

# **Die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Suche nach kosmischen Neutrino-Punktquellen mit dem AMANDA-Neutrino-Teleskop**

Dissertation  
zur Erlangung des Grades  
„Doktor der Naturwissenschaften“  
am Fachbereich Physik der  
Johannes-Gutenberg-Universität in Mainz

**Till Neuhöffer**  
geboren in Heidelberg

Mainz 2003

1. Gutachter: Prof. Dr. L. Köpke  
2. Gutachter: Prof. Dr. E. Otten

Tag der Einreichung: 31. Oktober 2003  
Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 2003

Berichte aus der Physik

**Till Neunhöffer**

**Die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur  
Suche nach kosmischen Neutrino-Punktquellen  
mit dem AMANDA-Neutrino-Teleskop**

D 77 (Diss. Universität Mainz)

Shaker Verlag  
Aachen 2004

**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Mainz, Univ., Diss., 2003

Copyright Shaker Verlag 2004

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2474-2

ISSN 0945-0963

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 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)

Meinen Eltern



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>viii</b>
<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>I Die physikalischen Grundlagen</b>	<b>4</b>
<b>1 Neutrinophysik</b>	<b>5</b>
1.1 Das Neutrino im Standardmodell der Teilchenphysik . . . . .	5
1.2 Die elektroschwache Vereinheitlichung . . . . .	6
1.3 Die Wechselwirkungen des Neutrinos . . . . .	11
1.4 Die Propagation und Oszillation des Neutrinos . . . . .	18
1.5 Das Neutrino als kosmischer Informationsträger . . . . .	20
<b>2 Astrophysik</b>	<b>23</b>
2.1 Die kosmische Strahlung . . . . .	23
2.2 Atmosphärische Myonen und Neutrinos . . . . .	27
2.3 Die Fermi-Beschleunigung . . . . .	31
2.4 Potenzielle kosmische Quellen hochenergetischer Neutrinos . . . . .	34
<b>3 Detektorphysik</b>	<b>45</b>
3.1 Das Detektionsprinzip eines Neutrinoteleskopes . . . . .	45
3.2 Das Verhalten hochenergetischer Myonen in Materie . . . . .	49
3.3 Das Verhalten von Licht in natürlichen optischen Medien . . . . .	51
3.4 Parameter zur Beschreibung der Detektorqualität . . . . .	54
<b>II Das AMANDA-Neutrino teleskop</b>	<b>61</b>
<b>4 Der AMANDA-Detektor und die Kalibrierung</b>	<b>62</b>
4.1 Die Komponenten des AMANDA-Detektors . . . . .	62
4.2 Das Eis am Südpol . . . . .	66
4.3 Die Kalibrierung . . . . .	67
4.4 Die Simulationskette . . . . .	69

<b>5</b>	<b>Von den Rohdaten zu den Neutrino-Ereignissen</b>	<b>74</b>
5.1	Die verschiedenen Untergrundklassen . . . . .	75
5.2	Die Spurrekonstruktion: Grundlagen und analytische Algorithmen . . . . .	76
5.3	Die Spurrekonstruktion mit Maximum-Likelihood-Verfahren . . . . .	82
5.4	Die Qualitätsvariablen zur Untergrund-Unterdrückung . . . . .	89
5.5	Die offizielle Selektion der AMANDA-Kollaboration für die Punktquellensuche 2000 . . . . .	93
<b>6</b>	<b>Die Winkelauflösung von AMANDA</b>	<b>99</b>
6.1	Die Schätzung der Auflösung in zwei Winkeln pro Ereignis . . . . .	100
6.2	Die Güte der Schätzung . . . . .	105
6.3	Die Auflösung im räumlichen Winkel . . . . .	115
6.4	Die Eigenschaften der Auflösung als Qualitätsparameter . . . . .	122
<b>III</b>	<b>Die Suche nach Neutrino-Punktquellen</b>	<b>125</b>
<b>7</b>	<b>Grundsätzliches zur Suche nach Neutrino-Punktquellen</b>	<b>126</b>
7.1	Definition der Signalthypothese . . . . .	127
7.2	Die prinzipielle Suchstrategie . . . . .	128
7.3	Statistische Observable und Konfidenzplots . . . . .	130
7.4	Die Qualität eines Verfahrens zur Punktquellensuche . . . . .	133
7.5	Das „alte“ Verfahren: die <i>gebinnete Suche</i> . . . . .	134
7.6	Die Notwendigkeit eines neuen Verfahrens . . . . .	135
<b>8</b>	<b>Die ungebinnte Maximum-Likelihood-Methode</b>	<b>137</b>
8.1	Die Punktquellensuche in einer Dimension . . . . .	138
8.2	Die Observablen der Methode . . . . .	140
8.3	Die Adaptation der Idee auf das AMANDA-Neutrinooteleskop . . . . .	143
8.4	Die Schätzer für die Signifikanz des Nachweises und für Fluss und Ort einer Quelle . . . . .	150
8.5	Die Konstruktion der Konfidenzplots, die Sensitivität und das Entdeckungspotenzial . . . . .	159
8.6	Die Systematik der Methode . . . . .	164
8.7	Ansätze zur Erweiterung und Verfeinerung der Methode . . . . .	166
<b>9</b>	<b>Die Punktquellensuche am gesamten Himmel</b>	<b>169</b>
9.1	Ein Konfidenzplot für die Suche am gesamten Nordhimmel . . . . .	171
9.2	Die Eigenschaften der Signifikanzverteilung am Nordhimmel . . . . .	174
9.3	Die Suche am gesamten Nordhimmel . . . . .	176
<b>10</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>179</b>
10.1	Vorbemerkungen zu den Ergebnissen . . . . .	179
10.2	Die Resultate der Suche an ausgewählten Objekten . . . . .	181
10.3	Die Resultate der Suche am gesamten Nordhimmel . . . . .	185
10.4	Diskussion der Resultate . . . . .	193
	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>195</b>

<b>IV</b>	<b>Anhänge</b>	<b>198</b>
<b>A</b>	<b>Der Zusammenhang der Energiespektren von Neutrino- und Myonflüssen</b>	<b>199</b>
<b>B</b>	<b>Verwendete Koordinatensysteme</b>	<b>201</b>
	B.1 Detektorkoordinaten . . . . .	201
	B.2 Deklination und Rektaszension . . . . .	202
	B.3 Lokale Koordinaten auf der Kugeloberfläche . . . . .	203
	B.4 Die Hammer-Aithoff-Projektion . . . . .	204
<b>C</b>	<b>Halbanalytische Faltung der Pandelfunktion</b>	<b>207</b>
<b>D</b>	<b>Die Herleitung der Poisson-gesättigten Amplitude</b>	<b>209</b>
<b>E</b>	<b>Das Konzept und die Methoden der <i>Maximum Likelihood</i></b>	<b>211</b>
	E.1 Die Grundlagen der Maximum Likelihood . . . . .	211
	E.2 Parabeldarstellungen . . . . .	215
	E.3 Analytische Anpassung mit der Methode der kleinsten Quadrate . . . . .	216
<b>F</b>	<b>Mathematische Eigenschaften der Punktquellen-Likelihood-Funktion</b>	<b>218</b>
	F.1 Definitionen und Begriffe . . . . .	218
	F.2 Nullstellen und Extrema . . . . .	219
	F.3 Die ersten und zweiten Ableitungen . . . . .	220
	F.4 Das schnelle Auffinden des Extremums . . . . .	220
	F.5 Mathematische Eigenschaften der Funktion zur Beschreibung des Untergrundes . . . . .	221
<b>G</b>	<b>Die Punktquellensuche am gesamten Himmel</b>	<b>223</b>
	G.1 Der Ausgangspunkt der Betrachtungen . . . . .	223
	G.2 Eine endliche Zahl an Suchstellen . . . . .	224
	G.3 Die Suche entlang einer Linie fester Deklination . . . . .	228
<b>H</b>	<b>Himmelsatlas der Ereignisse</b>	<b>230</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>232</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>235</b>