

# Astrophysik mit Neutrinos

## Teil 2: Spektroskopie der solaren Neutrinos

*Nachdem mit der Entdeckung der Neutrino-Oszillationen das Rätsel der fehlenden solaren Neutrinos geklärt wurde, dienen die Neutrino-Experimente nun der Erforschung der Sonne. Die spektrale Auflösung moderner Detektoren ermöglicht immer detailliertere Rückschlüsse auf die im Sonneninneren herrschenden Bedingungen.*

Von Lothar Oberauer und Michael Wurm

### IN KÜRZE

- Mit dem experimentellen Nachweis der Neutrino-Oszillationen auf ihrem Weg von der Sonne zur Erde wurde das langjährige Rätsel der fehlenden solaren Neutrinos endlich gelöst.
- Damit lassen sich die nun besser verstandenen Neutrinos – wie ursprünglich beabsichtigt – als Sonden zur detaillierten Untersuchung der Prozesse im innersten Kern der Sonne nutzen.
- Mit dem Anlaufen der Neutrino-Experimente der nächsten Generation wird sich die Neutrino-Astrophysik neben der Sonne auch dem Studium der Sterne und ihrer Entwicklung sowie zahlreichen weiteren Quellen, etwa den Supernovae in unserer Galaxis oder sogar im frühen Universum, widmen können.

Im ersten Teil dieses Beitrags haben wir das für lange Zeit ungelöste Rätsel der solaren Neutrinos dargestellt und gezeigt, wie alle experimentellen Ergebnisse eine astrophysikalische, also eine auf die Fusionsprozesse im Innersten der Sonne bezogene Lösung ausschließen (siehe SuW 2/2010, S. 30). Demnach ist des Neutrino-Rätsels Lösung in den intrinsischen Eigenschaften der Neutrinos selbst zu suchen, und mit diesen wollen wir uns nun befassen.

### Neutrino-Oszillationen

Wir kennen in der Natur drei verschiedene Arten von Neutrinos: das Elektron-Neutrino  $\nu_e$ , das Myon-Neutrino  $\nu_\mu$  und das Tauon-Neutrino  $\nu_\tau$ . Sie sind jeweils mit den entsprechenden geladenen Leptonen  $e^-$ ,  $\mu^-$  und  $\tau^-$  assoziiert. Die Kernreaktionen in der Sonne produzieren nur Elektron-Neutrinos, und die bisher durchgeführten radiochemischen Experimente sind ausschließlich für Neutrinos dieser Art empfindlich. Denn ein Myon- oder Tauon-Neutrino kann die im ersten Teil dieses Artikels beschriebenen Nachweisreaktionen an Chlor- oder Gallium-Kernen nicht auslösen, weil ihre Energie nicht ausreicht, um die wesentlich massereicheren Leptonen  $\mu^-$  und  $\tau^-$  zu produzieren.

Wenn sich nun ein Teil der in der Sonne erzeugten Elektron-Neutrinos auf dem Weg zur Erde in Neutrinos einer anderen Art umwandelt, dann ergibt sich radiochemisch gemessen eine kleinere Rate als jene, die ohne diesen Effekt zu erwarten wäre. Damit ließe sich also der radiochemische Befund erklären.

Und wie sieht dies bei Experimenten wie Kamiokande aus, die auf dem Nachweis von Streuprozessen beruhen? Die Wahrscheinlichkeit für die Streuung an Elektronen ist für Elektron-Neutrinos um etwa einen Faktor 5 größer als für Myon- oder Tauon-Neutrinos. Folglich könnte eine Umwandlung der Elektron-Neutrinos in eine andere Art auch die Ergebnisse der auf Streuprozessen basierenden Messungen erklären.

Wie aber kann dieser Effekt, die so genannte Neutrino-Oszillation, erfolgen? Wenn das Neutrino, im Herzen der Sonne als Elektron-Neutrino geboren, sich aus mehreren Zuständen unterschiedlicher Masse zusammensetzt, wäre dieser Effekt sogar unausweichlich. Die verschiedenen Masseneigenzustände bewegen sich nämlich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten fort. Deshalb würde nach einer bestimmten Laufstrecke das ursprüngliche Mischungsverhältnis verloren gehen.



Das bedeutet aber, dass die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen in einem gegebenen Abstand von der Sonne als Elektron-Neutrino vorzufinden, nicht mehr bei 100 Prozent liegt, sondern darunter. Der genaue Wert hängt von den so genannten Mischungswinkeln ab, welche die ursprüngliche Zusammensetzung des Elektron-Neutrinos beschreiben. Nach einer weiteren Flugstrecke würde das Mischungsverhältnis den ursprünglichen Wert wieder annehmen und das Teilchen sich wieder im Ausgangszustand befinden. Es schwingt sozusagen während seiner Reise durch den Weltraum ständig von einer Art zur anderen und wieder zurück.

Die Frequenz dieser Oszillation hängt von der *Massendifferenz* der verschiedenen Neutrinoarten und von der Energie der Neutrinos ab. Je größer der Quotient dieser beiden Größen ist, desto schneller laufen die Massenzustände auseinander und desto höher ist die Frequenz der Neutrino-Oszillation. Genau gesagt hängt diese Frequenz von der Größe  $(m_2^2 - m_1^2) / E_\nu$  ab, wobei  $m_1$  und  $m_2$  die Werte der Masseneigenzustände sind und  $E_\nu$  die Energie der Neutrinos bezeichnet. Dieser quantenmechanische Effekt wurde bereits in den 1960er Jahren bei

ganz anderen Teilchen, den neutralen Kaonen, in Beschleunigerexperimenten beobachtet und schon früh von dem theoretischen Physiker Bruno Pontecorvo als Lösung des Rätsels der solaren Neutrinos vorgeschlagen.

Was wissen wir heute experimentell über die Massen der drei Neutrino-Arten? Die Massendifferenzen können über die Oszillationslängen gemessen werden. Es gibt eine große Massendifferenz (etwa  $3 \times 10^{-3}$  eV) und eine kleine Massendifferenz (etwa  $8 \times 10^{-5}$  eV), wobei die Zuordnung der drei Massenzustände zu den drei Neutrino-Arten noch nicht eindeutig bestimmt ist. Auf jeden Fall ist aber das schwerste Neutrino nur etwa 0,05 eV massereicher als das leichteste, und es ist nicht ausgeschlossen, dass Letzteres die

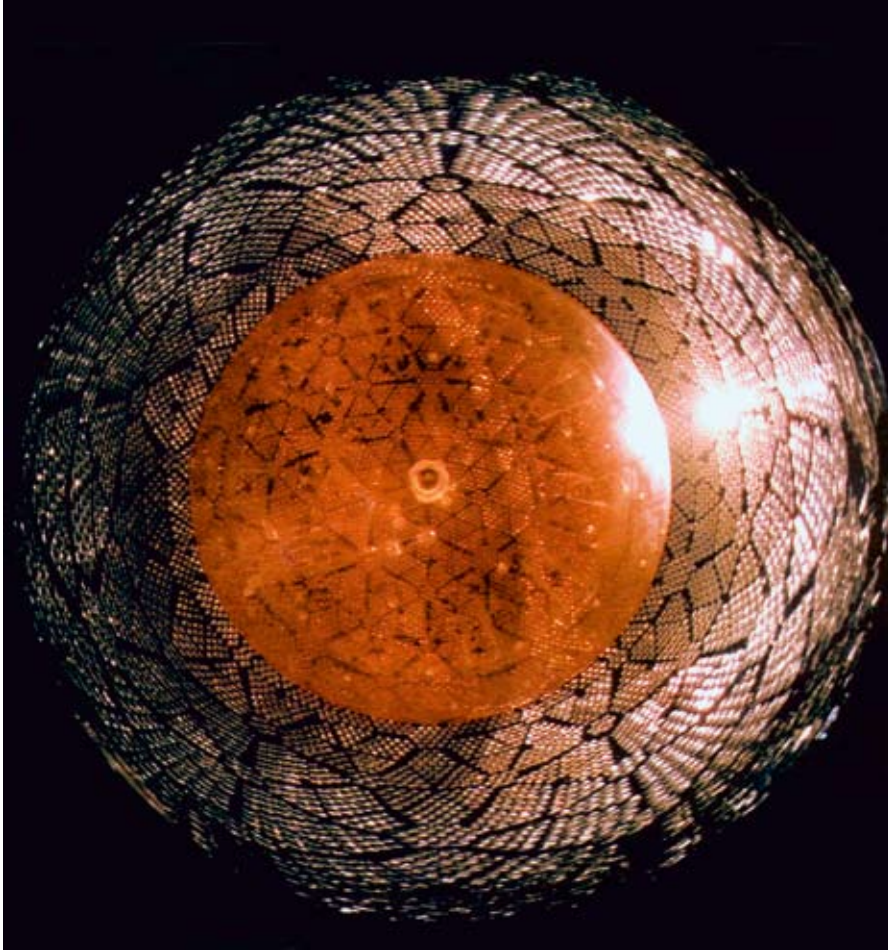
Wer sich von der adriatischen Küste kommend dem Gran-Sasso-Massiv in den italienischen Abruzzen nähert, dem leuchtet dessen Name »Großer Stein« unmittelbar ein. Die 1800 Meter mächtigen Gesteinsmassen schirmen die tief im Inneren des Berges gelegenen Laboratori Nazionali vor Störstrahlung ab: Hier fangen Physiker aus aller Welt die geisterhaften Neutrinos ein.

**W I S** wissenschaft  
in die schulen!

Damit Schüler aktiv mit den Inhalten dieses Beitrags arbeiten können, stehen auf unserer Inter-

netseite [www.wissenschaft-schulen.de](http://www.wissenschaft-schulen.de) didaktische Materialien zur freien Verfügung. Darin wird gezeigt, wie das Thema im Rahmen des Physikunterrichts in der gymnasialen Oberstufe behandelt werden kann. Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Bad Wildbad und dem Haus der Astronomie in Heidelberg durch.





In diesem riesigen Detektor im Inneren des Sudbury Neutrino Observatory (SNO) wurden von 1999 bis 2006 Bor-8-Neutrinos von der Sonne nachgewiesen. Das Herzstück des Experiments bildeten 1000 Tonnen schweren Wassers, die in dem gezeigten zwölf Meter messenden, kugelförmigen und durchsichtigen Akryltank enthalten waren. Die von den Neutrinos im Wasser erzeugten Tscherenkow-Lichtblitze wurden von den etwa 10 000 den Wassertank umgebenden Lichtdetektoren nachgewiesen.

Ruhemasse Null besitzt. Für die Masse des Elektron-Neutrinos gibt es eine experimentelle obere Grenze von etwa 2 eV.

Da die Neutrino-Oszillationen von den Massendifferenzen abhängen, können sie sich nur dann ausbilden, wenn zumindest eine Neutrinoart eine nicht verschwindende Ruhemasse besitzt. Dies ist aber im Standardmodell der Teilchenphysik nicht vorgesehen. Die Beobachtung von Neutrino-Oszillationen bedeutet also, dass eine Erweiterung des Standardmodells erforderlich ist. Zudem kann dies, abhängig von der Größe der Neutrinomasse, erhebliche kosmologische Konsequenzen haben. Neutrinos tragen mit ihrer Masse zu der heißen Dunklen Materie im Universum bei und beeinflussen die Strukturbildung der Materie auf großen Skalen. Dies erklärt das starke Interesse der Physiker und Astronomen an dieser Fragestellung. Wichtige Aspekte der Teilchenphysik, der Astrophysik und der Kosmologie sind hier miteinander verknüpft.

Ende der 1980er Jahre wurde von Sanislav Mikheyev, Alexei Smirnov und Lincoln Wolfenstein gezeigt, wie diese Neutrino-Oszillationen durch das Plasma im Inneren der Sonne modifiziert werden können. Dabei wird eine explizite Abhängigkeit ihrer Frequenz von der Neutrinoenergie vorhergesagt, die wiederum vom tatsächlichen Wert des Massenunterschieds modifiziert

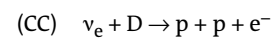
wird. Genaue Analysen aller verfügbaren experimentellen Resultate waren zwar in guter Übereinstimmung damit und engten auch mögliche Werte der Massenunterschiede und Mischungswinkel ein, allein der schlagende Beweis für die Existenz der Neutrino-Oszillationen fehlte noch.

### Des Rätsels Lösung

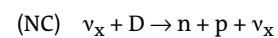
Wenn man nur zeigen könnte, dass ein Teil der Elektron-Neutrinos auf der Reise von der Sonne zur Erde in eine andere Art oszilliert ist! Für ein Experiment im Sudbury Neutrino Observatory (SNO) in der Creighton-Mine bei Sudbury, Kanada, wurde zu diesem Zweck ein 1000 Tonnen schwerer Tscherenkow-Detektor gebaut, mit dem von 1999 bis 2006 solare Neutrinos nachgewiesen wurden (siehe Bild oben). Anstatt normalen Wassers wie im Super-Kamiokande-Experiment wurde schweres Wasser,  $D_2O$ , verwendet. In beiden Detektoren ist die elastische Streuung (ES) von Neutrinos an Elektronen möglich: Die Wahrscheinlichkeit für den Nachweis von Elektron-Neutrinos über diesen Prozess ist aber etwa fünfmal so groß wie die für Myon- und Tauon-Neutrinos.

Das im Detektor-Volumen des SNO-Experiments enthaltene Deuterium erlaubt darüber hinaus zwei zusätzliche Reaktionskanäle für den Nachweis von

Sonnenneutrinos zu nutzen. Der eine steht nur für Elektron-Neutrinos offen:



Diese erste Reaktion ist im Wesentlichen die gleiche, die wir schon von den Chlor- und Gallium-Experimenten kennen: Ein Neutron reagiert mit einem Elektron-Neutrino zu einem Proton und einem Elektron. Myon- oder Tauon-Neutrinos können dies nicht. Hingegen ist die zweite Reaktion:



für alle Neutrinoarten mit gleicher Wahrscheinlichkeit erlaubt ( $x = e, \mu, \tau$ ). Hier wird das Deuteron (ein gebundener Zustand eines Protons mit einem Neutron) durch das Neutrino in seine Bestandteile aufgebrochen. Das Deuteron wird also gespalten, und dazu ist eine Mindestenergie von 2,2 MeV nötig. Diese Mindestenergie wird zum größten Teil von solaren  $^8B$ -Neutrinos aufgebracht, deren Energiespektrum sich ja bis 14 MeV erstreckt (siehe den ersten Teil dieses Artikels). Dabei spielt die Neutrinoart keine Rolle, denn es wird kein geladenes Lepton erzeugt.

Im SNO-Experiment wurden sowohl die Elektronen der Reaktion (CC) als auch die Neutronen der Reaktion (NC) beob-

achtet. Die Neutronen wurden nach verschiedenen Methoden nachgewiesen – in der letzten Ausbaustufe des Experiments geschah dies mittels in den Detektor versenkter und mit  $^3\text{He}$ -Gas gefüllter Proportionalzählrohre. Die Protonen ihrerseits stören die Messung nicht, weil sie nach ihrer Entstehung eine viel zu geringe Geschwindigkeit besitzen, um Tscherenkow-Licht zu erzeugen.

So konnten aus der kombinierten Messung aller drei Reaktionskanäle (ES, NC und CC) erstmals neben dem  $\nu_e$ -Anteil auch der  $\nu_\mu$ - und  $\nu_\tau$ -Anteil am solaren Neutrinofluss bestimmt und damit die Neutrino-Oszillationen eindeutig nachgewiesen werden: Wenn solare Neutrinos nicht oszillieren, dann sollten die gemessenen Flüsse aus beiden Reaktionen, CC und NC, gleich sein – wenn aber die Transformation von einer Art in eine andere passiert, dann sollte der über die Reaktion (NC) gemessene Fluss deutlich höher sein. Letzteres wird im Sudbury Neutrino Observatory beobachtet (siehe Bild unten)! So wird der seit dem Jahr 2000 für Elektron-Neutrinos ermittelte Fluss mit  $\varphi_e = (1,68 \pm 0,11) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  angegeben, während der gesamte gemessene Fluss solarer Neutrinos deutlich höher ist und  $\varphi_{\text{tot}} = (4,94 \pm 0,42) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  beträgt.

Damit ist eindeutig bewiesen, dass ein beträchtlicher Teil der Elektron-Neutrinos, nämlich etwa zwei Drittel, auf dem Weg von der Sonne zur Erde ihre Art ändern – eine großartige Entdeckung! Im Standardmodell der Teilchenphysik ist dies nämlich nicht möglich. Vergleicht man zudem den gesamten Fluss  $\varphi_{\text{total}}$  mit der Vorhersage des Sonnenmodells, so findet

man jetzt eine gute Übereinstimmung. Damit ist das solare Neutrino-Rätsel gelöst: Das Defizit an solaren Elektron-Neutrinos ist den Oszillationen zwischen Elektron-, Myon- und Tauon-Neutrinos auf dem Weg von der Sonne zur Erde geschuldet.

Inzwischen wurde dieses Ergebnis durch das japanische KamLAND-Experiment bestätigt. Neutrino-Oszillationen sind also eine Konsequenz der intrinsischen Eigenschaft dieser Teilchen und sollten auch bei anderen Neutrinoquellen nachweisbar sein. In KamLAND gelang dies mit Elektron-Antineutrinos aus Kernreaktoren – also völlig unabhängig von solaren Neutrino-Experimenten.

### Zurück zum Anfang

Das Rätsel um die fehlenden solaren Neutrinos hatte zur Folge, dass für mehr als drei Jahrzehnte die Teilcheneigenschaften der Neutrinos gegenüber dem Prozess ihrer Entstehung im Sonneninneren in den Vordergrund gerückt waren – um die Botschaft entschlüsseln zu können, hatte man zuerst den Boten verstehen müssen.

Zu Beginn des neuen Jahrtausends wendete sich die Situation allmählich: Die mit Hilfe solarer, atmosphärischer und Reaktor-Neutrinoexperimente gewonnenen Ergebnisse erhärteten das Bild von den Neutrino-Oszillationen als Ursache für das solare Neutrino-Defizit. Mehr als das: Massenunterschiede und Mischungswinkel konnten bald so genau bestimmt werden, dass nach langer Pause das ursprüngliche Ziel solarer Neutrinoexperimente wieder in Angriff genommen werden konnte: über die Bestimmung von Anzahl und Energie der nachgewiesenen Neutrinos –

also eine spektrale Messung – mehr über die Fusionsprozesse im Inneren der Sonne zu erfahren.

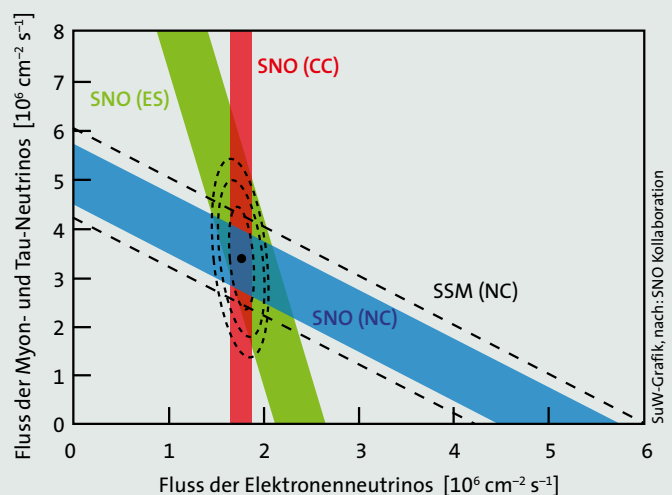
Allerdings stoßen hier Wasser-Tscherenkowdetektoren, trotz ihrer großen Erfolge bei der Entdeckung der Oszillationen, an ihre Grenzen: Diese Technik ist nur für die relativ hochenergetischen Bor-8-Neutrinos empfindlich. Beim Elektronrückstoß eines Beryllium-7-Neutrinos würden in Super-Kamiokande gerade einmal vier der mehr als 10 000 Photosensoren ansprechen – ein Signal, das sich vom Rauschen der Sensoren nicht mehr unterscheiden lässt.

### Neue Detektoren

Doch schon während der 1990er Jahre hat sich in der Neutrino-Physik ein anderer Detektortyp etabliert: Dieser verwendet zum Nachweis der Neutrinos an Stelle von Wasser organische Lösungsmittel, sogenannte Flüssigszintillatoren. Auch hier sind mindestens mehrere hundert Tonnen Detektorflüssigkeit nötig, um die seltenen Neutrinoereignisse mit einer ausreichenden Rate nachweisen zu können. Der Unterschied steckt im Prozess der Lichterzeugung, denn im Szintillator spielt der Tscherenkow-Effekt nur noch eine untergeordnete Rolle. Der wesentliche Nachweismechanismus ist dieser: Durchquert ein Neutrino den Detektor, so wird es in seltenen Fällen an einem Elektron gestreut und überträgt dabei diesem einen Teil seiner Energie. Dann wird das Elektron in der Flüssigkeit abgebremst und gibt seine Energie an die Umgebung ab. Dabei hinterlässt es eine Spur angeregter Moleküle, die nach kurzer Zeit wie-

## Der Nachweis der Neutrino-Oszillationen

Die Ergebnisse der drei separaten Messungen des SNO-Experiments sind hier grafisch als Kombination von Elektron- und Summe aus Myon- plus Tauon-Neutrinofluss dargestellt. Während das rote Band die Rate aus der Reaktion (CC) angibt, zu der nur Elektron-Neutrinos beitragen, gibt das blaue Band das Ergebnis der (NC)-Messung wieder, zu der zwar alle drei Neutrinoarten beitragen, deren jeweilige Anteile sich aber nicht bestimmen lassen. Zusätzliche Informationen liefert die elastische Streuung (ES), zu der Elektron-Neutrinos stärker als die beiden anderen Arten beitragen. Gestrichelt ist der nach dem Standard-Sonnenmodell (SSM) zulässige Bereich markiert. Das korrekte Ergebnis für die Mischung der drei Neutrinoarten (mit Fehlerellipse) liegt im Schnittpunkt der Bänder und stimmt mit der Vorhersage des SSM sehr gut überein.





der in ihren Grundzustand zurückkehren. Anders als in anderen Materialien erzeugt dieser Vorgang im Szintillator sichtbares Licht, das mit Hilfe von Lichtdetektoren nachgewiesen werden kann. Diese Lichtblitze sind wesentlich intensiver als die in einem Tscherenkow-Detektor – der Szintillator erzeugt etwa die 50-fache Menge an Photonen.

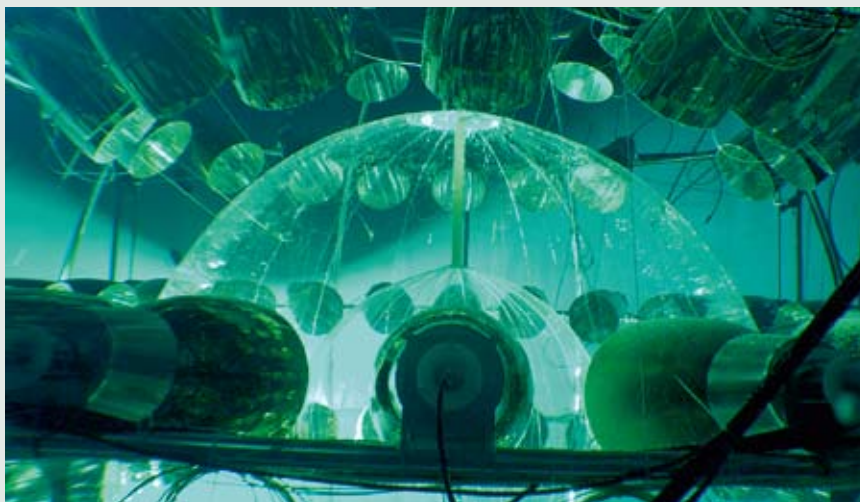
## Radioaktiver Untergrund

Flüssigszintillatoren kommen seit Langem in der Radiochemie zum Einsatz, da sich in ihnen Materialproben leicht lösen und auf ihren Gehalt an radioaktiven Elementen hin untersuchen lassen. Dies gilt es im Neutrinoexperiment aber tunlichst zu vermeiden, denn in der Flüssigkeit gelöste radioaktive Spuren erzeugen Signale, die von denen der Neutrinos nicht unterscheidbar sind. Bei niedrigen Energien gibt es deutlich mehr Elemente, deren radioaktiver Zerfall die seltenen Neutrino-Ereignisse vortäuschen kann. Je niedriger die Energie der untersuchten Neutrinos ist, desto größer ist also die Zahl der Untergrundereignisse, die dem Signal überlagert sind. Und nicht nur der Szintillator selbst muss weitestgehend kontaminationsfrei sein, alle die Flüssigkeit umgebenden Materialien, sei es der Stahl der Tankwand oder das Glas der Lichtdetektoren, tragen aufgrund kleinster Spuren radioaktiver Elemente zum Untergrund bei. Doch selbst wenn kein direkter Kontakt vorhanden ist, kann die radioaktive Gammastrahlung mit ihrer großen Reichweite das Detektionsvolumen immer noch erreichen.

Tatsächlich ist die natürliche Kontamination der meisten Materialien mehr als ausreichend, um ein solches Experiment scheinbar unmöglich zu machen. Der natürliche Urananteil der Erdkruste liegt bei 0,0003 Massenprozent. Aber diese vernachlässigbar erscheinende Konzentration entspricht 3 Gramm Uran in einer Tonne Material oder etwas mehr als 3 Milliarden radioaktiver Zerfälle pro Tag! Demgegenüber erwartet man in derselben Menge Szintillator statistisch pro Tag gerade einmal ein halbes Neutrinoereignis; der Szintillator muss also einen Reinheitsgrad von etwa  $10^{-15}$  (einem Billionstel!) Massenprozent Uran aufweisen, um den Nachweis von Beryllium-7-Neutrinos zu ermöglichen – darin liegt die gewaltige technische Herausforderung dieser Experimente.

## Borexino

Das Bild unten zeigt den Prototypen der Counting Test Facility CTF II des Borexino-Detektors. Der innere kugelförmige Behälter aus Nylon mit zwei Meter Durchmesser enthält die Szintillatorflüssigkeit. Die äußere Hülle mit vier Meter Durchmesser ist mit Wasser gefüllt und schirmt die Szintillatorkugel gegen die Radium- und Radonkerne ab, die aus den (hier im Vordergrund sichtbaren) Photodetektoren und den das gesamte Experiment umgebenden Tankwänden austreten. Mit CTF II wurde die Technik zur Reinigung des Flüssigszintillators von Spuren radioaktiver Elemente erprobt, die für den Nachweis niederenergetischer solarer Neutrinos unerlässlich ist.



Alle Bilder auf dieser Doppelseite: Borexino Collaboration / LNGS

## Das Borexino-Experiment

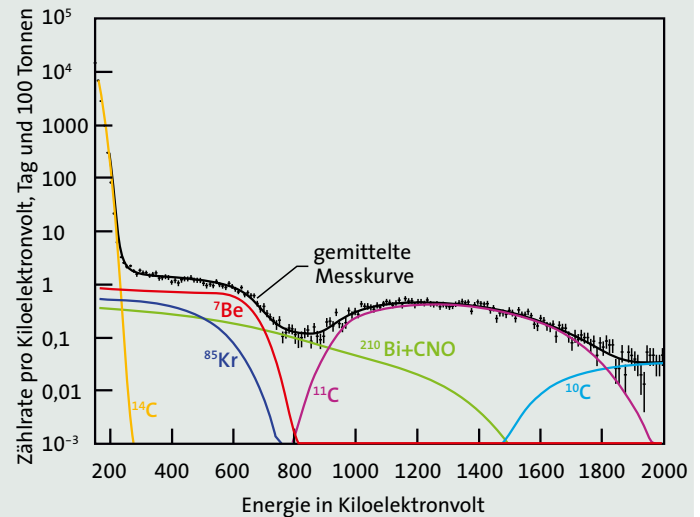
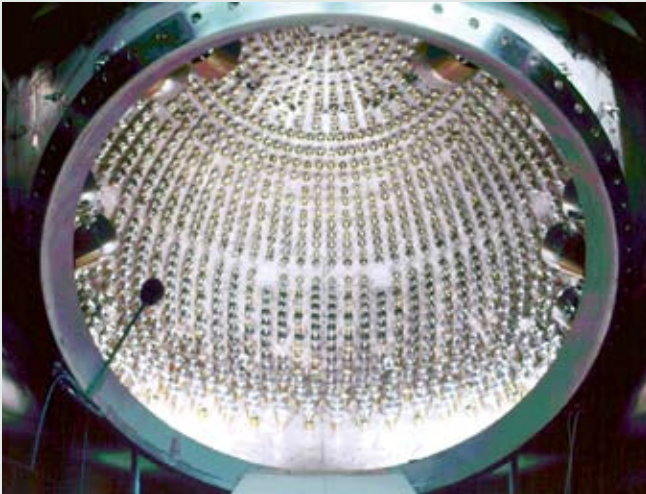
Umso erstaunlicher ist es, dass dieses Kunststück schließlich gelang. Mitte der 1990er Jahre begann eine internationale Kollaboration von Physikern unter deutscher Beteiligung in den Laboratori Nazionali del Gran Sasso in den italienischen Abruzzen, geschützt von einer 1800 Meter hohen Gesteinsschicht (Bild auf Seite 29), mit dem Aufbau eines Flüssigszintillationsdetektors, genannt Borexino.

Nach Vorversuchen mit einem Prototypen, der Counting Test Facility (CTF) wurde bis Mai 2007 der Aufbau des Detektors und seine Auffüllung mit Szintillatorflüssigkeit betrieben. Der Borexino-Detektor ist wie folgt aufgebaut. Der in eine mit 2200 Photosensoren bestückte Stahlkugel von 14 Metern Durchmesser (siehe Bild oben) gefüllte Szintillator ist durch Barrieren aus hauchdünnem Nylon in mehrere Bereiche unterteilt. 300 Tonnen aktives Detektormaterial werden von 700 Tonnen inaktiver Pufferflüssigkeit vor der von außen kommenden radioaktiven Strahlung geschützt. Tatsächlich werden nur die innersten 100 Tonnen, eine Kugel von 6,5 Metern Durchmesser, zum Nachweis der Neutrinos verwendet. Zusammen mit einem zwei Millionen Liter fassenden Wassertank, der die

Stahlkugel umgibt, schirmen etwa 7 Meter Flüssigkeit das Nachweisvolumen vor externer Neutronen- und Gammastrahlung ab. Das Innere des Borexino-Detektors ist wohl der am besten vor Strahlung abgeschirmte Ort der Erde.

Im Mai 2007 registrierte das Borexino-Experiment erstmals erfolgreich solare Neutrinos im Sub-MeV-Bereich. Und schon im August wurden die Ergebnisse einer ersten Messung der bis dahin experimentell unbekanntem  $^7\text{Be}$ -Neutrino-Rate veröffentlicht (siehe die Grafik oben). In 100 Tonnen Szintillatorflüssigkeit wurden wie erwartet etwa 50 Ereignisse pro Tag nachgewiesen. Die gleichzeitig aus den Messungen ermittelte Kontamination der Flüssigkeit mit Uran liegt sogar noch unterhalb der oben genannten Vorgaben. Das hat neben extremer Vorsicht bei Herstellung, Transport und Reinigung von mehr als 1000 Tonnen Flüssigszintillator auch der durchdachte Aufbau des Borexino-Detektors möglich gemacht.

Die bisher in Borexino gemessenen Raten der  $^7\text{Be}$ - und auch der  $^8\text{B}$ -Neutrinos bestätigen das derzeit gängige Modell der Neutrino-Oszillationen, das bei den niedrigen Energien der  $^7\text{Be}$ -Neutrinos die Dominanz von Vakuum-Effekten und bei



Dieser Blick ins Innere des Borexino-Detektors zeigt den Stahltank mit seinen 2200 Lichtdetektoren, welche die Blitze in der Szintillatorflüssigkeit registrieren. Innerhalb von nur 200 Tagen Messzeit lieferte dieses Experiment das rechts gezeigte Energiespektrum. Die schwarzen Datenpunkte mit Fehlerbalken geben die gemessene Rate pro Energie-Einheit und Tag an. Die schwarze Linie ist den Messdaten angepasst. Das gesamte Signal wurde in seine Komponenten zerlegt: Die rote Kurve zeigt den gesuchten spek-

tralen Beitrag der Elektronrückstöße der Beryllium-7-Neutrinos, die anderen Kurven zeigen die verschiedenen Untergrundsignale. Gefährlich sind vor allem die im Szintillator enthaltenen Spuren des Wismut-Isotops  $^{210}\text{Bi}$  (grün) aus dem natürlichen Zerfall von Uran-238 und des bei der Kernspaltung entstehenden Krypton-Isotops  $^{85}\text{Kr}$  (dunkelblau). Trotz dieser Störeinflüsse konnte der Fluss der Beryllium-7-Neutrinos mit einer Genauigkeit von  $\pm 10$  Prozent bestimmt werden.

den hochenergetischen  $^8\text{B}$ -Neutrinos das Vorherrschen von Materie-Effekten vorhersagt. Tatsächlich bietet Borexino die Chance, den Übergangsbereich von Vakuum- zu Materioszillationen bei mittleren Energien zu testen, da auch der Nachweis der dort angesiedelten pep-Neutrinos für die Zukunft möglich erscheint. (Die pep-Neutrinos haben eine feste Energie von 1,4 MeV; sie entstehen bei der Reaktion  $p + e^- + p \rightarrow ^2\text{H} + \nu_e$ , über die in der Sonne 0,2 Prozent des Deuteriums gebildet werden.)

Hier warten vielleicht noch Überraschungen: Die heute diskutierten Theorien sagen unterschiedliche Abhängigkeiten der Oszillationswahrscheinlichkeit von der Energie voraus. Damit könnten die Experimente Hinweise auf Neutrinos veränderlicher Masse und auf andere Nicht-Standard-Effekte geben.

### Wie viel Metall enthält die Sonne?

Eine genaue Vermessung der Raten niederenergetischer Neutrinos wird auch zu einem besseren Verständnis der im Inneren der Sonne vorherrschenden Bedingungen beitragen. Optische Beobachtungen der Sonne, vor allem der Fraunhoferlinien in ihrem Spektrum – sie sind der Fingerab-

druck der verschiedenen Elemente – bieten die besten Anhaltspunkte für die Elementzusammensetzung der Sonne. In diesem Zusammenhang bezeichnet im Jargon der Astrophysiker die Metallizität eines Sterns den Anteil aller Elemente schwerer als Helium. Mittels optischer Spektroskopie lässt sich jedoch nur der Metallgehalt der äußersten Schicht der Sonne, der Photosphäre, bestimmen. Modelle, die den inneren Aufbau der Sonne beschreiben, verlassen sich daher darauf, dass die Metallizität im Inneren nicht zu sehr von den außen gemessenen Werten abweicht.

Eine Möglichkeit, die Annahme räumlich konstanter Metallizität direkt zu prüfen, bietet, wie im ersten Teil dieses Artikels bereits beschrieben, die Helioseismologie. Immer präziser wird die Ausprägung und Ausbreitung von Schallwellen auf der Oberfläche und auch im Mantel der Sonne untersucht. Die aus den Messungen abgeleitete Ausbreitungsgeschwindigkeit solcher Wellen in der konvektiven Zone der Sonne lässt sich mit den Berechnungen der Sonnenmodelle vergleichen.

In der Vergangenheit stärkte die hervorragende Verträglichkeit der helioseismologisch bestimmten Metallizität mit der aufgrund der spektroskopisch bestimmten

Metallizität berechneten Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen das Vertrauen in unser Verständnis des Sonnenaufbaus. Doch diese Sicherheit geriet ins Wanken, als eine erneute Analyse der spektralen Daten einen so niedrigen Anteil an Metallen ergab, dass er sich mit den seismischen Messungen nicht länger vereinbaren lässt. Welcher Wert ist nun der richtige?

Tatsächlich könnten Neutrino-Experimente zur Beilegung dieses Widerspruchs beitragen. Denn die Sonnenmodelle sagen nicht nur die Schallgeschwindigkeit in den äußeren Schichten, sondern auch die Raten der Fusionsprozesse im Sonnenkern voraus. Auch diese Raten sind abhängig von der in den Modellen angenommenen Metallizität und schlagen sich direkt in der Anzahl erzeugter und schließlich auf der Erde registrierter Neutrinos nieder. Die Genauigkeit der in den Neutrino-Experimenten gemessenen Raten reichte jedoch bisher noch nicht aus, um daraus auch die Metallizität im Sonneninneren abzuleiten. Borexino bietet diese Chance, da die Präzision in der Bestimmung des Flusses der  $^7\text{Be}$ -Neutrinos nach mehrjähriger Messzeit bei wenigen Prozent liegen wird, und die Abhängigkeit der  $^7\text{Be}$ -Produktionsrate von der Metallizität deutlich ausgeprägt ist.



## Der Beitrag des CNO-Zyklus

Die Möglichkeit einer weiteren wichtigen Messung liegt in der Reichweite des Borexino-Experiments: Der geringe Beitrag des CNO-Zyklus zur Energieproduktion der Sonne ist experimentell noch weitgehend unbestimmt. Die beste obere Grenze von etwa 5 Prozent liefern die radiochemischen Neutrinoexperimente. Sie ergibt sich indirekt durch die Subtraktion bekannter Neutrinoflüsse von dem gemessenen Gesamtfluss. Tatsächlich liegt diese obere Grenze etwa fünfmal höher als der von den Sonnenmodellen vorhergesagte Anteil. Doch auch diese Modelle haben ihre liebe Not mit einer genauen Vorhersage: Die dafür benötigten Reaktionsraten ionisierter Kohlenstoff-, Stickstoff- und Sauerstoffkerne sind im Labor nur schwer zu vermessen. Ist diese experimentelle Hürde jedoch genommen, so lässt sich die Konzentration der wichtigsten solaren »Metalle« im Sonneninnern, Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff, aus dem gemessenen CNO-Neutrinofluss ableiten.

Darüber hinaus birgt die genaue Größe des CNO-Beitrags nicht nur Informationen über den jetzigen Zustand unserer Sonne, sondern auch über ihre weitere Entwicklung: Da sich die Sonne in ihrem

## Quellen künstlicher Neutrinos



**Kernreaktoren:** In Kernreaktoren werden schwere Isotope der Elemente Uran und Plutonium gespalten. Deren Spaltprodukte besitzen einen großen Überschuss an Neutronen und unterliegen daher sukzessiv mehreren Betazerfällen, bis dabei endlich stabile Atomkerne zurückbleiben. Bei diesen Betazerfällen werden Elektron-Antineutrinos emittiert. Deren Energien sind kontinuierlich und ihre maximalen Werte liegen bei

etwa 10 MeV. Neutrinoflüsse in der näheren Umgebung von Leistungsreaktoren sind sehr hoch und werden daher auch heute noch in der Teilchenphysik benutzt, um Neutrinoeigenschaften wie zum Beispiel Oszillationen zu studieren. Das Neutrino wurde erstmals 1956 von Frederick Reines und Clyde L. Cowan mit dem Detektor »Poltergeist« am Reaktor in Savannah River, USA, nachgewiesen. Dafür erhielt Reines 1995 den Nobelpreis für Physik. In Europa wird zurzeit mit deutscher Beteiligung das Double-Chooz-Experiment mit zwei Neutrino-detektoren am Reaktor in Chooz (Frankreich) aufgebaut, um Oszillationen zwischen der ersten und der dritten Neutrinoart aufzuspüren.

**Beschleuniger:** Teilchenbeschleuniger können als »Neutrinoakanonen« betrieben werden. Dazu gibt es mehrere Techniken. Im Allgemeinen werden heute Protonen beschleunigt

Jahrmilliarden dauernden Alterungsprozess langsam erhitzt und damit die Bedingungen für die Wasserstofffusion mittels des CNO-Zyklus immer günstiger werden, wird dessen Beitrag deutlich ansteigen und schließlich gut ein Drittel der gesamten Energieproduktion betragen. Schon heute werden sonnenähnliche Sterne in selbst nach astronomischen Maßstäben uralten Kugelsternhaufen benutzt, um ein Mindestalter unseres Universums abzuleiten. Ein genaues Verständnis des CNO-Beitrags und seiner Entwicklung in der Spätphase dieser Sterne ist dafür unabdingbar, denn in massereicheren Sternen, die von Natur aus heißer sind als die Sonne, überwiegt schon in frühen Phasen der CNO-Zyklus den Beitrag der pp-Kette zur Energieerzeugung.

Da die CNO-Neutrinos noch energiereicher als die  ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos sind, lassen sie sich in einem Szintillationsde-

tektor wie etwa Borexino gut nachweisen. Wie sich herausstellt, erzeugen jedoch kosmische Myonen, die ihren Weg durch die kilometerdicke Abschirmung des Gran-Sasso-Massivs bis in den Detektor finden, hier das kurzlebige instabile Kohlenstoff-Isotop  ${}^{11}\text{C}$ , dessen weiterer Zerfall das gesuchte Signal überlagert. Trotzdem bietet das Borexino-Experiment die reelle Chance, diesen von Myonen erzeugten Untergrund durch eine geschickte Analyse von Zeit- und Ortsinformationen von den CNO-Neutrino-Ereignissen zu trennen.

## Zukünftige Experimente

Selbst wenn es mit Borexino nur gelingen sollte, eine weitere, wenn auch viel stringenter obere Grenze für den CNO-Neutrinofluss zu bestimmen, so steht die nächste Generation solarer Neutrinoexperimente schon in den Startlöchern: Der SNO-Detektor, der den solaren Neutrinos bis ins Jahr 2006 als Wasser-Tscherenkow-Detektor nachspürte, soll nun binnen weniger Jahre mit Szintillator gefüllt und erneut zur Untersuchung solarer Neutrinos bei niedrigen Energien eingesetzt werden. Das effektive Szintillationsvolumen des im Bau befindlichen Experiments SNO<sup>+</sup> wird etwa das dreifache des Borexino-Experiments sein, und der von Myonen erzeugte Untergrund wird aufgrund der besseren Abschirmung durch etwa zwei Kilometer starkes Gestein bedeutend geringer sein: Einer noch präziseren Messung von pep- und CNO-Neutrinos steht damit nichts im Wege.

**Der hier schematisch gezeigte LENA-Detektor ist ein Neutrino-Experiment der nächsten Generation. Das Nachweisvolumen soll etwa 50 Millionen Liter Szintillatorflüssigkeit enthalten. Damit vergrößert sich im Vergleich zu Borexino die Anzahl nachgewiesener Neutrinos um mehr als einen Faktor 100, und es wird mit LENA zum Beispiel möglich sein, den Fluss der in der Sonne entstehenden Neutrinos auf zeitliche Variationen um wenige Prozent hin zu untersuchen.**





und auf ein leichtes »Target« (Zielscheibe) wie zum Beispiel Beryllium gelenkt. Bei den eintretenden Kernreaktionen entstehen Mesonen und bei hohen Strahlenergien auch Kaonen. Diese Teilchen zerfallen im Wesentlichen in Myonen und ihre dazugehörigen Neutrinos  $\nu_\mu$ . Heutige Beschleuniger sind also hauptsächlich Quellen hochenergetischer Myon-Neutrinos. Typischerweise liegt deren Energie heute im GeV-Bereich.

Mit dieser Technik konnte die Existenz von drei Neutrinoarten nachgewiesen werden. Für die Entdeckung der Myon-Neutrinos erhielten Leon M. Lederman, Melvin Schwartz und Jack Steinberger 1988 den Nobelpreis für Physik. Im letzten Jahrzehnt wurden mit dieser Technik in Japan und den USA Neutrino-Oszillationen bestätigt und deren Parameter präzise bestimmt. Die Flugstrecke der Neutrinos vom Beschleuniger bis zu den Detektoren Super-Kamiokande und MINOS beträgt dabei mehrere Hundert Kilometer! In Europa werden zurzeit Neutrinos vom Beschleunigerzentrum CERN bei Genf 730 Kilometer weit bis zum Gran-Sasso-Untergrundlabor in den Abruzzen gelenkt. Das dortige Experiment OPERA (Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus) versucht unter Beteiligung deutscher Institute die Oszillation von Myon-Neutrinos in Tauon-Neutrinos nachzuweisen.

Ab 2020 sollen großvolumige Neutrino-Observatorien eine noch genauere Untersuchung solarer Neutrinos ermöglichen: Die Planungen für das europäische LENA-Experiment (Low Energy Neutrino Astronomy), einen Detektor, der 50 000 Tonnen Flüssigszintillator enthalten soll, haben schon begonnen (siehe Bild links). Ein solches Experiment würde die Messung tausender Neutrinoereignisse pro Tag erlauben: Neben hochpräzisen Messungen der einzelnen Beiträge zum Neutrinofluss könnte dann auch nach zeitlichen Fluktuationen des Flusses um wenige Prozent gesucht werden.

Ein solch ehrgeiziges Projekt wird mehr als nur eine Neutrinoquelle erforschen können: Auf die Neutrinos, die beim Sternkollaps einer galaktischen Supernova freigesetzt werden, warten Astrophysiker nun schon seit der Supernova SN1987A in der Großen Magellanschen Wolke, von der in irdischen Detektoren nur eine Handvoll Neutrinos nachgewiesen wurden. Sollte sich ein solches Ereignis während der Laufzeit von LENA wiederholen, so würden Zehntausende Neutrinos ihr Signal im Detektor hinterlassen. Mit dieser gewaltigen Anzahl ließe sich ein genaues Bild der beim Kollaps des stellaren Kerns ablaufenden Prozesse nachzeichnen. Solche tiefen Einblicke ins Innere der Sterne werden der optischen Astronomie aufgrund der den Kern umgebenden Sternhülle auf immer verwehrt bleiben.

Noch kühner ist die Aussicht, die Neutrinos längst vergangener und selbst auf kosmischen Skalen weit entfernter Supernova-Explosionen nachzuweisen: Seit Beginn der Sternentstehung im frühen Universum erfüllt ein gleichmäßiger Fluss von Supernova-Neutrinos den Raum zwischen den Sternen. Benutzt man die aus optischen Beobachtungen gewonnenen Informationen über die Sternentstehungsrate in weit entfernten Galaxien und kombiniert diese mit den Messungen und Berechnungen zur Neutrino-Emission einer Supernova, so lässt sich der Fluss dieser diffusen Supernova-Neutrinos vorhersagen. Obwohl er um viele Größenordnungen geringer ist als der von der Sonne emittierte, ebenfalls kontinuierliche Neutrinofluss, wird LENA in der Lage sein, die wenigen Neutrino-Ereignisse pro Jahr zu identifizieren. Vielleicht wird es sogar gelingen, Informationen über die kosmische Supernova-Rate und die zugehörigen Neutrinospektren zu gewinnen.

Für hochenergetische Neutrinos astrophysikalischen Ursprungs stehen Experimente dieser Größenordnung schon längst auf der Tagesordnung: Das KM3-Net im Mittelmeer und Icecube in der Antarktis suchen nach Quellen hochenergetischer Neutrinos weit außerhalb unseres Sonnensystems. LENA wird auch für die Beobachtung stellarer Neutrinoquellen ein neues Fenster öffnen. Der Neutrinoastronomie stehen interessante Zeiten bevor.



**LOTHAR OBERAUER**

lehrt als Physiker an der Technischen Universität München und forscht mit seiner Arbeitsgruppe im Rahmen des Verbunds »Origin and Structure of

the Universe«, kurz: »Cluster Universe«. Er ist an BOREXINO, LENA und anderen internationalen Neutrino-Experimenten beteiligt.



**MICHAEL WURM** erforscht die Neutrinos in der Arbeitsgruppe von Lothar Oberauer. Kürzlich erhielt er den Universe PhD

Award »Experiment« für die beste experimentelle Doktorarbeit innerhalb des Cluster Universe.

## Literaturhinweise

- Brunner, J.:** ANTARES – Neutrino-Astronomie in der Tiefsee. In: Sterne und Weltraum 5/2006, S. 38 – 45.
- Hampel, W.:** Der Gallium-Detektor für Sonnenneutrinos. In: Sterne und Weltraum 9/1986, S. 455 – 459.
- Hampel, W.:** Das Sonnenneutrino-Problem: endlich gelöst? In: Sterne und Weltraum 6–7/1999, S. 540 – 547.
- Kirsten, T.:** Neutrinoastrophysik. In: Sterne und Weltraum 7–8/1986, S. 375 – 381.
- Kirsten, T.:** Gallex misst Sonnenneutrinos. In: Sterne und Weltraum 1/1993, S. 16 – 24.
- Rau, R.:** Auf der Suche nach der Dunklen Materie. In: Sterne und Weltraum 1/2005, S. 32–42.
- Spiering, Ch.:** Neutrinojagd am Südpol. In: Sterne und Weltraum 12/2004, S. 30 – 34.
- Spiering, Ch.:** Astroteilchenphysik, Erfolge und Perspektiven. In: Sterne und Weltraum 6/2008, S. 46 – 54.

Der erste Teil dieses Beitrags ist in Sterne und Weltraum 2/2010, S. 30 – 38 erschienen.

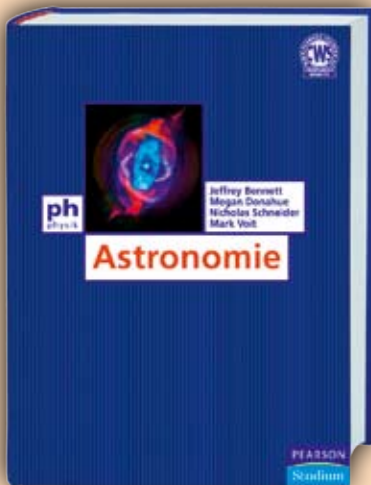
Weblinks zum Thema:

[www.astronomie-heute.de/artikel/1020519](http://www.astronomie-heute.de/artikel/1020519)





## Unser besonderer Tipp:



Jeffrey Bennett, Megan Donahue, Nicholas Schneider, Mark Voit

### ■ **Astronomie**

Die kosmische Perspektive

5. Aufl. 2010, 1162 S. m. zahlr. farb. Abb. u. Tab., geb., Pearson.

Bestell-Nr. 2906. € 79,95 (D), € 82,20 (A)

Aus der Rezension von Carolin Liefke für *kosmolog.de*: »Astronomie ist in den USA an vielen Colleges ein eigenständiges Studienfach, das man sogar unabhängig von Mathematik und Physik belegen kann. Genau das ist auch die Herangehensweise der »Kosmischen Perspektive«. Auf wunderbare Art und Weise gelingt es [den Autoren] die Grundlagen von Astronomie und Astrophysik zu vermitteln – ohne das strenge Korsett von trockenem mathematischem Formalismus. Thematisch deckt »Die Kosmische Perspektive« alle Bereiche der Astronomie von klassischer Himmelsmechanik bis hin zu aktuellen Fragestellungen der astronomischen Forschung ab.«

Eine ausführliche Leseprobe finden Sie unter:

[www.science-shop.de/astronomie](http://www.science-shop.de/astronomie)

NEU



Ronald Stoyan

### ■ **Teleskop-1x1**

Erste Hilfe für Fernrohr-Besitzer

2. Aufl. 2009, 88 S. m. zahlr. farb. Abb., kart., Oculum.

Bestell-Nr. 2263.

€ 9,90 (D), € 10,20 (A)

Ohne jedes Vorwissen werden alle typischen Einsteigerfragen anschaulich und verständlich

erklärt. Wie stellt man das Teleskop auf? Was bedient man die Montierung? Wie finde ich astronomische Objekte? Text und Abbildungen orientieren sich an aktuellen preiswerten Fernrohren.

Begleitend zum Buch entsteht eine Internetseite mit weiterführendem Material.



Andreas Müller

### ■ **Schwarze Löcher**

Die dunklen Fallen der Raumzeit  
Astrophysik aktuell

2010, 206 S. m. zahlr. meist farb. Abb., kart., Spektrum.

Bestell-Nr. 2921.

€ 16,95 (D), € 17,50 (A)

Schwarze Löcher sind die unglaublichsten Objekte der

Astronomie. Ein Schwarzes Loch ist eine Masse, die so dicht gepackt ist, dass sie sogar das Licht am Entkommen hindert. Als Konsequenz ist ein Schwarzes Loch nur schwer am Himmel zu entdecken. Andreas Müller stellt die aufregende Entdeckungsgeschichte Schwarzer Löcher dar – von den anfänglichen Spekulationen bis zu astronomischen Beobachtungen, die kaum Zweifel an deren Existenz lassen. Nach der Lektüre ist klar: Ohne Schwarze Löcher ist die moderne Astronomie nicht denkbar – und der Mensch nicht auf der Erde.



Hrsg.: Thomas Posch, Anja Freyhoff, Thomas Uhlmann

### ■ **Das Ende der Nacht**

Die globale Lichtverschmutzung und ihre Folgen

2009, 151 S. m. 50 Farbbabb., geb., Wiley-VCH.

Bestell-Nr. 2937.

€ 29,- (D), € 29,90 (A)

Der Verlust des Naturerlebnisses Nachthimmel ist den meisten Menschen noch gar nicht bewusst; dabei sind es nicht nur Astronomen, die unter der Lichtverschmutzung leiden. Dieses wichtige Buch beruht auf der Fernsehdokumentation »The Dark Side of Light« von Anja Freyhoff und Thomas Uhlmann. Während der Dreharbeiten ist reichhaltiges und ungewöhnliches Bildmaterial entstanden, das die »dunkle Seite« des Lichts aussagekräftig illustriert.

Man kann dem Buch nur eine weite Verbreitung wünschen. Seine schöne und interessante Aufmachung wird ihren Teil dazu beitragen. Im Science-Shop halten wir eine umfangreiche Leseprobe für Sie bereit.



Geoffrey Cornelius

### ■ **Was Sternbilder erzählen**

Die Mythologie der Sterne

2. Aufl. 2009, 176 S. m. 160 farb. Illustrationen u. Sternktn., kart., Kosmos.

Bestell-Nr. 2893.

€ 14,95 (D), € 15,40 (A)

Bereits vor Jahrtausenden haben die Menschen

Sterne zu Bildern sortiert, ihnen Namen gegeben und dazu abenteuerliche Geschichten erfunden.

Dieses Buch erweckt die antiken Figuren mit zahlreichen Darstellungen und spannenden Erzählungen zum Leben und stellt so den reich bevölkerten Himmel vergangener Hochkulturen vor. Alle 88 Sternbilder und ihre Hauptsterne werden vorgestellt, mit ihren Sagen und Mythen von den Babyloniern bis zu den alten Griechen – dazu über 80 Farbfotos historischer Himmelsgemälde und Kunstgegenstände.



Stefan Seip

### ■ **Himmelsfotografie mit der digitalen Spiegelreflexkamera**

Die schönsten Motive bei Tag und Nacht

2009, 144 S. m. 130 Farbbabb. u. 70 Screenshots, kart., Kosmos.

Bestell-Nr. 2777.

€ 14,95 (D), € 15,40 (A)

In einfach nachvollziehbaren Schritt-für-Schritt-Anleitungen zu tollen Himmelsaufnahmen! Schon mit einer handelsüblichen digitalen Spiegelreflexkamera lassen sich wunderschöne Himmelsfotos erzielen. Wie man zu solchen Aufnahmen gelangt, erklärt einfach nachvollziehbar der erfahrene Astrofotograf Stefan Seip. Die Bandbreite der Motive reicht dabei von einem schönen Vollmondaufgang bis hin zum detailreichen Abbild schwacher Nebel. Dabei behandelt der Autor ausführlich die Fotografie sowohl mit als auch ohne Fernrohr und gibt Ratschläge zur Bildbearbeitung. Ein ausführlicher Serviceteil mit zahlreichen Praxistipps lässt keine Fragen offen.

Bestellen Sie bequem telefonisch: 06221 9126-841



Paul Murdin

### ■ **Geheimnisse des Universums**

65 große astronomische Entdeckungen

2009, 330 S., m. zahlr. meist farb. Abb., geb., Spektrum Akademischer Verlag.

Bestell-Nr.: 2868.

€ 39,95 (D), € 41,10 (A)

Die ersten Aufzeichnungen von Mondbeobachtungen sind 25.000 Jahre alt. Seit dieser Zeit sind eine Fülle großartiger Entdeckungen hinzugekommen. In diesem Buch werden 65 große astronomische Entdeckungen vorgestellt und zwar in über 500 beeindruckenden Bildern!



### ■ **Der große Kosmos 3D-Atlas des Sonnensystems, CD-ROM**

2009, USM.

Bestell-Nr. 2850

€ 39,90 (D), € 39,90 (A)

Erkunden Sie alle Planeten, über 30 Monde und sechs Asteroiden unseres Sonnensystems. Die Oberflächenkarten zeigen alle wichtigen Details der Himmelskörper sowie alle Landeplätze aus nächster Nähe.

In leicht verständlichen Texten werden Beschaffenheit und Entstehung der Himmelskörper ausführlich erklärt und viel Wissenswertes zu Astronomie und Raumfahrt vermittelt.



Bequem bestellen:

→ direkt bei [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)

→ per E-Mail [info@science-shop.de](mailto:info@science-shop.de)

→ telefonisch 06221 9126-841

→ per Fax 0711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

\*Bestellungen in D & A unter € 20,- sowie Bestellungen im sonst. Ausland berechnen wir mit € 3,50. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsges. mbH

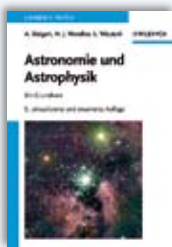
NEU



Hermann-Michael Hahn  
**■ Das 1 mal 1 der Astronomie, Buch mit CD-ROM**  
 Planeten, Sterne, Galaxien. Mit dem PC-Planetary Redshift 7 Launcher  
 2010, 144 S., geb., Kosmos.  
**Bestell-Nr. 2976.**  
**€ 12,95 (D), € 13,40 (A)**

Dieses Buch bietet alles Wissenswerte über das Universum: Orientierung am Himmel, das Sonnensystem, die Welt der Sterne, in den Tiefen des Alls. Enthalten ist die Planetariumssoftware »Redshift 7 Launcher«.

Zu jedem Thema im Buch finden Sie auf der CD spezielle Führungen, die das Thema mittels der Planetariumssoftware visualisiert. So wird das Universum zum Erlebnis!



Alfred Weigert, Heinrich Wendker, Lutz Wisotzki  
**■ Astronomie und Astrophysik**  
 Ein Grundkurs  
 5. Aufl. 2009, 545 S. m. z. Tl. farb. Abb., kart., Wiley-VCH.  
**Bestell-Nr. 1926.**  
**€ 59,- (D), € 60,70 (A)**

Das aktuellste und beste Lehrbuch zur Astronomie für diejenigen Leser, die über mathematische und physikalische Vorkenntnisse verfügen, wie sie in Studiengängen zur Physik oder den Ingenieurwissenschaften vermittelt werden. Kein anderes Buch für diese Zielgruppe vermittelt die wichtigsten astrophysikalischen Konzepte vollständiger und prägnanter als der »WWW«. Physiker jedenfalls sollten nicht unterhalb dieses Werkes in die Astronomie einsteigen wollen. In der Neuauflage jetzt mit einem Kapitel über Extrasolare Planetensysteme.



Erik Wischniewski  
**■ Astronomie in Theorie und Praxis**  
 Kompendium und Nachschlagewerk mit Formeln, Fakten, Hintergründen  
 4. überarbeitete und erweiterte Auflage, 2009, 728 S. m. zahlr. Abb., geb., Eigenverlag.  
**Bestell-Nr. 2290.**  
**€ 69,- (D), € 72,- (A)**

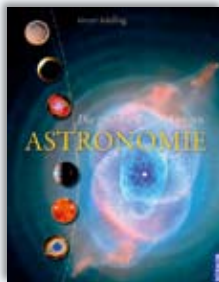
Alles Relevante zur Astronomie in einem Band. Jetzt in neuer überarbeiteter Auflage: farbig und im großen Format (17x24 cm)! Triviale Bücher für Sternfreunde gibt es genug, aber darf es auch mal ein bisschen mehr sein? Wer sich tiefer gehend mit der Astronomie beschäftigen möchte, sollte dieses Einführungs- und Nachschlagewerk erwerben. Das Besondere an diesem Buch ist das ausgewogene Verhältnis von Theorie und Praxis. Es dient Frischlingen zur Einführung und alten Hasen zur Vervollständigung ihrer Kenntnisse. 57 Übungsaufgaben ermöglichen es, das eigene Verständnis zu überprüfen. Ein Register mit über 3300 Stichworten macht das Buch darüber hinaus zum Nachschlagewerk.



Emily Winterburn  
**■ Den Himmel Lesen lernen**  
 Astronomie für Sterngucker  
 2009, 239 S. m. 58 Abb., kart., dtv.  
**Bestell-Nr. 2958.**  
**€ 16,90 (D), € 17,40 (A)**

Die junge Astronomin Emily Winterburn führt Sie durch das Jahr. Für jeden Monat weiß sie Kurioses und Wissenswertes aus der Welt der Astronomie zu berichten. Ihr Buch ist ein preiswerter und doch sehr schöner Reader; vor allem geeignet für Leser, die sich gerade erst mit der Astronomie anfreunden.

**Portofreie Lieferung in D & A ab einem Bestellwert von € 20,-\***



Govert Schilling  
**■ Astronomie - Die größten Entdeckungen**  
 2009, 240 S. m. 250 farb. Fotos u. Illustr., geb., Kosmos.  
**Bestell-Nr. 2856.**  
**€ 49,90 (D), € 51,30 (A)**

Vor 400 Jahren hat das Teleskop die Astronomie revolutioniert. Generationen von Forschern haben damit den Nachthimmel beobachtet und durch ihre Entdeckungen das Weltbild der Menschheit geprägt.

Zeit für eine Bestandsaufnahme: Was wurde entdeckt, wo hat man sich geirrt, welche Fragen sind noch offen? Dieser Bildband präsentiert die 100 wichtigsten Entdeckungen der Astronomie. Die einzigartige Kombination historischer Tatsachen und aktueller Forschungsergebnisse lässt die Geschichte der Sternkunde Revue passieren.



**■ Abenteuer im Weltall, CD-ROM**  
 Interaktives Lernspiel zur Astronomie und Raumfahrt  
 Entwickelt von Katrin Honauer und Marie Berckhan, Sprecher: Pascal Honauer und Marie Berckhan, Spektrum der Wissenschaft.

**Bestell-Nr. 2959. € 9,90 (D), € 9,90 (A)**  
 Dieses interaktive Lernspiel ist der Gewinner des Jugendsoftwarepreis 2008 der Klaus-Tschira-Stiftung. Es wurde programmiert von Jugendlichen für Kinder ab 10 Jahre. Das Spiel besteht aus zwei Teilen:  
 • Ein interaktives und linear aufgebautes Lernspiel. Hier helfen die Kinder dem Alien Sparky aus der Patsche und bestehen mit ihm gemeinsam viele Abenteuer.  
 • Ein umfangreiches Angebot an Texten, Schaubildern, Zeittafeln und interaktiven Aufgaben, die in individueller Reihenfolge und beliebig oft bearbeitet werden können.  
 Geeignet für PC mit Betriebssystem MS-Windows XP oder Vista.



Tobias Hürter, Max Rauner  
**■ Die verrückte Welt der Paralleluniversen**  
 Wo leben wir eigentlich? Und wenn ja, wie oft?  
 2009, 269 S. m. Abb., kart., Piper.

**Bestell-Nr. 2956.**  
**€ 14,95 (D), € 15,40 (A)**  
 Kein Witz: Unser Universum ist nur eines von unendlich vielen, und jeder Mensch hat Doppelgänger in

anderen Welten. Das behaupten seriöse Physiker, und sie meinen es ernst. Bisher spielten Philosophen, Schriftsteller und Regisseure mit der Idee der Vielen Welten, jetzt erobert sie die Kosmologie – und könnte die größte wissenschaftliche Revolution seit der kopernikanischen Wende auslösen. Dieses Buch bietet eine unterhaltsame, leicht verständliche Einführung in ein bizarres Konzept.



Heinz-Joachim Klötzler  
**■ Das Astro-Teleskop für Einsteiger**  
 Kaufberatung, Technik, Himmelsbeobachtung. Kosmos Astropraxis  
 2008, 144 S. m. 194 Farbfotos u. 21 Farbzeichnungen, kart., Kosmos.

**Bestell-Nr. 2473.**  
**€ 14,95 (D), € 15,40 (A)**

Dieser Praxisratgeber bietet eine sichere Hilfe beim Einkauf, geleitet durch den Aufbau, zeigt die 20 schönsten Beobachtungsziele am Himmel und gibt Tipps für die ersten Astrofotos.



Axel Martin, Bernd Koch  
**■ Digitale Astrofotografie, mit DVD-ROM**  
 Grundlagen und Praxis der CCD- und Digitalkameratechnik  
 2009, 352 S. m. 500 Abb., geb., Oculum.

**Bestell-Nr. 2757.**  
**€ 49,90 (D), € 51,30 (A)**

Dieses umfangreiche Kompendium zur Astrofotografie ist auf dem neuesten Stand der Technik. Es behandelt umfassend alle Fragen rund um Kamera, Optik, Montierung, Kamerabedienung und Aufnahmetechnik, sowie der digitalen Bildbearbeitung. Damit setzt es einen neuen Standard für Literatur zu diesem Thema. Wer sich ernsthaft mit diesem faszinierenden Gebiet der Astronomie beschäftigen will, kommt nicht daran vorbei. Gerade der angehende Astrofotograf erhält in diesem Buch wertvolle Hinweise, wie man mit verhältnismäßig einfachen Mitteln die Aufnahmetechnik optimieren und das Beste aus seinen Aufnahmen herausholen kann. Dem Buch liegt eine DVD bei, auf der über 40 nützliche Freeware-, Shareware- und Demo-Programme zur Astrofotografie enthalten sind.

**Besuchen Sie uns im Internet unter: [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)**



**Bequem bestellen:**

→ direkt bei [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)

→ per E-Mail [info@science-shop.de](mailto:info@science-shop.de)

→ telefonisch 06221 9126-841

→ per Fax 0711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart