

Messung von Wirkungsquerschnitten σ_{1-1} bei Helium und Bestimmung der Ausbeute an negativen Heliumionen durch Umladung in Gas- und Dampftargets

A. PAPKOW UND G. J. STEIGER

Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg

(Z. Naturforsch. 21 a, 1048—1051 [1966] ; eingegangen am 4. April 1966)

Herrn Professor Dr. W. GENTNER zum 60. Geburtstag gewidmet

Für die Molekül-gase Wasserstoff, Ammoniak, Kohlendioxid, Luft und Acetylen, sowie für Wasserdampf und Äthanoldampf wurden die Wirkungsquerschnitte σ_{1-1} für den Umladeprozess $\text{He}^+ \rightarrow \text{He}^-$ gemessen und die Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes von der Energie der Primärionen (15 bis 72 keV) untersucht. Für die genannten Gase und Dämpfe wurde ferner die maximale Ausbeute an negativen Heliumionen in Abhängigkeit von der Energie der Primärteilchen bestimmt. Die maximalen Wirkungsquerschnitte liegen für die benutzten Gase und Dämpfe bei $0,6 \cdot 10^{-19} \text{ cm}^2$. Der Verlauf von σ_{1-1} als Funktion der Energie der He^+ -Ionen ist für die meisten der untersuchten Molekül-gase komplizierter als für Edelgase als Targetmedien. Der maximale Anteil der negativen Heliumionen am Gesamtstrom betrug bei der Umladung in Luft 0,11%, in Äthanoldampf 0,11%, in Wasserdampf 0,13%, in Ammoniak 0,14%, in Wasserstoff 0,15%, in Acetylen 0,19%, und in Kohlendioxid 0,20%.

Die Kenntnis von Umladequerschnitten für die Bildung negativer Ionen und die Bestimmung der Gleichgewichtsanteile bei Ionen ist heute neben dem theoretischen Interesse besonders von praktischer Bedeutung bei der Anwendung in Tandem-VAN-DE-GRAAFF-Beschleunigern.

Bei Helium wurden bisher nur die Wirkungsquerschnitte σ_{1-1} von He^+ in He, Ne, Ar, Kr und Xe gemessen, sowie die Gleichgewichtsanteile für negative Heliumionen in Kr, Xe und H_2 ^{1, 2, 3, 4}. In der vorliegenden Arbeit sind nun für sieben weitere Gase und Dämpfe die Wirkungsquerschnitte σ_{1-1} für He^+ bestimmt und die Gleichgewichtsanteile für negative Heliumionen im Ionenstrahl gemessen worden.

Apparatur

Die experimentelle Anordnung, mit der die Wirkungsquerschnitte und die Umladegleichgewichte beim Helium gemessen wurden, ist in Abb. 1 dargestellt.

Die aus einer PENNING-Ionenquelle extrahierten, einfach positiv geladenen Heliumionen werden mit einer elektrostatischen Linse nachbeschleunigt und in einem 60°-Anlysiermagneten von Verunreinigungen separiert. Der monochromatische He^+ -Strahl durchläuft anschließend das von den beiden Kanälen begrenzte Gastarget in der Umladekammer. Der Druck in der Umladekammer und damit die Targetdicke läßt sich durch ein Gaseinlaßventil kontinuierlich regulieren. Nach dem Austritt aus der Umladekammer wird der Ionenstrahl im elektrostatischen Feld in die einzelnen Ladungs-

komponenten zerlegt, die in FARADAY-Käfigen hinter der Blende aufgefangen und nachgewiesen werden.

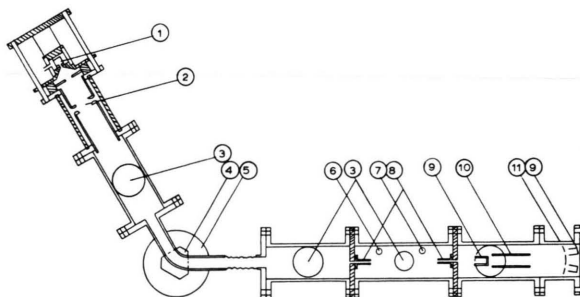


Abb. 1. (1) Ionenquelle, (2) Elektrostatische Beschleunigungsline, (3) Pumpöffnung, (4) Polschuh des Ablenkmagneten, (5) Erregerspule des Ablenkmagneten, (6) Gaseinlaß, (7) Druckmeßstelle, (8) Kanal zur Druckreduzierung, (9) FARADAY-Käfig, (10) Ablenkkondensator, (11) Abschirmung.

Der zwischen Ablenkkondensator und Gastarget befindliche FARADAY-Käfig dient zur Justierung des Ionenstrahls und besitzt einen beweglichen Boden, der aus dem Strahlengang entfernt werden kann.

Messung der Wirkungsquerschnitte σ_{1-1}

Bei hinreichend dünnen Targets ist es bei gegebener Energie der positiven Heliumionen mit Hilfe von Gl. (1)⁵ möglich, die Wirkungsquerschnitte σ_{1-1} zu bestimmen.

$$\sigma_{1-1} = (k/L) T \frac{d(I/I_0^+)}{dp} \quad (1)$$

¹ V. M. DUKEL'SKIJ et al., Soviet Phys. — JETP 3, 764 [1956/7].

² K. MELCHIOR u. A. PAPKOW, Phys. Letters 8, 178 [1964].

³ TH. JORGENSEN, Nucl. Sci. Series 29, 72 [1960].

⁴ K. MELCHIOR, Diplomarbeit Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg 1964.

⁵ YA. M. FOGEL, Soviet Phys. — Usp. 3, 390 [1960].



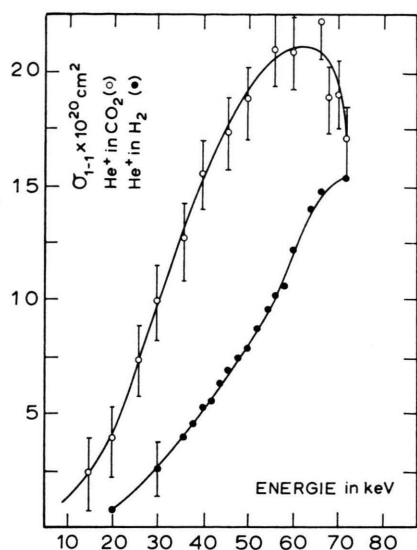


Abb. 2. Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes σ_{1-1} von der Energie der positiven Heliumionen für die Umladegase H_2 und CO_2 .

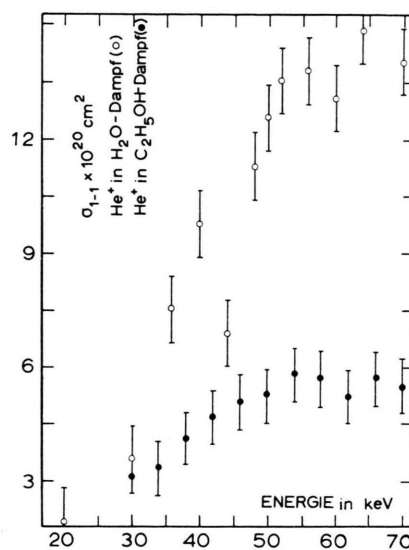


Abb. 3. Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes σ_{1-1} von der Energie der positiven Heliumionen für die Umladedämpfe H_2O und C_2H_5OH .

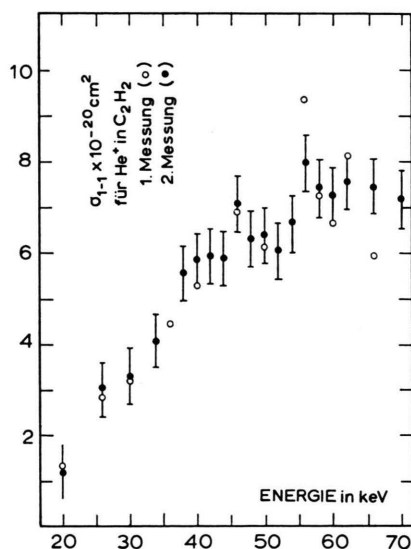


Abb. 4. Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes σ_{1-1} von der Energie der positiven Heliumionen für Acetylen als Umladegas. Es wurden zwei getrennte Messungen gemacht.

Dabei bedeuten: k die BOLTZMANN-Konstante, L die effektive Länge der Umladekammer, T die absolute Temperatur des Umladegases, I den im FARADAY-Käfig gemessenen Strom an negativen Heliumionen, I_0^+ den in der Umladekammer eingeschossenen Strom einfach positiv geladener Heliumionen, p den in der Umladekammer herrschenden Druck.

Bei Targetdicken, bei denen mit großer Wahrscheinlichkeit die Primärionen nur einen Stoß mit dem Targetmedium erleiden können, ist der negative

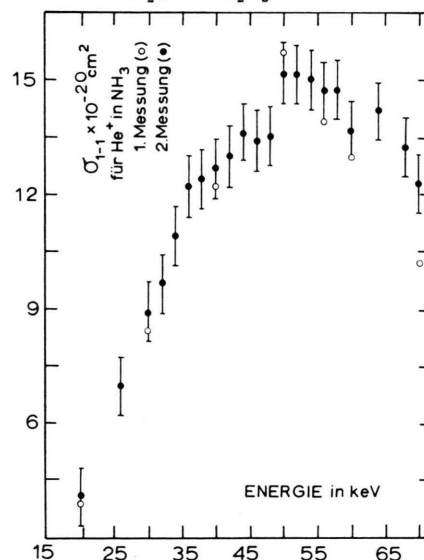


Abb. 5. Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes σ_{1-1} von der Energie der positiven Heliumionen für Ammoniak als Umladegas. Es wurden zwei getrennte Messungen gemacht.

Ionenstrom dem Druck bzw. der Targetdicke direkt proportional.

Das Verhalten der Wirkungsquerschnitte als Funktion der Energie hängt stark von der Wahl der Umladegase ab. So zeigen die Kurven für σ_{1-1} bei Verwendung der Molekül-gase Wasserstoff und Kohlendioxyd den von den Edelgasen bereits bekannten einfachen Verlauf (Abb. 2). Für alle übrigen verwendeten Targetgase bzw. -dämpfe ist der Funktionsverlauf $\sigma_{1-1}(E)$ komplizierter (Abb. 3 – 5).

Besonders große Unregelmäßigkeiten treten bei Acetylen und Ammoniak auf. Diese Unregelmäßigkeiten ließen sich für beide Umladegase in zwei getrennten Meßreihen reproduzieren. Die Meßpunkte stimmen im Rahmen der angegebenen Fehlergrenzen überein. Die im Kurvenverlauf sich zeigenden Schwankungen erweisen sich als charakteristisch und können als eine Aufeinanderfolge mehrerer Extremwerte gedeutet werden. Das MASSEYSche Adiabatenkriterium gibt gewisse Anhaltspunkte über Verlauf und Eigenarten der Funktion $\sigma(v)$.

Dieses Kriterium verknüpft die Größe des Adiabatenparameters P

$$P = a \Delta E / h v$$

mit der beim Stoß umgesetzten Energie ΔE und der Relativgeschwindigkeit v der Teilchen. Die Energie, für die die Wirkungsquerschnitte für Elektronen-anlagerung ihr Maximum erreichen, ist gegeben durch $\Delta E a / h v \sim 1$. ΔE wird als Resonanzdefekt bezeichnet, h ist die PLANCKSche Konstante und a eine Konstante von der Dimension einer Länge und von der Größenordnung der Atomdurchmesser. Sie erweist sich als charakteristisch für die Art der Stoßprozesse und ist in erster Näherung unabhängig von der Wahl der Stoßparameter.

Die Konstante a findet bei DRUKAREV⁶ ihre physikalische Deutung. Damit läßt sich für alle Umladegase, bei denen eine Berechnung des Resonanzdefektes möglich ist, angeben, bei welcher Energie die Funktion $\sigma_{1-1}(E)$ ein Maximum besitzt.

Für die untersuchten Gase und Dämpfe wurde ΔE , soweit möglich, berechnet und mit den experimentellen Daten verglichen (Tab. 1). Die Anwesenheit mehrerer Maxima folgt aus der Tatsache, daß nicht nur Teilchen im Grundzustand, sondern auch in einem angeregten Zustand aus dem Umladeprozess hervorgehen können.

Bei der Umladung von positiven Heliumionen in Edelgasen hatte sich gezeigt, daß die Höhe des Maximums von $\sigma_{1-1}(E)$ mit zunehmendem Atomgewicht und Radius steigt und mit zunehmendem Resonanzdefekt und zunehmender Ionisierungsarbeit der Targetgasatome sinkt. Bei Molekülgasen bzw. -dämpfen besteht für keinen dieser vier Faktoren eine explizite Abhängigkeit, d. h. diese Faktoren bieten keine Möglichkeit, die Höhe des Maximums im voraus abzuschätzen.

Messung der Gleichgewichtsanteile $F_{-1\infty}$

Die Gleichgewichtsanteile $F_{-1\infty}$ an negativen Heliumionen für die untersuchten Gase und Dämpfe sind in Tab. 2 zusammengestellt. Die Gestalt der Kurven $(I^-/I^+)_{\max} = F_{-1\infty}$ als Funktion der Energie der positiven Heliumionen entspricht im wesentlichen den entsprechenden Kurven für $\sigma_{1-1}(E)$. Das Maximum liegt ebenfalls etwa im gleichen Bereich wie für die entsprechenden Kurven bei σ_{1-1} . Für Luft und Wasserstoff jedoch liegt das Maximum der erreichbaren Ausbeute über 70 keV.

Umladegase und Dämpfe	$v_{\max}(\text{ber.})$ $\times 10^6 \text{ cm/sec}$	$v_{\max}(\text{gem.})$ $\times 10^6 \text{ cm/sec}$	$\Delta E(\text{ber.})$ eV	$\Delta E(\text{gem.})$ eV
CO ₂	1,71	$1,73 \pm 0,04$	$47,1 \pm 2$	$47,7 \pm 1$
H ₂	$1,65 \pm 0,05$	$1,75 \pm 0,05$	$44,7 \pm 2$	$49,5 \pm 2$
NH ₃	$1,35 \pm 0,10$	$1,45 \pm 0,02$	$37,1 \pm 3$	$40,0 \pm 1$
	—	1,55	—	42,5
	—	1,67	—	46,0
C ₂ H ₂	—	1,48	—	40,8
		1,64	—	45,2
		1,72	—	47,5
H ₂ O		1,38	—	38,1
		1,62	—	44,7
		1,77	—	49,0
Luft	—	1,31	—	36,0
		1,55	—	42,5
		1,75	—	48,2

Tab. 1. Zusammenstellung der berechneten und gemessenen Werte.

⁶ G. F. DRUKAREV, Soviet Phys.—JETP 10, 603 [1960].

kV	Xe	Kr	CO ₂	H ₂	C ₂ H ₂	NH ₃	Luft	C ₂ H ₅ OH	H ₂ O
12—15	0,32	0,55	1,60	—	—	—	—	—	—
20	2,00	0,91	2,75	0,78	2,90	3,52	0,64	—	0,77
26	—	—	5,30	1,46	5,00	—	0,98	—	—
30	6,87	2,46	7,00	2,21	7,40	7,95	1,35	6,85	2,90
36	—	—	10,10	4,04	9,50	—	2,63	—	6,16
38	—	—	—	—	9,70	10,05	—	8,73	—
40	10,72	4,37	11,10	4,72	11,00	9,40	3,45	—	7,50
42	—	—	—	—	—	11,18	—	9,27	—
46	—	—	13,00	6,42	16,20	12,60	5,54	10,25	—
50	12,90	6,65	14,25	7,87	13,80	12,75	6,42	11,10	10,25
56	12,42	7,36	16,40	10,10	19,20	—	8,51	—	12,00
58	—	—	—	—	15,60	13,50	—	11,38	—
60	12,65	8,05	16,75	11,30	15,60	13,35	9,17	—	12,30
62	—	—	14,80	—	16,60	13,72	—	10,90	—
64	14,30	8,20	—	13,62	—	—	9,78	—	12,97
66	—	—	20,30	15,17	14,60	13,55	10,68	11,68	—
70	12,70	8,97	11,20	14,50	14,00	13,34	—	11,47	12,90
72	—	—	16,00	15,08	—	—	—	—	—

Tab. 2. Gleichgewichtsanteile $F_{-1\infty}$ für He⁺-Strahl in Gasen und Dämpfen. * Alle Werte sind mit 10^{-5} zu multiplizieren.

Für Wasserstoff wurde $F_{-1\infty}$ bis 200 keV bereits von JORGENSEN gemessen³. Danach liegt das Maximum für H₂ zwischen 125 und 150 keV. Soweit die von JORGENSEN gemessenen Werte in den in dieser Arbeit untersuchten Energiebereich fallen, stimmen beide Werte gut überein. Für CO₂ als Umladegas wurde mit 0,2 ‰ die höchste Ausbeute an negativen Ionen erzielt.

Bei der Verwendung von Edelgasen als Targetmedien konnte der Maximalwert des Wirkungsquerschnittes σ_{1-1} als Maß für die zu erwartende

Ausbeute verwandt werden. Eine entsprechende Aussage für Molekulgase ist jedoch nicht möglich. Tab. 3 zeigt den Vergleich von maximalem Wirkungsquerschnitt und maximalem Umladegleichgewicht für die in dieser Arbeit verwendeten Targetgase und -dämpfe.

Fehler

Die in die Messungen eingegangenen relativen Fehler liegen, sofern nicht anders angegeben, bei etwa $\pm 15\%$. Die möglichen systematischen Fehler werden auf ca. $\pm 40\%$ geschätzt.

Target	Xe	Kr	C ₂ H ₆ O	C ₂ H ₂	Luft	H ₂ O	H ₂	NH ₃	CO ₂
$\sigma_{1-1} \cdot 10^{-19} \text{ cm}^2$	4,52	1,8	0,57	0,80	1,23	1,49	1,54	1,57	2,20
$F_{-1\infty 0/00}$	0,12	0,08	0,11	0,19	0,11	0,13	0,15	0,14	0,20

Tab. 3.