

$A < 0$ der umgekehrte. Während im Falle der linearen Gleichung $\gamma^v c_{1v} = \alpha c$, die zu (3) mit $A=0$ führt, F und G in einem Bereich $0 < s < s_0$ ihr Vorzeichen nicht mehr wechseln, müssen sie also gemäß der nichtlinearen (1) auch bei $s \rightarrow 0$ unendlich oft um $F=0$ und $G=0$ oszillieren.

Diese für seine Theorie wesentliche Tatsache wurde schon von HEISENBERG¹ erkannt. Hier folgte sie auf etwas einfacherem Wege über dieselben strengen Gln. (6), wie die Näherung (7), die man üblicherweise aus der asymptotischen Entwicklung der Zylinderfunktionen gewinnt.

Betrachten wir Gl. (1) nicht für $\alpha = \text{const}$, sondern mit

$$\alpha(s) = k(s) \cdot s^{\varepsilon(s)-1/2}, \quad (9)$$

so bleibt das qualitative Verhalten der asymptotischen Lösungen unverändert, falls die Funktionen k und ε für $s \rightarrow 0$ und $s \rightarrow \infty$ gegen endliche Grenzwerte streben, wobei $\varepsilon_0 + 1$, k_∞ , ε_∞ positiv sein müssen. Rechnet man dagegen auch bei $s \rightarrow \infty$ von vorn herein mit $\alpha \equiv 0$, so windet sich die Spirale in der (F, G) -Ebene gemäß der Rechnung von HEISENBERG¹ um einen von $F=G=0$ verschiedenen Punkt.

Für kritische Bemerkungen danke ich Herrn DOEBNER.

Helium- und Argon-Erzeugung in Eisentargets durch energiereiche Protonen¹

Von O. A. SCHAEFFER und J. ZÄHRINGER²

Chemistry Department, Brookhaven National Laboratory,
Upton, Long Island, New York

(Z. Naturforsch. 13 a, 346–347 [1958]; eingeg. am 10. Februar 1958)

Zur Deutung des Reaktionsmechanismus energiereicher Protonen in Atomkernen werden Ausbeutekurven verschiedener Reaktionsprodukte aufgenommen. Die erzeugten Mengen sind bei den üblichen Bestrahlungszeiten in der Größenordnung von 10^8 – 10^{10} Atomen. Die bisherige Meßmethode beschränkte sich auf den Nachweis radioaktiver Kerne, und die Erzeugungsquerschnitte stabiler Kerne wurden unter gewissen Annahmen über deren Verteilung abgeschätzt. Mit dieser Arbeit wurde der Versuch unternommen, in Eisentargets die Erzeugungsquerschnitte der Helium- und Argon-Isotope zu bestimmen, die bei der Bestrahlung mit Protonen von 0,16 bzw. 0,43 und 3 GeV Energie entstehen. Die Kenntnis der He^3/He^4 -Verhältnisse für verschiedene Energien ist für die Prüfung der Kernverdampfungstheorie und für die Berechnungen solcher Sternprozesse nach einer Monte-Carlo-Methode von Interesse. Außerdem ist die He^3 , He^4 - und T-Erzeugung in Eisentargets für die Meteoriten wichtig, da man aus dem T/ He^3 -Verhältnis etwas über die Dauer der Bestrahlung durch die kosmische Strahlung erfahren kann^{3, 4}. Mit den Erzeugungsquerschnitten von Argon kann man die Verteilungskurve für die Isotope eines Elements prüfen, die aus radiochemischen Daten gewonnen wurde. Zur Bestimmung des $\text{Cl}^{36}\text{-A}^{36}$ -Alters an Eisenmeteoriten ist die Kenntnis des direkt erzeugten A^{36} durch energiereiche Protonen erforderlich.

Die benutzten Targets bestanden aus Eisenstücken von 1 bzw. 0,3 und 12 mm Dicke und wurden mit Protonen von 0,16 bzw. 0,43 und 3,0 GeV Energie in den Harvard und Chicago Synchrocyclotronen und im Brook-

haven Cosmotron bestrahlt. Das Eisen wurde zur Vermeidung von atmosphärischer Verunreinigung zuvor im Vakuum geschmolzen.

Die Kalibrierung des Protonenflusses wurde mit Aluminiumfolien, und bei der 3 GeV-Bestrahlung mit zusätzlicher Goldfolie durchgeführt. Die gegebenen Wirkungsquerschnitte sind auf die Daten der Na^{24} - und Tb^{149} -Wirkungsquerschnitte⁵ bezogen. Die Zahl der Protonen betrug $1,1 \cdot 10^{15}$, $1,2 \cdot 10^{16}$ und $2,6 \cdot 10^{13}$. Zum Austreiben der Gase wurden die Targets in einem Graphittiegel induktiv geschmolzen. Die Aufschlußapparat bestand aus einem Glas (Corning 1710), das speziell ausgesucht wurde, um das Eindringen atmosphärischen Heliums gering zu halten. Die extrahierten Gase wurden über Ca und Cu-CuO oder über Zr gereinigt. Durch einen Metallhahn wurden die Edelgase in ein Massenspektrometer eingelassen und statisch gemessen. Das Massenspektrometer ist speziell zum Nachweis kleinster Gasmengen konstruiert und bis zu 450 °C ausheizbar. Als Nachweisgerät dient ein veränderter DuMont-SP 102-Multiplier. Die gefundenen Mengen betragen 10^{-10} cm³, und der zu berücksichtigende Störgrund war in allen Fällen kleiner als 10%.

In Tab. 1 sind die He^3 - und He^4 -Erzeugungsquerschnitte und die He^3/He^4 -Verhältnisse gegeben. Das hier erhaltene $\text{He}^3/\text{He}^4/\text{T}$ -Verhältnis von 1,00:0,10:0,07 bei 430 MeV kann mit dem von MARTIN, MAYNE, THOMPSON und WARDLE⁶ mit 340 MeV Protonen gefundenen Verhältnis von 1,00 : 0,048 : 0,078 verglichen werden.

Energie	$\sigma \text{ He}^4$ mb	$\sigma \text{ He}^3$ mb	He^3/He^4
0,16 GeV	120	11	0,09
0,43	450	45	0,10
3,0	1300	240	0,18

Tab. 1. Erzeugungsquerschnitte der He^3 - und He^4 -Isotope in Eisen durch energiereiche Protonen.

¹ Durchgeführt mit Mitteln der AEC der U.S.A.

² Stipendiat der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

³ E. L. FIREMAN u. D. SCHWARZER, Geochim. Cosmochim. Acta 11, 252 [1957].

⁴ F. BEGEMANN, J. GEISS u. D. C. HESS, Phys. Rev. 107, 540 [1957].

⁵ G. FRIEDLANDER (private Mitteilung).

⁶ G. R. MARTIN, K. I. MAYNE, S. J. THOMPSON u. G. WARDLE, Phil. Mag. 45, 410 [1954].



Die beiden Arbeiten geben also sowohl für das He^4/He^3 - wie für das T/He^3 -Verhältnis verschiedene Resultate; besonders auffallend ist, daß MARTIN et al.⁶ für das letztere Verhältnisse den Wert 0,62 angeben, während wir bei allen Protonenenergien wesentlich mehr He^3 als T finden. Wir haben keine Erklärung für diese Diskrepanz, aber die Fehlergrenze unserer Resultate ist wohl kaum größer als $\pm 10\%$ anzusetzen. Wie weiter unten ausgeführt wird, sind sie auch mit Meteoritenmessungen in Übereinstimmung. In Abb. 1 sind zum Vergleich die He^3 - und T-Erzeugungsquerschnitte^{7, 8, 9} eingetragen. Bei allen Energien ist die Erzeugung von He^3 größer als die von T. Nach der Kernverdampfungstheorie¹⁰ würde man für das He^3/T -Verhältnis nur etwa 1 : 3 erwarten. Bei 3 GeV ist jedoch das in dieser Arbeit gefundene Verhältnis 2,4 : 1. Dieses Ergebnis kann so erklärt werden, daß bei der Nukleonenkaskade mehr Neutronen als Protonen den Kern verlassen und der Restkern eher He^3 als T verdampft. Die Berechnungen der T- He^3 -Alter von Eisenmeteoriten müssen nach diesen Ergebnissen um etwa den Faktor 3 verkleinert werden. Vermutlich ist auch bei den Steinmeteoriten die direkte He^3 -Erzeugung wesentlich größer als für den Meteoriten Norton County angenommen⁴.

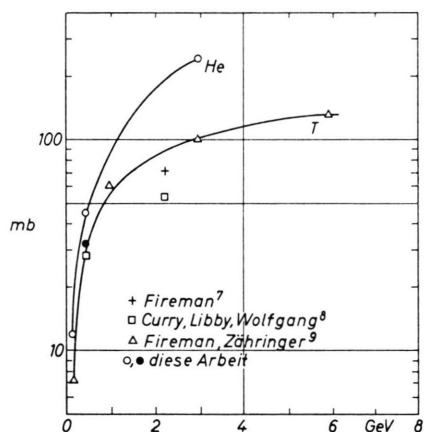


Abb. 1. He^3 - und T-Erzeugungsquerschnitte als Funktion der Protonenenergie.

In Abb. 2 sind die Erzeugungsquerschnitte von Argon für die Protonenenergie von 0,43 GeV aufgetragen. Die Verteilung kann mit einer GAUSSschen Kurve gut angenähert werden. Dies ist in Übereinstimmung mit den Resultaten von radiochemischen Forschungen über

Kernreaktionen mit energiereichen Protonen^{11, 12}. Das $\text{A}^{38}/\text{A}^{36}$ -Verhältnis ist für das $\text{Cl}^{36}\text{-A}^{36}$ -Alter von Eisenmeteoriten von Interesse. Bei 0,43 GeV beträgt dies 8,6. Dieses Verhältnis wird sich für höhere Anregungsenergien nicht wesentlich ändern. Man kann deshalb abschätzen, wieviel A^{36} in Meteoriten direkt gebildet wird. Das dort gefundene $\text{A}^{38}/\text{A}^{36}$ -Verhältnis^{13, 14} beträgt 1,7. Dies bedeutet, daß etwa viermal soviel A^{36} durch den Zerfall des Restkernes Cl^{36} und nur $1/5$ A^{36} direkt erzeugt werden.

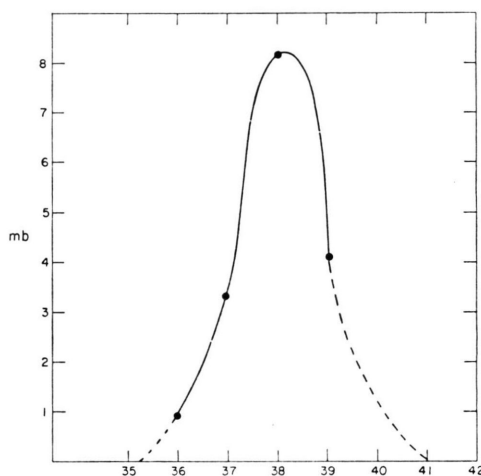


Abb. 2. Erzeugungsquerschnitte der Argonisotopen in Eisen für eine Protonenenergie von 0,43 GeV.

Schließlich können die in dieser Arbeit bestimmten Erzeugungsquerschnitte von He^3 und A^{38} mit den in Meteoriten gefundenen Mengen verglichen werden. In Meteoriten ist das $\text{He}^3/\text{A}^{38}$ -Verhältnis^{13, 14} etwa 20. Bei einer der kosmischen Strahlung entsprechenden mittleren Energie von 3 GeV ist für He^3 der Erzeugungsquerschnitt 240 mb, für Tritium 100 mb und für A^{37} 6 mb (s. Anm.⁹). Mit dem in Abb. 2 gezeigten $\text{A}^{38}/\text{A}^{37}$ -Verhältnis findet man für A^{38} bei 3 GeV etwa 15 mb. Das $(\text{He}^3 + \text{T})/\text{A}^{38}$ -Verhältnis ist danach für ein 3 GeV-Eisentarget 23 und ist mit den Messungen an Meteoriten in Übereinstimmung. Die große He^3 -Erzeugung durch energiereiche Protonen in Eisen wird somit auch von den Meteoritenanalysen gefordert.

Eine ausführliche Darstellung wird an anderer Stelle erscheinen.

⁷ E. L. FIREMAN, Phys. Rev. **97**, 1303 [1955].

⁸ L. A. CURRIE, W. F. LIBBY u. R. L. WOLFGANG, Phys. Rev. **101**, 1557 [1956].

⁹ E. L. FIREMAN u. J. ZÄHRINGER, Phys. Rev. **107**, 1695 [1957].

¹⁰ P. MORRISON, Experimental Nuclear Physics (E. SEGRE, ed., John Wiley and Sons, New York 1953), Vol. II, S. 177.

¹¹ G. RUDSTAM, Phil. Mag. **44**, 1131 [1953].

¹² E. BELMONT u. J. M. MILLER, Phys. Rev. **95**, 1554 [1954].

¹³ W. GENTNER u. J. ZÄHRINGER, Geochim. Cosmochim. Acta **11**, 60 [1957].

¹⁴ O. A. SCHAEFFER u. J. ZÄHRINGER (Veröffentl. in Vorbereitung).