

# Die Fusionsreaktion $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$ und ihre astrophysikalische Reaktionsrate

Von der Fakultät Physik der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktors der  
Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von  
**Armin Mayer**  
geboren in Stuttgart

Hauptberichter :	Prof. Dr. U. Kneißl
Mitberichter :	Prof. Dr. U. Weiss
Tag der mündlichen Prüfung :	16. 07. 2001

Institut für Strahlenphysik der Universität Stuttgart

Berichte aus der Physik

**Armin Mayer**

**Die Fusionsreaktion  $^{16}\text{O}(\alpha, \text{g})^{20}\text{Ne}$  und  
ihre astrophysikalische Reaktionsrate**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag  
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Mayer, Armin:*

Die Fusionsreaktion  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  und ihre astrophysikalische Reaktionsrate/

Armin Mayer. Aachen : Shaker, 2001

(Berichte aus der Physik)

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2001

ISBN3-8265-9447-9

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-9447-9

ISSN 0945-0963

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>3</b>
<b>1 Motivation für die Untersuchung der <math>^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}</math>-Reaktion</b>	<b>5</b>
1.1 Astrophysikalische Voraussetzungen . . . . .	5
1.2 Die $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$ -Reaktion . . . . .	8
<b>2 Theorie</b>	<b>13</b>
2.1 Einführung . . . . .	13
2.2 U-Matrix-Theorie . . . . .	14
2.3 R-Matrix-Theorie . . . . .	16
2.4 Verknüpfung von U-Matrix und R-Matrix mit dem Wirkungsquerschnitt . . . . .	19
2.5 Einbindung des nichtresonanten direkten Anteils . . . . .	23
2.6 Ermittlung der Reaktionsraten . . . . .	23
<b>3 Das Experiment</b>	<b>27</b>
3.1 Beschleuniger . . . . .	28
3.2 Das Gastarget RHINOCEROS . . . . .	29
3.2.1 Das Pumpensystem des Gastargets . . . . .	29
3.2.2 Die Meßkammer OKTOPUS . . . . .	31
3.3 Detektoren . . . . .	34
3.3.1 $\gamma$ -Detektoren mit aktiver Abschirmung . . . . .	34
3.3.2 Teilchenzähler . . . . .	39
3.4 Meßelektronik . . . . .	41
3.5 Experimentelle Durchführung . . . . .	44
<b>4 Datenauswertung</b>	<b>47</b>
4.1 $\gamma$ -Spektren . . . . .	47
4.1.1 Untergrund und $\gamma$ -Energieeichung . . . . .	47
4.1.2 $\gamma$ -Spektren aus der Messung der $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$ -Reaktion . . . . .	51
4.2 Elastische Streuung . . . . .	65
4.3 Berechnung der Reaktionsausbeutekurve . . . . .	69
4.3.1 Targetdichte entlang der Strahlachse . . . . .	71
4.3.2 Energieverlust der $\alpha$ -Teilchen im Target . . . . .	71
4.3.3 Energieverschmierung des Helium-Strahls . . . . .	72
4.4 Das Simulationsprogramm GEANT und seine physikalischen Vorgaben . . . . .	73
4.4.1 Simulationsprogramm GEANT . . . . .	73
4.4.2 Nachweiswahrscheinlichkeit der HPGe-Detektoren . . . . .	75

---

4.4.3	Die Winkelverteilung der $\gamma$ -Strahlung . . . . .	76
4.5	Die Reaktionsausbeutekurven . . . . .	78
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>81</b>
5.1	Verzweigungsverhältnisse . . . . .	81
5.2	Resonanzdaten und Wirkungsquerschnitt . . . . .	84
5.3	Bestimmung des nichtresonanten Einfangs. . . . .	88
5.4	Endergebnis für die S-Faktor-Kurve und ihre Extrapolation. . . . .	93
5.5	Reaktionsrate der $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$ -Reaktion . . . . .	95
5.6	Tabelle und analytische Formel für die Reaktionsrate . . . . .	97
5.7	Schlußfolgerung und Ausblick . . . . .	100
	<b>Anhang</b>	<b>103</b>
A	Die wichtigsten $\gamma$ -Linien aus Störreaktionen . . . . .	103
B	Verwendete Konstanten und wichtige Formeln . . . . .	104
C	Pumpschema des Gastargets . . . . .	105
	<b>Literatur</b>	<b>107</b>
	<b>Englische Zusammenfassung (Abstract)</b>	<b>113</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>125</b>
	<b>Publikationen</b>	<b>127</b>

# Zusammenfassung

Die  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$ -Reaktion verläuft sehr langsam und steht am Ende der Helium-Brennphase der Sterne. Da ihre Reaktionsrate das Häufigkeitsverhältnis von Kohlenstoff zu Sauerstoff mitbestimmt, zählt sie zu den Schlüsselreaktionen der Nukleosynthese. Um die Reaktionsrate bei etwa  $2 \cdot 10^8 \text{K}$  (Die Temperatur entspricht einer Gamow-Peak-Energie von  $300 \text{keV}$ ) bestimmen zu können, benötigt man die genaue Kenntnis aller Resonanzen und ihrer Kenngrößen, sowie eine genaue Kenntnis des nichtresonanten Anteils am Wirkungsquerschnitt.

In dieser Arbeit konnten zum ersten Mal durch Einsatz empfindlicher  $\gamma$ -Detektoren sowohl die Resonanzdaten wie auch der nichtresonante Anteil für den Übergang in den ersten angeregten Zustand von  $^{20}\text{Ne}$  genauer gemessen werden. Für den Übergang in den Grundzustand konnten für den nichtresonanten Anteil relativ enge obere Grenzwerte angegeben werden. Der Meßpunkt mit dem niedrigsten Wirkungsquerschnitt lag bei  $70 \text{Pikobarn}$  und die Grenzempfindlichkeit für die Wirkungsquerschnittsmessung wurde mit  $10 \text{Pikobarn}$  abgeschätzt.

Mit Hilfe einer R-Matrix-Analyse wurden die verschiedenen Anteile der Anregungskurve separiert. Es zeigte sich, daß im astrophysikalischen Temperaturbereich nicht mehr, wie bisher angenommen, der nichtresonante Einfang dominiert, sondern daß der stärkste Beitrag von den Ausläufern der  $1^-$ -Resonanz ( $E_{\text{cm}} = 1.054 \text{MeV}$ ) herrührt, und der nichtresonante Einfang in den ersten angeregten Zustand nur zu  $20\%$  beiträgt. Insgesamt erhöht sich die Reaktionsrate gegenüber dem Wert aus der Caltech-Kompilation [Cau88] etwa um den Faktor  $5$  und gegenüber der NACRE-Kompilation [Ang99] um einen Faktor  $2.5$  (s. Kap.: 5.5).

Die Messungen wurden an der  $21^\circ$ - bzw. der  $90^\circ$ -Strahllinie am Stuttgarter DYNAMITRON mit dem wandlosen und rezirkulierenden Gastargetsystem RHINOCEROS (s. Kap.: 3.2.1) durchgeführt, das für den Betrieb mit Sauerstoff vorbereitet war. Eine optimierte Targetkammer (s. Kap.: 3.2.2) wurde für diesen Zweck entwickelt und gebaut.

Als Detektoren wurden zwei großvolumige HPGe-Detektoren (s. Kap.: 3.3.1) mit einer relativen Nachweiswahrscheinlichkeit von  $100\%$  verwendet. Der Einsatz von BGO-Detektoren, die die HPGe-Detektoren ringförmig umgeben, erlaubte eine Unterdrückung des natürlichen Untergrundes und des Comptonuntergrundes je nach Energiebereich um einen Faktor  $3$  bis  $40$ , was einer starken Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses entspricht, also die Signatur dieser Reaktion wesentlich besser erkennen ließ.

Das ermöglichte es, erstmals eine durchgehende Yieldkurve im Energiebereich  $E_\alpha = 1.3 - 3.5 \text{MeV}$  für den Übergang  $R \rightarrow 1$  zu messen und für den nichtresonanten Anteil des Überganges  $R \rightarrow 0$  im gesamten gemessenen Energiebereich eine obere Grenze anzu-

---

geben. Für sechs Resonanzen im Energiebereich  $E_\alpha = 1.0 - 3.5$  MeV wurden die Resonanzparameter mit Hilfe eines aufwendigen Entfaltungsverfahrens (s. Kap.: 4) bestimmt. Aus dem Bereich zwischen den Resonanzen konnte unter Berücksichtigung von Interferenzen der nichtresonante Einfang zum ersten angeregten Zustand bestimmt werden. Dazu war es nötig, den Wirkungsquerschnitt mit einer R-Matrix-Rechnung unter der Annahme einer Interferenz zwischen der breiten Resonanz bei  $E_\alpha = 2.49$  MeV und dem nichtresonanten Einfang zu beschreiben. Für die Resonanzparameter ergab sich eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen einer früheren Messung von Knee [Kne94] sowie den Daten von Hahn [Hah87]. Die oberen Grenzwerte von Knee konnten für  $R \rightarrow 0$  korrigiert und für  $R \rightarrow 1$  durch Meßwerte ersetzt werden.

Des weiteren mußte zur Bestimmung des absoluten Wirkungsquerschnittes die Abweichung der elastischen Streuung von der Rutherford-Streuung unter den Streuwinkeln  $120^\circ$  und  $90^\circ$  gemessen werden.

Mit Hilfe der R-Matrix-Rechnung konnte der Wirkungsquerschnitt von 3.5 MeV bis unterhalb des astrophysikalischen relevanten Energiebereichs bei 300 keV beschrieben und extrapoliert und aus der Extrapolation mittels numerischer Integration die astrophysikalische Reaktionsrate bestimmt werden.

Es ergab sich folgender Wert für den üblicherweise angegebenen S-Faktor bei 300 keV :

$$S_{300 \text{ keV}} = (4.2 \pm 2.1) \text{ MeV barn}$$

Der bisherige Kompilationswert wurde von der Caltech-Compilation [Cau88] mit 0.8 MeV barn und von der NACRE-Compilation [Ang99] mit 2.0 MeV barn angegeben. Es wurden von beiden Autoren keine Fehlergrenzen angegeben, so daß kein korrekter Vergleich durchgeführt werden konnte. Bei den beiden Kompilationen [Cau88, Ang99] wurde der nichtresonante Einfang als dominanter Prozeß bei  $E_{cm} = 300$  keV angenommen. Die Breite der untersten  $1^-$ -Resonanz war noch nicht bekannt und wurde nicht berücksichtigt. Sie ist aber für den jetzt ermittelten höheren Wert des S-Faktors bei 300 keV verantwortlich.