

Untersuchung des Spallationsprozesses mit 1,2 und 1,8 GeV Protonen

im Fachbereich Physik
der Freien Universität Berlin
eingereichte Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades

vorgelegt von
Michael Enke
aus Rostock
– Januar 2000 –

1. Gutachter: Prof. Dr. W. von Oertzen

2. Gutachter: Prof. Dr. T.-Ch. Meng

Tag der Promotion: 15. Februar 2000

Kurzfassung

Für die Untersuchung des Spallationsprozesses, der Reaktion von hochenergetischen Protonen mit Atomkernen, wurden umfangreiche Messungen im Rahmen einer internationalen Kollaboration am Protonenbeschleuniger COSY im Forschungszentrum Jülich durchgeführt. Es galt vor allem, Wirkungsquerschnitte zu bestimmen und mit theoretischen Modellen zu vergleichen. Gemessen wurden Reaktionsquerschnitte und Produktionsquerschnitte von Neutronen, Wasserstoff und Helium bei Reaktionen von 1,2 und 1,8 GeV Protonen mit Fe, Ni, Ag, Ta, W, Au, Pb, U. Die Ergebnisse wurden verglichen mit Intranuklearen Kaskadenmodellen, kombiniert mit Verdampfungsrechnungen für hochangeregte Kerne. Dabei wurden wesentliche Unterschiede zwischen verschiedenen Modellen und dem Experiment festgestellt. Die Diskrepanzen konnten auf spezifische Unzulänglichkeiten der Codes zurückgeführt werden, was insbesondere deshalb von großer Bedeutung ist, da diese Codes bisher zur Berechnung und Spezifizierung von Spallationsquellen benutzt wurden. Die mit den beiden 4π -Detektoren für Neutronen und geladene Teilchen gemessenen Daten ermöglichten es darüber hinaus, einen systematischen Vergleich der für den zeitlichen Ablauf einer Spallationsreaktion charakteristischen Observablen mit Modellrechnungen durchzuführen: inelastische Stoßwahrscheinlichkeit, Anregungsenergieverteilung, Vor- und Gleichgewichtsemission und Verdampfungswirkungsquerschnitte.

Eine Publikation mit dem Titel *Evolution of a spallation reaction: experiment and Monte Carlo simulation* [Enk99] ist in Nuclear Physics A veröffentlicht worden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Neutronen aus Spallationsreaktionen	7
1.1.1	Stand der Technik	10
1.2	Die Europäische Spallationsquelle	11
1.3	Motivation	14
2	Experimente, Methode und Datenanalyse	17
2.1	Protonenquelle COSY	18
2.2	Aufbau der Experimente	20
2.3	Targets	23
2.4	Der 4π -Neutronendetektor (BNB)	25
2.4.1	Nachweiswahrscheinlichkeit des BNB	29
2.4.2	Verifizierung der Funktionalität	29
2.5	Der 4π -Siliziumdetektor (BSiB)	30
2.5.1	Teilchenidentifikation	32
2.5.2	Massenbestimmung mit dem Si-Ball	35
2.6	Einsatz von Teilchenteleskopen	37
2.7	Elektronik und Datenerfassung	37
3	Theoretische Modelle	41
3.1	Die Intranukleare Kaskade	42
3.1.1	Der Cugnoncode	44
3.2	Das Statistische Modell	45
4	Resultate und Diskussion	48
4.1	Datenkorrekturen und Fehlerdiskussion	48
4.1.1	Korrekturen der Protonenmessung	49
4.1.2	Genauigkeit der Bestimmung der Targetdicke	50
4.1.3	Korrektur von N_{reak}	51
4.1.4	Korrektur von $N_{part,i}$	51
4.2	Experimentelle Wirkungsquerschnitte	59

4.2.1	Ergebnisse der Teilchenteleskope	60
4.3	Anregungsenergieverteilung	61
4.4	Energie- und Winkelspektren	65
4.5	Teilchenmultiplizitäten	69
4.6	σ_x : Vergleich Rechnung – Messung	70
5	Zusammenfassung	81
A	Elektronische Experimentlogik	83
	Literaturverzeichnis	87
	Publikation und Konferenzbeiträge	96

Kapitel 5

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die Ermittlung von Produktionswirkungsquerschnitten von leichten Teilchen, insbesondere Alphateilchen, die in Spallationsreaktionen mit hochenergetischen Protonen erzeugt werden. Diese Wirkungsquerschnitte werden für die Planung und Konstruktion intensiver Spallationsneutronenquellen, insbesondere der Europäischen Spallationsquelle, benötigt.

Die Experimente wurden am Protonenbeschleuniger COSY mit Protonenenergien von 1,2 und 1,8 GeV durchgeführt. Es wurden Reaktionen an den Targetmaterialien Fe, Ni, Ag, Ta, W, Au, Pb und U mit zwei 4π -Detektoren untersucht, einem Detektor zum Nachweis und Zählung von Neutronen (Berliner Neutronenball) sowie einem Detektor zur Identifizierung und Zählung geladener Teilchen (Berliner Siliziumball). Außerdem wurden totale Reaktionswirkungsquerschnitte sowie Produktionswirkungsquerschnitte von Neutronen, Wasserstoff und Helium gemessen, desweiteren Winkel- und Energieverteilungen geladener Teilchen. Aufgrund der Abdeckung fast des gesamten Raumwinkels und der hohen Effizienz von ca. 85% beider Detektoren und damit des Nachweises von 85% aller Reaktionsprodukte ist es möglich, aus der gemessenen Multiplizität von verdampften leichten Teilchen (n, H, He) mit Hilfe von Modellrechnungen die Anregungsenergieverteilung anzugeben.

Es existieren theoretische Reaktions- und Transportmodelle, die eine Berechnung dieser Wirkungsquerschnitte und anderer Reaktionsparameter in Spallationsreaktionen gestatten und die (insbesondere HERMES und LAHET) intensiv für die bisherige Planung der ESS benutzt wurden.

Mit dem HERMES-, dem LAHET- sowie dem Cugnon- und GEMINI-Code wurden Rechnungen durchgeführt und diese den experimentell ermittelten Ergebnissen gegenübergestellt. Dabei wurden größere Abweichungen zwischen den Rechenergebnissen und den experimentellen Werten beobachtet und der Versuch unternommen, die Ursache dieser Abweichung zu deuten. So konnte gezeigt werden, daß die Coulombbarriere in den Rechencodes HER-

MES und LAHET unterschätzt, sowie die thermische Anregungsenergie, die dem Kern während der prompten Intranuklearen Kaskade übertragen wird, überschätzt wird. Die totalen Reaktionwirkungsquerschnitte wurden durch alle drei Codes gut wiedergegeben, die Produktionswirkungsquerschnitte für H und He von den Codes HERMES und LAHET für schwere Kerne weit überschätzt. Für Eisen werden die Produktionswirkungsquerschnitte von allen drei Rechencodes innerhalb von 5 bis 10% richtig berechnet.

Die Ergebnisse dieser Arbeit können zur Verbesserung der Rechencodes und für die Dimensionierung der Targetstation wie z.B. des Fensters zwischen Beschleuniger und Targetbereich der ESS¹ einen wichtigen Beitrag leisten.

¹ Es bleibt zu hoffen, daß ein Beschluß für den Bau der Europäischen Spallationsquelle gefaßt wird, nicht zuletzt damit weitere Forschungstätigkeit die Realisierbarkeit des Thoriumreaktors nachweisen und damit eine ökologisch vertretbare Alternative zur Uranbasierten Energiefreisetzung (d.h. Freisetzung langlebiger radioaktiver Nuklide) aufzeigen kann.

**In direktem Zusammenhang mit dieser Arbeit entstanden
folgende Publikation und Konferenzbeiträge:**

Publikation:

- M. Enke**, D. Filges, J. Galin, F. Goldenbaum, C.-M. Herbach, D. Hilscher, U. Jahnke, A. Letourneau, B. Lott, R.-D. Neef, K. Nünighoff, N. Paul, A. Péghaire, L. Pienkowski, H. Schaal, O. Schapiro, G. Sterzenbach und A. Tietze: *Evolution of a spallation reaction: experiment and Monte Carlo simulation*. Nucl. Phys. **A 657** (1999), 317–339.

Konferenzbeiträge:

- M. Enke**, D. Filges, J. Galin, F. Goldenbaum, D. Hilscher, U. Jahnke, B. Lott, M. Morjean, R.-D. Neef, N. Paul, A. Péghaire, L. Pienkowski und H. Schaal: *Investigation of Spallation Reactions with 1.2 GeV Protons*. Nuclear Physics Spring Meeting Bochum (Germany), 16.–20.3.1998, Verhandl. DPG (VI) **33** (1998), 467.
- F. Goldenbaum**, M. Enke, D. Filges, J. Galin, D. Hilscher, U. Jahnke, B. Lott, M. Morjean, R.-D. Neef, N. Paul, A. Péghaire, L. Pienkowski und H. Schaal: *Experimente in der Spallationsphysik mit dünnen und dicken Targets*.
16. CANU–Arbeitstreffen (COSY–Arbeitsgemeinschaft Nordrhein–Westfälischer Universitäten), 21. und 22.12.1998, Physikzentrum Bad Honnef.
- F. Goldenbaum** – for the NESSI collaboration – *Validation of Spallation Physics Experiments up to 2.5 GeV Incident Proton Energy — Neutron and Charged Particles Production on Spallation Materials*.
Third International Workshop on Spallation Materials Technology, Santa Fe, New Mexico, April 29. – May 4. 1999

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Bereich Festkörperphysik des Hahn-Meitner-Instituts Berlin unter Leitung von Prof. Dr. W. von Oertzen und der Betreuung von Dr. D. Hilscher und Dr. U. Jahnke angefertigt.

Herrn Prof. Dr. W. von Oertzen bin ich insbesondere für seine bereitwillige Übernahme meiner Betreuung verbunden.

Besonderer Dank gilt meinen beiden Betreuern Herrn Dr. D. Hilscher und Herrn Dr. U. Jahnke für ihre fachliche Unterstützung, ihre Anregungen und ihr stets offenes Ohr. Ihre ständige Gesprächsbereitschaft hat maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Ich bin ihnen für jede Diskussion und für die konstruktive Kritik während der vorläufigen Versionen dieser Arbeit äußerst dankbar.

Mein Dank gilt Herrn Professor J. Cugnon, der die aktuellste Version seines INC-Codes zur Verfügung stellte, ebenso Herrn Dr. W. Bohne, der durch das Konzept und die technische Realisierung des eingesetzten Berliner Siliziumballes das Experiment in dieser Weise möglich gemacht hat sowie den Herren Dr. P. Ziem und B. Drescher, die das notwendige schnelle Datenaufnahmesystem entwickelten.

Mein Dank gebührt allen Kollegen der NESSI-Kollaboration, die mich als Gruppenneuling freundlich aufgenommen haben und die durch ihr Engagement und so manche Nachtschicht erst die Messungen am COSY ermöglicht haben. Insbesondere danke ich J. Galin, B. Lott, A. Péghaire, A. Letourneau (GANIL-Caen), D. Filges, R.-D. Neef, H. Schaal, N. Paul (IKP im FZ-Jülich).

Besonderer Dank gebührt Herrn Dr. L. Pienkowski und Herrn Dr. F. Goldenbaum. Beide standen mir stets bei der Anwendung und Verknüpfung großer Programmpakete hilfreich zur Seite. Das verwendete Datenanalyseprogramm basiert auf ihren Entwicklungen.

Ebenso dankbar bin ich Herrn Dr. C.-M. Herbach und Frau Dr. O. Schapiro, die im Rahmen der Modellrechnungen mit immer neuen und guten Ideen wesentlich zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Für ihre Hilfsbereitschaft danke ich all denen am HMI, am IKP und in meinem persönlichen Umfeld, die auf ihre Weise am Zustandekommen dieser Arbeit beteiligt waren.

Prof. Dr. T.-Ch. Meng danke ich für die Übernahme der zeitaufwendigen Begutachtung dieser Arbeit.

Mein größter Dank gilt jedoch meiner Martina, ohne deren geduldiges Zuhören, langwährendes Verständnis und aufopferungsvolle Unterstützung diese Arbeit undenkbar gewesen wäre.

Michael Enke

Curriculum vitae

<i>geboren</i>	27. April 1968 in Rostock
<i>Familienstand</i>	ledig
<i>1974 – 1984</i>	Besuch der Luxemburg–Oberschule in Rostock
<i>1984 – 1986</i>	Berufsausbildung bei der Deutschen Reichsbahn
<i>1986 – 1988</i>	Stellwerksmeister und Fahrdienstleiter in Warnemünde
<i>1986 – 1988</i>	Besuch der Volkshochschule Rostock
<i>Juli 1988</i>	Abitur
<i>1988 – 1989</i>	Verkürzter Grundwehrdienst
<i>1989 – 1994</i>	Studium der Physik (Diplom) an der Universität Rostock
<i>Oktober 1994</i>	Diplom an der Universität Rostock Diplomarbeit am Institut für Atmosphärenphysik in Kühlungsborn; Thema: <i>Berechnung, Aufbau und Erprobung einer aktiven Laserstrahlführung</i>
<i>1994 – 1996</i>	Studium der Mathematik und Physik (Lehramt), Universität Rostock
<i>Juni 1996</i>	Erstes Staatsexamen für das Lehramt an Gymnasien Ma/Ph
<i>Aug. – Nov. 1996</i>	PC–Techniker bei der SERKO–GmbH in Berlin
<i>Nov. 96 – Juni 99</i>	Wiss. Mitarbeiter am Hahn–Meitner–Institut Berlin GmbH
<i>seit Juli 1999</i>	Siemens AG Berlin