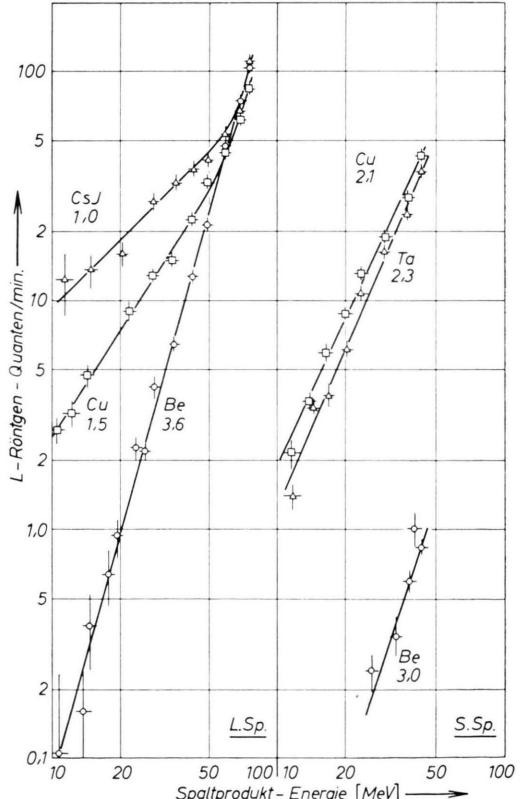


Abb. 2. Abhängigkeit der Intensität der L-RÖNTGEN-Strahlung der leichten und der schweren Spaltprodukt-Gruppe von der kinetischen Energie der Spaltprodukte für verschiedene Target-Atome. Die Zahlen bedeuten die Exponenten der Energieabhängigkeit.

d) Die Nachweiswahrscheinlichkeit des RÖNTGEN-Zählrohrs hängt insbesondere unterhalb 3 keV und oberhalb 10 keV stark von der Energie der RÖNTGEN-Strahlung ab.

Im folgenden werden nur unkorrigierte, direkte Meßergebnisse mitgeteilt, sofern sie die L-RÖNTGEN-Strahlung der Spaltprodukte als Funktion der genannten Parameter betreffen. Eine weitergehende Arbeit ist in Vorbereitung<sup>10</sup>; sie wird zusätzlich die Meßergebnisse hinsichtlich der Eigenstrahlung der Target-Atome, eine Berücksichtigung aller Korrekturen, eine Absoluteichung des Wirkungsquerschnitts und einige theoretische Gesichtspunkte enthalten.

Abb. 2 zeigt die Abhängigkeit der Zahl der nachgewiesenen L-RÖNTGEN-Quanten/min der Spaltprodukte – getrennt für die leichte und schwere Gruppe – als Funktion der kinetischen Energie der Spaltprodukte für verschiedene Target-Atome. Die Zahl der Quanten nimmt stark mit der kinetischen Energie ab. Diese Übereinstimmung mit der theoretischen Erwartung<sup>2</sup> ist jedoch nur qualitativ. Der Exponent der Energieabhängigkeit der Meßgröße stellt – bei Berücksichtigung aller genannten Korrekturen – eine obere Grenze für den Exponenten des Wirkungsquerschnitts selbst dar. Die HENNEBERGSche Theorie gibt  $n = 4$ ; gemessen werden ausnahmslos kleinere Werte, die zudem von der Ionisationsenergie  $J$  abhängen und – zumindest für die 2 keV-L-Strahlung der leichten Spaltprodukte – mit wachsender Ordnungszahl der Target-Atome weiter abnehmen.

Abb. 3 zeigt die Abhängigkeit der Zahl der nachgewiesenen L-RÖNTGEN-Quanten/min der Spaltprodukte als Funktion der Ordnungszahl der Target-Atome; die kinetische Energie der Spaltprodukte ist dabei konstant 76 MeV für die leichte und 44 MeV für die schwere Gruppe. Die HENNEBERGSche Theorie gibt eine Abhängigkeit  $\sim Z^2$ ; gemessen werden ausgeprägte Maxima und Minima. Der sprunghafte Anstieg der Zahl der Quanten an den (in Abb. 3 bezeichneten) Stellen, an denen die Energie der L-RÖNTGEN-Strahlung der Spaltprodukte gleich der Bindungsenergie der K-, L- bzw. M-Elektronen der Target-Atome ist, wird durch den Sprung der Selbstabsorption der RÖNTGEN-Strahlung in den Targets verursacht. Die Berücksichtigung aller Korrekturen führt jedoch nur zu einer symmetrischeren Form der Maxima und zu einer leichten Verschiebung in

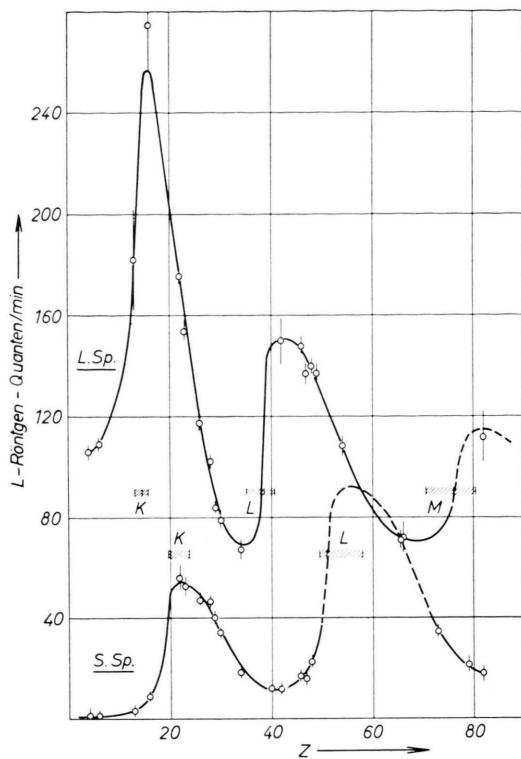


Abb. 3. Abhängigkeit der Intensität der L-RÖNTGEN-Strahlung der leichten und der schweren Spaltprodukt-Gruppe von der Ordnungszahl  $Z$  der Target-Atome. In den schraffierten Bereichen unterscheidet sich die Bindungsenergie der L-Elektronen der Spaltprodukte um weniger als 20% von der Bindungsenergie der K-, L- bzw. M-Elektronen der Target-Atome.

Richtung höherer Ordnungszahlen, ohne die Fluktuationen zu beseitigen. Die Lage der Maxima deutet auf Elektronenaustausch-Phänomene innerhalb des quasi-molekularen Zwischenzustandes während des Stoßprozesses hin.

Die Emission von RÖNTGEN-Strahlung sollte ein von der Art der Ionisation der betreffenden Schale unabhängiger Prozeß sein. Entgegen der Erwartung wurde jedoch (Abb. 4) für die leichte wie für die schwere Gruppe eine Zunahme der Energie der L-Strahlung der Spaltprodukte mit der Ordnungszahl der Stoßpartner gefunden. Die Energiezunahme bei Verwendung eines Cu-Targets gegenüber einem Be-Target beträgt nach mehreren direkten Messungen und einer genauen Absorptionsmessung  $(5,6 \pm 1,5)\% = (0,11 \pm 0,03)$  keV. Möglicherweise erfolgt die Emission der RÖNTGEN-Strahlung, ehe eine durch die Bildung des quasi-molekularen Zwischenzustandes erfolgte  $Z$ -abhängige Termverschiebung

<sup>10</sup> H. J. SPECHT, Dissertation, Techn. Hochschule München 1964.

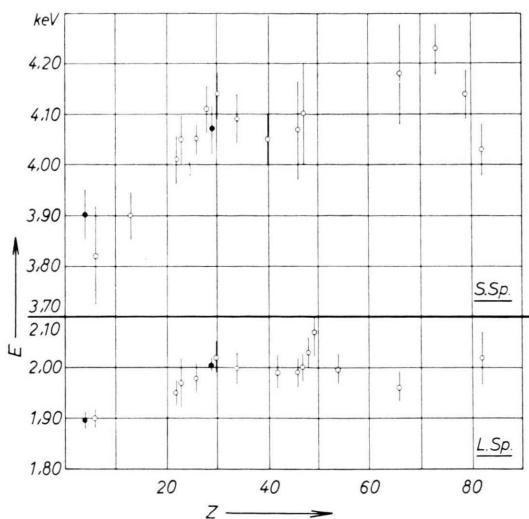


Abb. 4. Abhängigkeit der Energie  $E$  der L-RÖNTGEN-Strahlung der leichten und der schweren Spaltprodukt-Gruppe von der Ordnungszahl  $Z$  der Target-Atome.

(die Hölle tauchen sehr tief ineinander) völlig abgeklungen ist; die Flugdauer eines Spaltprodukts auf der Länge eines Atomdurchmessers liegt in der Größenordnung  $10^{-17}$  sec, die Lebensdauer von RÖNTGEN-Niveaus in der Größenordnung  $10^{-16}$  sec. Erklärungen über die Ionenladung der Spaltprodukte sind wegen der Größe des Effektes und seinem Auftreten auch bei der Eigenstrahlung der Target-Atome wenig wahrscheinlich.

Die Messung der L-RÖNTGEN-Energie der Spaltprodukte als Funktion ihrer Masse ermöglicht wegen des Zusammenhangs der Energie mit der Ordnungszahl Aussagen über die primäre Ladungsverteilung der Spaltprodukte. Ergebnisse solcher Messungen stimmen mit anderen Daten überein<sup>11</sup>.

Herrn Prof. Dr. H. MAIER-LEIBNITZ sei herzlich gedankt für sein Interesse an dieser Arbeit.

<sup>11</sup> P. ARMBRUSTER, D. HOVESTADT, H. MEISTER u. H. J. SPECHT, Nucl. Phys. **54**, 586 [1964].

## Das Muonen-Spektrum in 3000 m Höhe

Von O. C. ALLKOFER und J. TRÜMPER

Institut für Reine und Angewandte Kernphysik der Universität Kiel

(Z. Naturforsch. **19 a**, 1304—1309 [1964]; eingegangen am 11. Juli 1964)

In 3000 m Höhe wurde mit einem magnetischen Impulsspektrographen das Gesamtspektrum der Ultrastrahlungsteilchen gemessen und daraus das Muonen-Spektrum hergeleitet. Auf Meereshöhe wurden mit der gleichen Apparatur Vergleichsmessungen durchgeführt. Ferner wurden aus den Spektren der positiven und negativen Teilchen die Verläufe des Ladungsverhältnisses bestimmt. Durch Neigung des Spektrographen um den Zenitwinkel von  $37.5^\circ$  in Ost- und West-Richtung wurde die spektrale Intensitätsabnahme untersucht. Der Meßbereich des Spektrographen reicht von  $2 \cdot 10^8$  eV/c bis  $2 \cdot 10^{10}$  eV/c.

Messungen der Impulsspektren von Ultrastrahlungsteilchen werden auf Meereshöhe seit Jahren durchgeführt. Dabei ist es das Ziel, Einblick in den Wechselwirkungs-Mechanismus zu gewinnen, auf Grund dessen die sekundären Teilchen durch die primäre Ultrastrahlung gebildet werden. Da die Aussagen darüber um so wichtiger und interessanter werden, je höher der meßbare Impuls reicht, wurde in den letzten Jahren das Augenmerk vornehmlich darauf gerichtet, das Auflösungsvermögen von Ultrastrahlungsspektrographen so hoch wie möglich zu treiben. Der maximal meßbare Impuls liegt bei den größten Spektrographen heute fast bei  $1000$  GeV/c

(s. Anm. <sup>1, 2</sup>). Entsprechend der hohen Meßgenauigkeit hat die Aufwendigkeit der Apparaturen zugenommen.

Eine Frage, die im Zusammenhang mit Ultrastrahlungsspektren ebenfalls interessiert, ist die Höhenabhängigkeit der Spektren, da sich durch Vergleich der Spektren der einzelnen Komponenten in verschiedenen atmosphärischen Tiefen ebenfalls Aufschlüsse über den Wechselwirkungsmechanismus der Teilchen mit den Kernen der Luft gewinnen lassen. Im Unterschied zu Untersuchungen auf Meereshöhe, wo man es praktisch nur mit Muonen zu tun hat, spielen mit zunehmender Höhe auch andere Ultrastrah-

<sup>1</sup> J. E. R. HOLMES, B. G. OWEN u. A. L. RODGERS, Proc. Phys. Soc., Lond. **78**, 496 [1961].

<sup>2</sup> G. BROOKE, M. GARDENER, J. L. LLOYD, S. KISDNASAMY u. A. W. WOLFENDALE, Proc. Phys. Soc., Lond. **80**, 674 [1962].