

Dunkle Materie und Sonnen-Neutrinos

Eine endliche Neutrinomasse weist auf bisher unbekannte Teilchen jenseits des Standardmodells hin

Josef Jochum und Franz von Feilitzsch

Galaxien in Galaxien-Clustern bewegen sich mit höheren Geschwindigkeiten als der durch die Gravitationskraft der sichtbaren Materie alleine gegebenen Fluchtgeschwindigkeit. Um Galaxien-Cluster zusammenzuhalten, muss es daher in ihnen eine unsichtbare Form der Materie oder eine ungewöhnliche Klasse dunkler Objekte geben [1]. Diese so genannte Dunkle Materie gibt uns eines der größten Rätsel der Astrophysik auf, und die Suche nach ihr ist eine der gegenwärtig interessantesten Aufgaben der Teilchen- und Astrophysik. Als aussichtsreiche Kandidaten für die Dunkle Materie gelten bisher unbekannte schwach wechselwirkende Elementarteilchen, wie sie im Standardmodell jedoch nicht vorkommen.

Die Massendichte ρ des Universums wird gewöhnlich in Einheiten der kritischen Dichte ρ_{crit} angegeben, die notwendig wäre, um in ferner Zukunft die Ausdehnung des Universums umzukehren. Wäre z. B. $\rho < \rho_{\text{crit}}$ bzw. $\Omega = \rho/\rho_{\text{crit}} < 1$, so würde das Universum ewig expandieren. Die aus der beobachteten Galaxienbewegung hergeleitete Massendichte Ω_{dyn} gibt uns eine untere Grenze für die gesamte Massendichte des Universums. Sie ist $0,3 \approx \Omega_{\text{dyn}}$. Die Dichte der sichtbaren Materie liegt dagegen lediglich im Bereich von $0,002 < \Omega_{\text{lum}} < 0,010$ und trägt somit nur einen geringen Bruchteil zur Gesamtmasse Ω_{dyn} des Universums bei! Einstein führte die so genannte kosmologische Konstante ein, die eine eventuelle Gravitationswirkung des Vakuums berücksichtigt. Es gibt zurzeit Hinweise darauf, dass die kosmologische Konstante ungleich null ist. Auch wenn dies weitreichende Folgen für die Expansion des Universums hat, bleibt die Diskrepanz zwischen gesamter und sichtbarer Masse bestehen.

Woraus besteht der überwiegende unsichtbare Rest? Wir kennen dunkle Objekte: Weiße Zwerge, Neutronensterne oder Schwarze

Löcher. Durch die Kernfusion entstehen in den Sternen, die solchen Objekten vorausgehen, Elemente wie beispielsweise Helium. Würde die Dunkle Materie aus diesen Sternenresten bestehen, so müsste im Universum viel mehr Helium vorhanden sein als beobachtet wird. Auch schwach leuchtende Sterne, so genannte Braune Zwerge, sind vermutlich nicht in ausreichender Zahl vorhanden, um als Dunkle Materie in Betracht zu kommen.

Die Häufigkeiten der im Urknall produzierten leichten Elemente ${}^4\text{He}$, ${}^3\text{He}$, D , ${}^7\text{Li}$ sind durch die Dichte von Protonen und Neutronen, der so genannten Baryonendichte Ω_{bar} gegeben. Daher lässt sich aus der gemessenen Verteilung der leichten Elemente die gesamte, sichtbare und unsichtbare Baryonendichte bestimmen. Sie ist überraschenderweise kleiner als die untere Grenze der Gesamtdichte Ω_{dyn} , $0,008 < \Omega_{\text{bar}} < 0,100$, d. h. der dominierende Anteil der Dunklen Materie kann nicht aus baryonischer Materie, also nicht aus Protonen und Neutronen, bestehen!

Neutrinos könnten im Rahmen des Standardmodells der Teilchenphysik eine naheliegende Erklärung für die Dunkle Materie sein. Erst seit jüngster Zeit gibt es sehr starke Hinweise auf eine endliche Ruhemasse von Neutrinos [2]. Damit könnten sie zur Dunklen Materie beitragen. Würde man aber die gesamte Dunkle Materie mit Neutrinos erklären wollen, so stieße man auf ein Problem bei der Strukturbildung im Universum. Denn wenn die Dunkle Materie aus Teilchen besteht, so hängt die Strukturbildung im Universum sehr von deren Masse ab. Je leichter die Teilchen, desto schneller bewegen sie sich und desto stärker verwirbeln sie kleinere Strukturen. Um die Bildung der heute beobachteten Strukturen zu ermöglichen, müssen die Teilchen viel langsamer und damit schwerer sein als Neutrinos. Im Standardmodell fehlen uns derartige schwere Teilchen.



Das Galaxien-Cluster 0024+1654, gesehen vom Hubble Space Telescope. Die bogenförmigen Strukturen um das Cluster sind Abbilder einer weiter entfernten Galaxie, welche durch den Gravitationslinsen-Effekt zustande kommen. Die Massenbestimmung des Galaxien-Clusters mithilfe dieses Effekts liefert wie auch andere Messmethoden Evidenz für die Existenz Dunkler Materie.

Neue Teilchen: WIMPs

Wenn die Neutrinos direkt auch nur einen untergeordneten Beitrag zur Dunklen Materie liefern könnten, so weisen sie uns dennoch den Weg. Wie sich immer deutlicher abzeichnet, lässt sich die Natur der Dunklen Materie nur erklären, indem die Teilchenphysik über das Standardmodell der elektroschwachen Wechselwirkung hinausgeht. Die Erkenntnis, dass Neutrinos eine endliche Ruhemasse haben, erfordert es nämlich, dieses Standardmodell zu modifizieren. Dabei werden neue schwach wechselwirkende, massive Elementarteilchen vorhergesagt, die sich geradezu ideal als Kandidaten für die Dunkle Materie eignen. Das leichteste Teilchen der supersymmetrischen Erweiterung des Standardmodells könnte alle Eigenschaften eines solchen *Weakly Interacting Massive Particle*, kurz: WIMP, aufweisen. Nach solchen Teilchen zu suchen ist eines der vorrangigen Ziele von bestehenden und zukünftigen Hochenergie-Beschleunigern, sowie neuerdings von Experimenten der Teilchen-Astrophysik.

Dr. Josef Jochum,
Prof. Dr. Franz von
Feilitzsch, Physik-
Department E15,
TU München,
85747 Garching

Eine Möglichkeit der Suche basiert darauf, dass WIMPs an Atomkernen elastisch streuen können und dabei einen Rückstoß auf die Kerne übertragen. Man muss allerdings die seltenen Streueignisse, die nur sehr wenig Energie deponieren, in einem Detektor identifizieren können. Bei den ersten Experimenten wurden die nach den Kernrückstößen sekundär erzeugte Ionisation in Germanium oder das Szintillationslicht in NaI-Kristallen detektiert. Da die Ionisations- bzw. Szintillations-Effizienz von Kernrückstößen sehr gering ist, verwendet man neuerdings Tieftemperatur-Kalorimeter. Bei Temperaturen von 10 – 50 mK lässt sich damit die

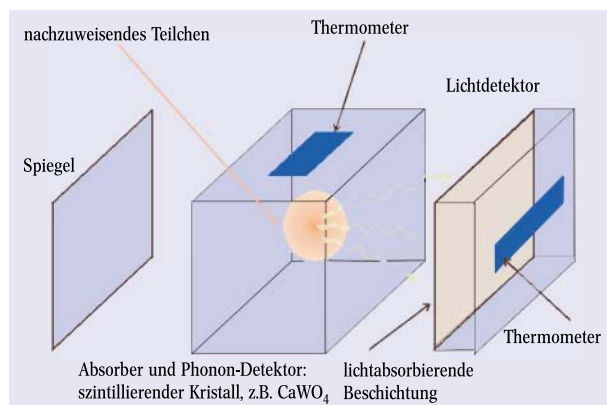


Abb. 1: Die Temperaturerhöhung sowie das Szintillationssignal, die beim Rückstoß eines Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) entstehen, lassen sich gleichzeitig detektieren. Ein supraleitender Film auf der Oberfläche des Absorber-Kristalls wird am Phasenübergang zur Supraleitung stabilisiert. Eine kleine Temperaturerhöhung führt zu einer messbaren Änderung im Filmwiderstand. Der Absorber besteht aus einem szintillierenden Material, z. B. CaWO_4 . Das von ihm emittierte Szintillationslicht wird in einem zweiten, kleineren Kalorimeter nachgewiesen.

Rückstoßenergie direkt durch die resultierende Temperaturerhöhung messen (Abb. 1) [3].

Die größte Schwierigkeit der Experimente liegt in der zu erwartenden extrem niedrigen Streuraten der WIMPs. Ohne entsprechende Vorkehrungen sind Energiedepositionen durch Radioaktivität viel häufiger. Der Detektor darf daher nur mit Materialien umgeben werden, die möglichst geringe Radioaktivität aufweisen. Außerdem müssen die Experimente in tiefen Minen oder Tunneln betrieben werden, um die kosmische Höhenstrahlung abzuschirmen. Die supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells sagt Streuraten von WIMPs in Germanium voraus, die um bis zu vier bis fünf Größenordnungen kleiner sind als die derzeitige Nachweisgrenze. Um WIMPs nachzuweisen,

muss uns daher die Natur entweder mit einem hohen Wirkungsquerschnitt entgegenkommen, oder es sind neue Strategien bei der weiteren Reduzierung des Untergrundes notwendig.

Bedingt durch die Bewegung der Erde um die Sonne sollte sich unsere mittlere Geschwindigkeit relativ zu den WIMPs und damit das zu erwartende Rückstoßspektrum im jahreszeitlichen Rhythmus verändern. Das Experiment DAMA (Dark Matter search) im Gran-Sasso-Labor hat in insgesamt 100 kg NaI-Detektoren Hinweise auf passende Schwankungen gefunden [4]. Dies wird derzeit mit anderen Experimenten überprüft. Das Experiment GENIUS (Germanium detectors in liquid Nitrogen in an Underground Set up) sieht vor, die hohe Reinheit von Germanium in einem sehr großen Detektor zur Selbstabschirmung vor Radioaktivität zu verwenden [5]. Andere Experimente nutzen die Möglichkeit, den Untergrund aktiv zu unterdrücken. Mit einem Tieftemperatur-Kalorimeter wird die gesamte deponierte Energie gemessen. Ein gleichzeitig gemessenes Ladungs- oder Lichtsignal erlaubt es, für jedes Einzelereignis die Ionisations- bzw. Szintillations-Effizienz zu bestimmen. Diese ist für WIMP-Ereignisse niedriger als für den überwiegenden Teil des Untergrundes.

Damit lässt sich der Untergrund erkennen und um einige Größenordnungen reduzieren (Abb. 2). Auf der Messung der Ionisations-Effizienz basieren das amerikanische Experiment CDMS (Cryogenic Dark Matter Search) und das französische, im Frejus-Tunnel installierte Experiment EDELWEISS (Experience pour DEtecter Les Wimps En Site Souterrain) [3]. Das unter deutscher Federführung im Gran-Sasso-Labor installierte Experiment CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers) misst die Szintillations-Effizienz [6].

Die Leistungsfähigkeit dieser Methoden wurde kürzlich dadurch deutlich, dass CDMS mit einem nur etwa 160 Gramm schweren Germanium-Target die gleiche Messempfindlichkeit aufweist wie das DAMA-Experiment mit 100 kg an Detektor-Material. Wir erwarten, dass die Messungen sehr bald die von DAMA gefundenen Hinweise auf WIMPs bestätigen oder ausschließen werden. Die weiteren Pla-

nungen gehen dahin, Tieftemperatur-Kalorimeter mit Detektormassen bis hin zu 1000 kg aufzubauen. Damit ließe sich ein Großteil des von der Supersymmetrie vorhergesagten Bereiches von Wirkungsquerschnitten abdecken. Wenn WIMPs nachgewiesen und daneben in Hochenergie-Beschleunigern neue Teilchen gefunden werden, könnte der Zusammenhang zwischen der Dunklen Materie und der Teilchentheorie jenseits des Standardmodells definitiv geklärt werden.

Experimente zu Neutrinooszillationen

Der Hinweis auf Neutrinomassen, der sich mit der Beobachtung von Oszillationen der Atmosphären-Neutrinos durch das Experiment Super-KAMIOKANDE erhärtet hat, zeigt uns, wie realistische Physik jenseits des Standardmodells ist [2]. Wie alle Elementarteilchen, kommen auch die Neutrinos in verschiedenen Flavours vor: Elektron-, Myon- und Tau-Neutrino. Wenn die Neutrinos eine endliche Ruhemasse haben, dann können sie zwischen den Flavours hin und her oszillieren, d. h. Neutrinos, die als Elektron-Neutrinos emittiert wurden, können nach einer gewissen Flugstrecke als Myon-Neutrinos vorliegen. Da Detektoren für Sonnen-Neutrinos in der Regel hauptsächlich Elektron-Neutrinos detektieren, kann die gemessene Rate durch Neutrinooszillationen gegenüber den Erwartungen reduziert sein. Dabei hängt das Maß der Reduktion auch von der Energie der Neutrinos ab.

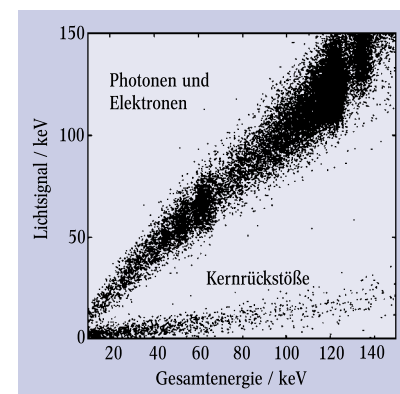


Abb. 2: Bei der gleichzeitigen Messung von Licht- und Gesamtenergie entspricht das Verhältnis von Licht- zu Gesamtenergie der Szintillationseffizienz. Sie ist niedrig für Kernrückstöße (WIMPs oder Neutronen) und hoch für Elektron- und Photonabsorptionen. Damit lässt sich der dominante Anteil des Untergrundes von WIMP-Ereignissen unterscheiden.

Die Sonne bietet uns eine sehr gute Neutrino-Quelle. In ihrem Inneren fusionieren Protonen zu Heliumkernen, wobei Elektron-Neutrinos emittiert werden. Zwischen der gut bekannten Strahlungsintensität der Sonne und dem zu erwartenden Fluss an Sonnen-Neutrinos besteht ein fester Zusammenhang. Schon in den 60er-Jahren hat das Homestake-Experiment erstmals Sonnen-Neutrinos gemessen [7]. Dabei wurde in 615 Tonnen C_2Cl_4 pro Tag etwa ein Chlor-Atom durch die Absorption eines Sonnen-Neutrinos in ein Argon-Atom umgewandelt. Zum Nachweis dieser wenigen Atome sind höchste Anforderungen an die Reinheit der Materialien und an die Abschirmung vor kosmischer Strahlung gestellt. Das Ergebnis von Homestake war überraschend: Der Neutrinofluss ist deutlich geringer als erwartet.

Sind etwa Neutrinooszillationen die Ursache für das Defizit und geben sie uns damit einen Hinweis auf die Neutrinomasse? Oder verstehen wir die Vorgänge in der Sonne nicht richtig? Die Bedeutung dieser Frage für die Neutrinophysik hat zu weiteren Experimenten geführt: KAMIOKANDE, GALLEX (GALLium EXperiment) und SAGE (Sovietic American Gallium Experiment). Alle haben einen zu geringen Neutrinofluss beobachtet, was Neutrinooszillationen als einzige plausible Erklärung übrig lässt.

Die dominante Reaktionskette beim Fusionsprozess in der Sonne ist der pp-Zyklus. Die entstehenden Elektron-Neutrinos lassen sich etwas vereinfacht in drei Gruppen einteilen (Abb. 3 und 4): Die Neutrinos niedriger Energie (unterhalb 422 keV) entstehen bei der Fusion von zwei Protonen. Sie werden pp-Neutrinos genannt und dominieren zahlenmäßig den Fluss. Im mittleren Energiebereich (bis etwa 1,5 MeV) dominiert mit einem etwa zehnmals schwächeren Fluss die Linie der Be-Neutrinos, die beim Übergang von ${}^7\text{Be}$ zu ${}^7\text{Li}$ emittiert werden. Einen tausendfach geringeren Fluss, aber die höchste Energie (bis 15 MeV) haben die beim Zerfall von ${}^8\text{B}$ entstehenden Bor-Neutrinos.

Die verschiedenen Experimente sind auf unterschiedliche Bereiche des Neutrinospektrums sensitiv. Da bei Homestake die Energieschwelle bei 814 keV liegt, wird der größte Teil des Signals durch die Bor-Neutrinos erzeugt. KAMIOKANDE de-

tektierte die Neutrinos über das Cherenkov-Licht der gestreuten Elektronen. Auch hier konnten mit der Nachweisschwelle von etwa 7 MeV nur die Bor-Neutrinos gemessen werden [8]. Da der Fluss an Bor-Neutrinos sehr empfindlich von der Temperatur im Sonneninneren abhängt, wurde versucht,

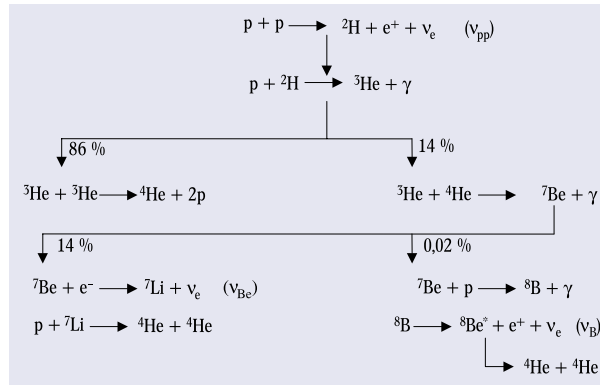


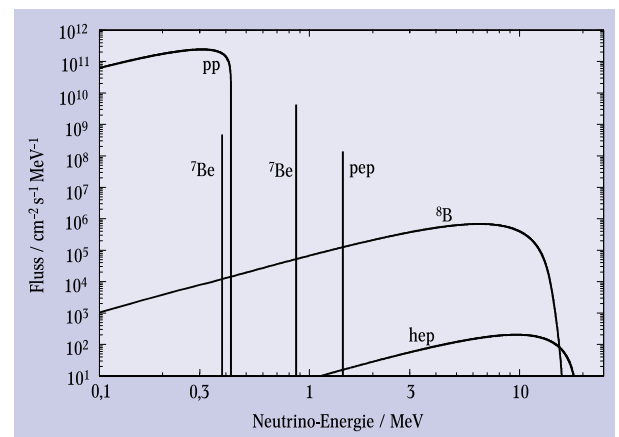
Abb. 4: Das Energiespektrum der Sonnen-Neutrinos. Für die Diskussion des Defizits an Sonnenneutrinos von besonderer Bedeutung sind die pp-Neutrinos (pp) bei niedrigeren Energien, die Be-Neutrino-Linie bei 862 keV (${}^7\text{Be}$) sowie die hochenergetischen Bor-Neutrinos (${}^8\text{B}$). Die mit pep und hep bezeichneten Neutrinos werden in anderen Reaktionen als dem pp-Zyklus erzeugt.

das beobachtete Neutrinodefizit mit einer Reduzierung der Sonnentemperatur zu erklären. Auch ist die Kenntnis der Verzweungsverhältnisse im pp-Zyklus mit Unsicherheiten behaftet. Wenn aber zusätzlich die Resultate von GALLEX und SAGE berücksichtigt werden, lässt sich das Defizit nicht mehr mit den Vorgängen bei den Fusionsprozessen erklären. GALLEX und SAGE weisen die Neutrinos mit der inversen Beta-Reaktion an Gallium nach [9]. Mit der Energieschwelle von 233 keV tragen dabei alle drei der genannten Neutrinoflüsse zum Signal bei, insbesondere auch die pp-Neutrinos. Deren Fluss ist durch die beobachtete Luminosität der Sonne mit hoher Genauigkeit festgelegt. Würden die pp-Neutrinos nicht oszillieren, so müssten sie auch beobachtet werden. Der Fluss der pp-Neutrinos zusammen mit dem von Homestake und KAMIOKANDE nachgewiesenen Fluss von Bor-Neutrinos ist höher als der von

GALLEX und SAGE beobachtete Fluss aller Neutrinos. Der zusätzlich noch erwartete Beitrag der Be-Neutrinos muss daher besonders stark unterdrückt sein. Dies wäre nur mit Neutrinooszillationen plausibel erklärbar. Ausgehend von diesen Ergebnissen wurden neue Experimente aufge-

Abb. 3:

Der größte Teil der Sonnenenergie wird im so genannten pp-Zyklus erzeugt. Dabei werden in der hier gezeigten Reaktionskette je vier Protonen zu einem Heliumkern verschmolzen. Im ersten Schritt, der Fusion zweier Protonen, entstehen die „pp-Neutrinos“ (ν_{pp}). In der Sonne erzeugtes ${}^7\text{Be}$ reagiert entweder durch Elektroneinfang zu ${}^7\text{Li}$, wobei die „Be-Neutrinos“ (ν_{Be}) emittiert werden, oder es fusioniert mit einem Proton, wobei die „Bor-Neutrinos“ (ν_B) erzeugt werden.



baut, um die Auswirkungen der Neutrinooszillationen auf das Energiespektrum direkt zu überprüfen.

Super-KAMIOKANDE, das Nachfolge-Experiment zu KAMIOKANDE und mit einem Target von 22000 t Wasser rund 30-mal größer, wird nach einigen Jahren Messzeit die Verformung des Spektrums der hochenergetischen Bor-Neutrinos sehr genau bestimmen können [2]. Die Beobachtung dieser Verformung wäre ein definitiver Beweis für Neutrinooszillationen.

SNO (Sudbury Neutrino Observatory) verwendet 1000 t schweres Wasser (Deuterium) als Target und kann die Verformung des Bor-Neutrino-Spektrums mit noch höherer Genauigkeit bestimmen [2]. Deuterium lässt sich auf zwei Arten durch Neutrinos spalten: in Proton und Neutron von Neutrinos aller Flavors, oder in zwei Protonen, dies aber nur von Elektron-Neutrinos. Oszillieren die Elektron-Neutrinos der Sonne zu anderen Flavors, so

wird sich das Verhältnis der beobachteten Raten der beiden Spaltungsmöglichkeiten verschieben. Damit wäre nicht nur das Verschwinden der von der Sonne emittierten Elektron-Neutrinos nachgewiesen, sondern erstmals auch das durch Oszillationen verursachte



Abb. 5: Das BOREXINO-Experiment im Gran-Sasso-Untergundlabor in Italien. Zu sehen ist der äußere Tank, der das Experiment zusammen mit der Wasserabschirmung enthalten wird. Der Tank ist etwa 20 m hoch. (Borexino wird gefördert durch die BMBF-Verbundforschung)

Auftauchen anderer Flavors.

Sowohl Super-KAMIOKANDE als auch SNO können aufgrund sehr hoher Energieschwellen nur die Bor-Neutrinos sehen. Zurzeit wird daher im Gran-Sasso-Labor das BOREXINO-Experiment aufgebaut [10] (Abb. 5). In 100 t Flüssigszintillator erreicht BOREXINO eine Energieschwelle von 450 keV und kann gezielt die Be-Neutrino-Linie bei 862 keV beobachten. Ihr kommt nach den bisherigen Ergebnissen eine Schlüsselrolle zu, da sie fast vollständig unterdrückt zu sein scheint. Mit BOREXINO könnte es gelingen, die Oszillationsparameter sehr genau festzulegen. Mit LENS, einem neueren Vorschlag, könnten von den Be-Neutrinos induzierte inverse Beta-Reaktionen direkt beobachtet werden. In der Kombination mit BOREXINO ließe sich damit das Auftauchen anderer Neutrino flavors nachweisen.

Die pp-Neutrinos, die wichtigste Komponente des Neutrinospektrums, werden auch weiterhin von GNO (Gallium Neutrino Observatory), dem GALLEX Nachfolge-Experiment detektiert [2]. Die Target-

masse soll von 30 t Gallium auf bis zu 100 t aufgestockt werden. Zusammen mit Verbesserungen im Nachweis der durch Neutrinos erzeugten Germanium-Atome mithilfe von Tieftemperatur-Kalorimetern lässt sich die Messgenauigkeit erhöhen.

Gemeinsam werden BOREXINO, GNO, SNO und Super-KAMIOKANDE die Energieabhängigkeit der Reduzierung bestimmen. Damit besteht die begründete Hoffnung, in wenigen Jahren die Oszillationsparameter genau festlegen zu können und das schon alte Problem der Sonnen-Neutrinos, einen der klarsten Hinweise auf Physik jenseits des Standardmodells, zu lösen. Mit der Kenntnis der Oszillationsparameter, insbesondere der Neutrinomasse, lässt sich dann sowohl ihr Anteil an der Dunklen Materie im Universum festlegen als auch ein Grundstein für neue Ansätze theoretischer Modelle setzen. Diese Modelle wiederum würden klare Vorhersagen für neue massive schwach wechselwirkende Elementarteilchen (WIMPs) ermöglichen.

Literatur

- [1] G. Raffelt, „Dark Matter: Motivation, Candidates and Searches“, in: Proceedings of European School of High-Energy Physics, Menstrup, Denmark, N. Ellis, M. Neubert (Hrsg.), Genf 1998, Cern Report 98-03 oder hep-ph/9712538
- [2] Proceedings of XVIII Conference on Neutrino Physics & Astrophysics, Japan, 1998, hrsg. von Y. Suzuki und Y. Totsuka, Elsevier 1999 oder Nucl. Phys. B (Proc. Suppl) 77, 1999
- [3] Proceedings of Seventh International Workshop on Low Temperature Detectors, S. Cooper (Hrsg.), Max-Planck-Institut für Physik, München 1997
- [4] R. Bernabei et al., Phys. Lett. B 424, 195 (1998)
- [5] H. V. Klapdor-Kleingrothaus, Int. J. Mod. Phys. A 13, 3953 (1998) oder hep-ph/9910205
- [6] M. Bravin, Astroparticle Physics 12, 107 (1999) oder hep-ex/9904005
- [7] R. Davis, Phys. Rev. Lett. 12, 303 (1964)
- [8] Y. Suzuki, KAMIOKANDE Collab., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 38, 54 (1995)
- [9] GALLEX Collab., Phys. Lett. B 447, 127 (1999) und SAGE Collab., astro-ph/9907113
- [10] L. Oberauer, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl) 77, 48 (1999)