

Die Beziehung (2) wurde unter Verwendung des Lennard-Jones-Potentials (3) integriert. Geht man auf die reduzierten Größen

$$T^* = \frac{T}{\varepsilon/k} \quad \text{und} \quad B^* = \frac{B}{\frac{2}{3} \pi N \sigma^3} = \frac{B}{b_0}$$

über, so erhält man:

$$B^*(T^*) = \sum_{j=0}^{\infty} b^{(j)} T^{*- (2j+1)/4}.$$

Die Faktoren $b^{(j)}$ werden durch die I -Funktionen gegeben:

$$b^{(j)} = - \frac{2j+\frac{1}{2}}{4j!} I\left(\frac{2j-1}{4}\right).$$

Unter den Voraussetzungen, daß:

- Die Virialkoeffizienten der Isotope dem Theorem der Übereinstimmenden Zustände genügen,
- $\varrho \ll 1$, $\delta \ll 1$ ist,

kann die Beziehung

$$\frac{B'-B}{B'} = 3\varrho - \frac{-\delta S_1(T^*) + \frac{1}{2} \delta^2 S_2(T^*)}{b_0'} \quad (4)$$

abgeleitet werden. Hierin ist:

$$S_1(T^*) = \sum_{j=0}^{\infty} b^{(j)} \frac{2j+1}{4} T^{*- (2j+1)/4},$$

$$S_2(T^*) = \sum_{j=0}^{\infty} b^{(j)} \frac{2j+1}{4} \frac{2j+5}{4} T^{*- (2j+1)/4},$$

$$b_0' = \frac{2}{3} \pi N \sigma^3.$$

Die Beziehung (4) liefert den gesuchten Zusammenhang zwischen δ , ϱ und $(B'-B)/B'$.

Eine Berechnung der Faktoren S_1 und S_2 für $T^* = 1,185$ entsprechend der Meßtemperatur von $236,04^\circ\text{K}$ liefert

$$(B'-B)/B' = 3\varrho - 0,025\delta + 0,031\delta^2.$$

In diesem Temperaturbereich ist $(B'-B)/B'$ im wesentlichen von dem Isotopie-Effekt in ϱ abhängig. Berücksichtigt man den oben geschätzten Translations-Quanteneffekt von $0,12\text{ cm}^3/\text{Mol}$, so ist der auf die Änderung des Paarpotentials zurückzuführende Effekt $((B'-B)/B')_{\text{pot}} = 1,12 \cdot 10^{-2}$, und somit ergibt sich $\varrho \cong 0,37 \cdot 10^{-2}$.

Dieses Ergebnis läßt sich mit ϱ -Werten aus Molvolumina-Isotopie-Effekten in flüssiger Phase vergleichen⁶. In dem Temperaturbereich zwischen 130 und 160°K ergibt sich für den Isotopie-Effekt zwischen C_2H_4 und C_2D_4 : $\varrho = 0,4 \cdot 10^{-2}$. Die Übereinstimmung ist recht gut und bestätigt das Ergebnis, daß der Effekt bei $T^* \geq 1$ hauptsächlich ein Volumeneffekt ist. Weitere Messungen sind im Gange zur Untersuchung der Temperaturabhängigkeit des Effekts, insbesondere bei tiefen Temperaturen, bei denen Quanteneffekte wirksam werden und die Terme δS_1 und $\frac{1}{2} \delta^2 S_2$ ins Gewicht fallen.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danken wir für die finanzielle Unterstützung (W. G.) und die großzügige Bereitstellung von Sachmitteln. Herrn Prof. R. HAUL sind wir für die Förderung dieser Arbeit sehr zu Dank verpflichtet.

Umladungs- und Ionisationswirkungsquerschnitte beim Stoß von Protonen auf He-3 und He-4

MARK BECKER und ARTHUR SCHARMANN

I. Physikalisches Institut der Universität Gießen

(Z. Naturforsch. **24 a**, 854—855 [1969]; eingegangen am 31. März 1969)

Die Umladungs- und Ionisationswirkungsquerschnitte beim Stoß von H^+ , D^+ , H_2^+ und D_2^+ -Ionen auf leichten und schweren Wasserstoff (H_2 und D_2) wurden von HOLLRICHER^{1,2} mit der Kondensatormethode gemessen. Er fand im Energiebereich von $1,5$ bis 30 keV für die Umladungsquerschnitte beim Beschuß mit Atomionen den größten Isotopieeffekt, der bei gleicher Ionengeschwindigkeit folgende Abhängigkeit zeigte:

$$\sigma(\text{H}^+, \text{D}_2) > \sigma(\text{H}^+, \text{H}_2) \approx \sigma(\text{D}^+, \text{D}_2) > \sigma(\text{D}^+, \text{H}_2).$$

Die maximalen Unterschiede betrugen bis zu knapp 10% . Neuere Untersuchungen wurden von MECKBACH et al.³ beim Stoß von Protonen und Deuteronen auf leichten und schweren Wasserstoff (H_2 und D_2) mit

der Ladungsausgleichsmethode ausgeführt. Aus den einzelnen Ladungsgleichgewichtsanteilen wurden nach ALLISON⁴ die Wirkungsquerschnitte berechnet. Es wurde kein Unterschied bei den Wirkungsquerschnitten verschiedener Isotopenkombinationen bei gleicher Ionengeschwindigkeit gefunden, obwohl die Meßgenauigkeit von $1-2\%$ größer als bei HOLLRICHER war. Eine theoretische Abschätzung des Problems $\text{H}^+ + \text{H} \rightarrow \text{H} + \text{H}^+$ von PONCE³ bestätigt die experimentellen Ergebnisse von MECKBACH et al.

Der Widerspruch zwischen den Messungen von HOLLRICHER und MECKBACH et al. bei den Wirkungsquerschnitten sollte nicht von der Verwendung verschiedener Meßverfahren abhängen. Deshalb wurde der Isotopieeffekt bei den hier besprochenen Messungen an einem anderen Atomsystem unter Benutzung der gleichen, nur wenig veränderten Apparatur und des gleichen Meßverfahrens wie bei HOLLRICHER überprüft. Es wurde mit Protonen einer Energie von 3 bis 30 keV auf He-3 und He-4 geschossen. Nach den Ergebnissen von Hollricher müßte man hier zumindest bei den Umladungs-wirkungsquerschnitten einen meßbaren Isotopieeffekt erwarten.

¹ O. HOLLRICHER, Dissertation, Gießen 1964.

² O. HOLLRICHER, Z. Physik **187**, 41 [1965].

³ W. MECKBACH, G. LANTSCHER, V. H. PONCE u. E. SALVATELLI, persönliche Mitteilung 1968.

⁴ S. K. ALLISON, Rev. Mod. Phys. **30**, 4 [1958].



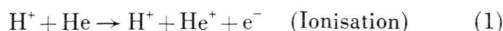
Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitalized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

Beim Einfall von Protonen auf Helium herrschen bei nicht zu hoher Energie die beiden folgenden Prozesse vor:



Die entstehenden Sekundärladungen sind langsam und können mit zum Primärionenstrom parallelen Platten aufgesammelt werden. Aus den Reaktionsgleichungen (1) und (2) ergibt sich, daß die Umladung dem gesamten Sekundärstrom und die Ionisation dem Elektronenstrom proportional ist. Für jeweils eine bestimmte Ionenenergie und genügend niedrige Drücke gilt:

$$\sigma = \frac{i}{I} \frac{k T}{L p}$$

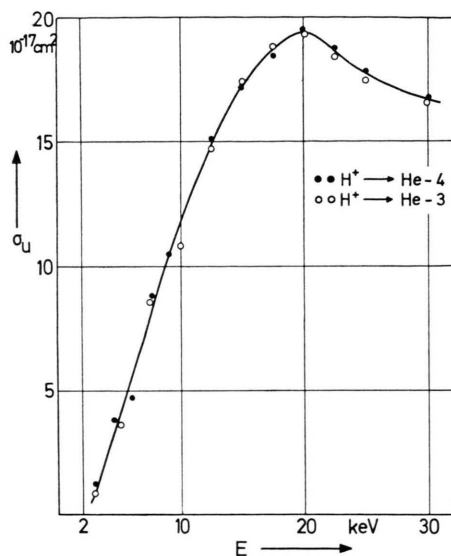


Abb. 1. Umladungsquerschnitt σ_u beim Stoß von H^+ auf He-3 und He-4 als Funktion der Protonenenergie.

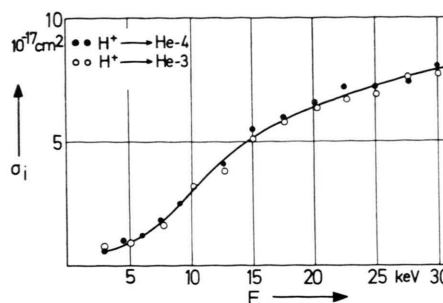


Abb. 2. Ionisationsquerschnitt σ_i beim Stoß von H^+ auf He-3 und He-4 als Funktion der Protonenenergie.

mit σ = Wirkungsquerschnitt, I = Primärionenstrom, i = Sekundärströme, p = Druck, T = Temperatur, k = Boltzmann-Konstante, L = Länge der Meßplatte.

Das Stromverhältnis hängt linear vom Druck ab. Aus den Anstiegen dieser Geraden kann der Wirkungsquerschnitt bestimmt werden.

Insgesamt wurden 300 Meßgeraden mit 5 bis 6 einzelnen Meßpunkten aufgenommen. Jeder einzelne Wirkungsquerschnitt wurde aus acht Geradenanstiegen gemittelt. Die erhaltenen Umladungswirkungsquerschnitte sind in Abb. 1 und die Ionisationswirkungsquerschnitte in Abb. 2 in Abhängigkeit der Protonenenergie angegeben. Ein relativer Unterschied konnte bei den Umladungswirkungsquerschnitten zwischen He-3 und He-4 innerhalb der Meßgenauigkeit von 2–3% nicht gefunden werden. Es kann auch keine eindeutige Tendenz innerhalb der Meßgenauigkeit festgestellt werden; vielmehr liegen die Meßpunkte dort statistisch verteilt. Nachdem bei der Umladung kein Isotopieeffekt gemessen werden konnte, war auch für die Ionisation keiner zu erwarten, da schon bei den Ergebnissen von HOLLRICHER der relative Unterschied bei den Ionisationswirkungsquerschnitten viel kleiner und da der Meßfehler dort größer war.