

München (Garching)

Technische Universität München, Physik-Department E15
Lehrstuhl für Experimentalphysik und Astro-Teilchenphysik

James-Franck-Straße, 85748 Garching
Tel.: (0 89) 289-12511, Fax: (0 89) 289-12680
E-Mail: franz.vfeilitzsch@ph.tum.de
Internet: <http://www.e15.physik.tu-muenchen.de>

0 Allgemeines

Der hier vorgelegte Bericht für das Jahr 2007 beschreibt vor allem die astrophysikalischen Arbeiten im Transregional Collaborative Research Center Transregio 27: NEUTRINOS AND BEYOND, WEAKLY INTERACTING PARTICLES IN PHYSICS, ASTROPHYSICS, AND COSMOLOGY, soweit sie den Lehrstuhl betreffen. Die Sprecherfunktion dieses SFB/TR27 liegt beim Lehrstuhl.

Die Forschungsarbeiten konzentrierten sich auf zwei Schwerpunkte: Low-Energy Neutrino Astronomy mit den Experimenten BOREXINO und LENA, und die Suche nach Dunkler Materie mit dem Experiment CRESST.

Der BOREXINO-Detektor wurde Anfang 2007 mit dem Szintillator Pseudokumol gefüllt. Am 16. Mai 2007 wurde mit der Datenaufnahme begonnen. Es ist der erstmalige direkte Nachweis von ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos gelungen. Für den LENA-Detektor wurde eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt, welche zeigen, dass dieser Detektor in hervorragender Weise zur Klärung von Fragestellungen auf folgenden Gebieten beitragen kann: solare Neutrinospektroskopie, Nachweis von Supernovaneutrinos, Nachweis des diffusen Supernovaneutrino-Untergrunds, Nachweis von Geoneutrinos, Suche nach dem Protonzerfall.

Das Ziel des Experiments CRESST ist die Suche nach schwach wechselwirkenden schweren Teilchen (Weakly Interacting Massive Particles, WIMPs) als Kandidaten für die Dunkle Materie. Die verwendeten Detektoren auf der Basis von CaWO_4 -Einkristallen ermöglichen die gleichzeitige Messung des Phononensignals und des bei einer Wechselwirkung ebenfalls erzeugten Szintillationslichts. Dadurch ist eine sehr effektive Unterscheidung zwischen ionisierender Untergrundstrahlung und den eigentlich interessierenden und möglicherweise von WIMPs erzeugten Kernrückstoß-Ereignissen gewährleistet. Im Rahmen der Umbau- bzw. Erweiterungsphase des CRESST-Experiments wurden nach der Vervollständigung der Neutronenabschirmung und des Myonvetos insgesamt 66 neue SQUID-Auslesekanäle für Tieftemperaturdetektormodule installiert. Im Jahr 2007 wurde die WIMP-Suche mit zwei kompletten Phonon-Licht-Detektormodulen durchgeführt. Es wurde eine Empfindlichkeit von 5×10^{-7} pb für den spin-unabhängigen WIMP-Nukleon-Wirkungsquerschnitt bei einer WIMP-Masse von ca. $50 \text{ GeV}/c^2$ erreicht.

1 Personal und Ausstattung

1.1 Personalstand

Direktoren und Professoren:

Prof. Dr. Franz v. Feilitzsch [-12511], Prof. Dr. Lothar Oberauer [-12509].

Wissenschaftliche Mitarbeiter:

Dr. Walter Potzel [-12508], Dr. Marianne Göger-Neff [-12432], Dr. Gunther Korschinek [-14257], Dr. Jean Lanfranchi [-12525], Dr. Mikhail Poutivtsev [-14273], Dr. Georg Rugel [-14273].

Doktoranden:

Dipl.-Phys. Christian Ciemniak [-12516], Dipl.-Phys. Chiara Coppi [-12504], Dipl.-Phys. Christian Isaila [-12504], Dipl.-Phys. Teresa Marrodán-Undagoitia [-12328], Dipl.-Phys. Patrick Pfahler [-14416], Dipl.-Phys. Sebastian Pfister [-12525], Dipl.-Phys. Wolfgang Westphal [-12504], Dipl.-Phys. Michael Wurm [-12328].

Diplomanden:

Achim Gütlein [-12524], Nils-Holger Haag [-12524], Martin Hofmann [-14416], Johannes Lachner [14282], Timo Lewke [-12328], Quirin Meindl [-12328], Sabine Roth [-12525], Sebastian Todor [-14416], Jürgen Winter [-12328].

Sekretariat und Verwaltung:

Lehrstuhl E15: Beatrice van Bellen [-12522]
SFB 375 and TR 27: Alexandra Földner [-12503].

Technisches Personal:

Ursel Heim [-14282], Harald Hess [-12494], Norbert Gärtner [-14289], Thomas Richter [-12521], Erich Seitz [-12521].

2 Lehrtätigkeit, Prüfungen und Gremientätigkeit

2.1 Lehrtätigkeiten

Die Lehrtätigkeit (Kurs- und Spezial-Vorlesungen sowie Seminare) wird im universitätsüblichen Rahmen durchgeführt.

Im Rahmen des SFB/TR27 werden regelmäßig Seminare und Vorlesungen koordiniert und zum Teil auch gemeinsam abgehalten. Der SFB/TR27 ist zusätzlich an Schwerpunktprogrammen und Europäischen Netzwerken zur Förderung des Austausches junger Wissenschaftler beteiligt.

2.2 Prüfungen

Die Prüfungen im Vor- und Hauptdiplom (schriftlich und mündlich) werden den Vorlesungen entsprechend zentral geplant.

2.3 Gremientätigkeit

Prof. Dr. Franz von Feilitzsch:

Mitglied des Executive Board des internationalen BOREXINO-Experiments am Gran Sasso-Untergroundlabor in Italien; Mitglied des TU-Forschungskollegiums des gemeinsam mit der LMU betriebenen Beschleunigerlabors (Maier-Leibnitz-Labor); Vorsitzender des Governing Council des EU-Netzwerks ILIAS (Integrated Large Infrastructure for Astroparticle Science); Mitglied bei verschiedenen Forschungsgebieten (Research Areas) des Exzellenz-Clusters für Grundlagen-Physik 'Origin and Structure of the Universe'; Mit-

glied im EU-network 'Applied Cryodetectors'; Mitglied im Peer Review Committee der ApPEC (Astroparticle Physics - European Coordination); Mitglied im KAT (Komitee für Astro-Teilchenphysik) - Wahl zum Vertreter der Niederenergie-Astrophysik in Deutschland; Mitglied des Rates Deutscher Sternwarten; Mitglied des Gutachterausschusses Helmholtz-Preis.

Prof. Dr. Lothar Oberauer:

Studiendekan des Physik-Departments der TUM; Sprecher des SFB/TR 27 'Neutrinos and Beyond'; Mitglied des Executive Committee des internationalen BOREXINO-Experiments am Gran-Sasso-Untergrundlabor in Italien; Mitglied des Steering Committees der IMPRS on Astrophysics; Scientific advisor of the ISAPP (Int. School on Astroparticle Physics); stellv. Koordinator für Research Area F 'Black Holes' - in Origin and Structure of the Universe - The Cluster of Excellence for Fundamental Physics; Mitglied verschiedener anderer Research Areas dieses Clusters.

3 Wissenschaftliche Arbeiten

3.1 Low-Energy Neutrino Astronomy – BOREXINO, LENA

Teilprojektleiter: L. Oberauer, Stellvertreter: F. v. Feilitzsch

Gruppenmitglieder: M. Göger-Neff, M. Hofmann, G. Korschinek, J. Lanfranchi, T. Lewke, T. Marrodán Undagoitia, P. Pfahler, W. Potzel, J. Winter, M. Wurm.

BOREXINO

Erstmalige Messung von solaren ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos

Die Motivation für BOREXINO, einem Experiment im italienischen Gran Sasso Untergrundlabor, ist die Spektroskopie solarer Neutrinos bei niedrigen Energien über die elastische Streuung an Elektronen. Dabei wird der Rückstoß der Elektronen beobachtet. Das Hauptziel von BOREXINO war der erstmalige direkte Nachweis der monoenergetischen ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos. Dies wurde 2007 erreicht. Die gemessene Ereignisrate ist $\Phi(Be) = 47 \pm 7 \pm 12$ pro Tag in 100t Szintillator. Der so ermittelte Neutrinofluss beträgt damit $\approx 62\%$ des vorhergesagten Wertes des Sonnenmodells und bestätigt somit in einem neuen Energiebereich das Phänomen der Neutrinooszillationen und des Materieeffekts in der Sonne (so genannter MSW-Effekt).

Gelingt es in den nächsten Jahren den Fluss an ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos mit 10% Genauigkeit zu vermessen, kann der pp-Fluss unter Berücksichtigung der solaren Luminosität und der Neutrino-Oszillationsparameter zu etwa 1% genau bestimmt werden. Da die theoretische Unsicherheit des pp-Flusses in der gleichen Größenordnung liegt, kann das Sonnenmodell mit bisher unerreichter Präzision getestet werden. Daneben wird versucht, zum ersten Mal die Neutrinos aus den seltenen pep-Reaktionen sowie Neutrinos aus dem ebenfalls seltenen CNO-Zyklus nachzuweisen. Damit könnte man die thermonuklearen Fusionsreaktionen im Zentrum der Sonne mittels Neutrinospektroskopie sehr präzise untersuchen. Zusammen mit neuen Ergebnissen zu den Wirkungsquerschnitten von Fusionsreaktionen könnte man die Metallizität in der Sonne bestimmen. Zudem sollen solare ${}^8\text{B}$ -Neutrinos unterhalb einer Energie von 5 MeV nachgewiesen werden.

Die Messung des Flusses von Elektron-Antineutrinos aus europäischen Reaktoren testet das KamLAND-Ergebnis zu Neutrinooszillationen. Die Bestimmung der Neutrinos aus der Erde wird neue Erkenntnisse zu geophysikalischen Fragen erbringen. Im Falle einer galaktischen Supernova in 10kpc Abstand wird BOREXINO etwa 80 Neutrinoereignisse registrieren. In 2007 wurden in BOREXINO auch Signale hochenergetischer ν_μ -Neutrinos vom CERN-Beschleuniger eindeutig nachgewiesen.

Status des Experiments

Ein transparenter Nylonballon beinhaltet das Target das aus einem 300t Flüssigszintillator besteht. Das Szintillationslicht wird von 2200 Photomultiplier (PM) registriert. Diese sind an der Innenseite einer Stahlkugel mit 14m Durchmesser befestigt. Der Zwischenraum zum Nylonballon wird durch eine transparente, nicht szintillierende Flüssigkeit (der so genannte Buffer) aufgefüllt. Ein weiterer Nylonballon verhindert die Konvektion von Radon. Die Stahlkugel befindet sich in einem weiteren Stahldom mit 18m Höhe und Durchmesser. Er ist mit reinem Wasser gefüllt und dient als Cherenkov-Detektor, um von außen eindringende Myonen zu registrieren. Dazu wurden 208 PMs auf dem Boden des Stahldoms und an der Außenwand der Stahlkugel positioniert.

Anfang 2007 wurde der Detektor mit dem Szintillator (Pseudokumol) gefüllt. Am 16. Mai wurde mit der Datennahme begonnen. Bereits nach wenigen Tagen zeichnete sich die für ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos charakteristische Rückstoßkante bei 660 keV aus. Im August 2007 konnte dann obiges Resultat veröffentlicht werden. Bereits jetzt dominiert die systematische Unsicherheit gegenüber dem statistischen Fehler. Durch eine sorgfältige Eichung des Detektors und der damit einhergehenden Bestimmung des so genannten 'Fiducial Volume' wird die Gesamtunsicherheit auf unter 10% gesenkt werden können. Wir erwarten in 2008 auch erste Daten, zumindest neue Obergrenzen, für die seltenen pep- und CNO-Neutrinos. Hauptuntergrund dazu sind von kosmischen Myonen erzeugte langlebige Radioisotope (im Wesentlichen ${}^{10}\text{C}$ und ${}^{11}\text{C}$). Mittels Spur-Rekonstruktion der Myonen und der Erkennung von Neutronen, die bei der Wechselwirkung der Myonen mit ${}^{12}\text{C}$ Kernen des Szintillators entstehen, soll dieser Untergrund unter die Signalrate gedrückt werden.

Eigene Arbeiten

In 2007 wurden zwei Diplomarbeiten begonnen; eine wurde Ende 2007 abgeschlossen. Sie beschäftigte sich mit der Effizienz des Myondetektors. Die zweite Diplomarbeit wird Anfang 2008 abgeschlossen werden. Sie untersucht die experimentellen Bedingungen, die erfüllt sein müssen, um den kosmogenen Untergrund zu erkennen und damit den pep- und CNO-Neutrino nachweis zu ermöglichen.

LENA, Low-Energy Neutrino Astronomy

An unserem Lehrstuhl werden das wissenschaftliche Potenzial und die technische Realisierbarkeit eines ca. 50 kt großen Szintillationsdetektors (genannt LENA-Detektor) untersucht. Folgende Fragestellungen sind von größter Bedeutung:

- a) Solare Neutrinospektroskopie
- b) Nachweis von Neutrinos, die bei einer Supernovaexplosion (im Zentrum der Milchstraße) entstehen
- c) Nachweis des sog. diffusen Supernova-Neutrino untergrunds, der durch Neutrinos hervorgerufen wird, die aus Supernovaexplosionen seit Bestehen des Universums entstanden sind
- d) Nachweis von Elektron-Antineutrinos aus dem Inneren der Erde, sog. Geoneutrinos, die beim radioaktiven Zerfall bei den Zerfallsketten von ${}^{238}\text{U}$ und ${}^{232}\text{Th}$ entstehen
- e) Suche nach dem Zerfall des Protons

Der LENA-Detektor soll als doppelwandiger Zylinder mit einem Durchmesser von 30 m und einer Länge von ca. 100 m aufgebaut werden. Der innere Bereich mit 13m Radius wird mit ca. 50 kt Flüssigszintillator gefüllt, während der äußere Bereich Wasser enthalten wird, das zur Abschirmung äußerer radioaktiver Strahlung und gleichzeitig als Myonveto verwendet wird. Annähernd 15 000 Photomultiplier werden das Licht nachweisen, das vom Szintillator bei einer Teilchenwechselwirkung erzeugt wird. Als Flüssigszintillator wurden mehrere Varianten untersucht. Zwei Ergebnisse sind besonders beachtenswert: i) Ein Szintillator bestehend aus PXE (phenyl-o-xylylethane, $\text{C}_{16}\text{H}_{18}$), in welchem ~ 2 g/l PPO und 20 mg/l bis-MSB, die als Fluor und Wellenlängenschieber fungieren, gelöst sind. Bei einer Abschwächlänge von 12 m kann eine Photoelektroneneffizienz von ca. 180 pe/MeV erwartet werden. ii) Ein Szintillator wie bei i), bei dem jedoch PXE durch LAB (linear alkylbenzene)

ersetzt wird. LAB hat den Vorteil, dass die Abschwächlänge noch größer ist als bei PXE, die Lichtausbeute jedoch bei allen hier untersuchten Fluors und Wellenlängenschiebern sehr ähnlich ist wie bei PXE. Der Fluor und Wellenlängenschieber PMP (1-Phenyl-3-Mesityl-2-Pyrazolin) reduziert die Lichtausbeute sowohl bei PXE als auch bei LAB auf etwa 80% des Wertes, der für die anderen Fluore gefunden wurde. Beim gegenwärtigen Stand der Experimente muss betont werden, dass weitere Eigenschaften, insbesondere die charakteristischen Abfallszeiten des Szintillationslichts noch untersucht werden müssen, bevor eine endgültige Empfehlung hinsichtlich eines optimalen Szintillators gegeben werden kann.

Der Detektor ist für eine Schwelle von 250 keV (entspricht 30 Photoelektronen) geplant und sollte in einem Untergrundlaboratorium mit mehr als 4000 m.w.e. aufgebaut werden, um den Myonenuntergrund genügend zu unterdrücken. In Europa werden zwei Untergrundlaboratorien favorisiert: CUPP (Center of Underground Physics in Pyhäsalmi) in Finnland und das Deep-sea Nestor-Laboratorium in Pylos, Griechenland. Beide Laboratorien sind durch eine Abschirmung von ~ 4000 m.w.e. ausgezeichnet und sind auch weit genug weg von nuklearen Leistungsreaktoren, die zum Elektron-Antineutrino-Untergrund bei den Messungen des diffusen Supernova-Neutrino-Untergrunds den größten Beitrag liefern.

a) Der LENA-Detektor wird solare ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos über Neutrino-Elektron-Streuung mit einer Rate von ~ 5400 Ereignissen pro Tag nachweisen können. Dadurch sollte es möglich sein, zur Helioseismologie komplementäre Information, z.B. bzgl. Druck- und Temperaturschwankungen, sowie hinsichtlich magnetischer Wechselwirkungen in einem zeitlich veränderlichen solaren Magnetfeld, zu erhalten. Solare Neutrinos aus der pep-Reaktion werden mit einer Rate von ~ 210 Ereignissen pro Tag erwartet. Der LENA-Detektor könnte zu einer Bestimmung der CNO-Neutrinorate wesentlich beitragen. Auch bei der Untersuchung des Materieeffekts (MSW-Effekt) kann LENA eine herausragende Rolle spielen. Da der Übergang von Vakuumoszillationen zu Materie-induzierten Oszillationen im Energiebereich zwischen 1 und 2 MeV erwartet wird, sind hierfür die Neutrinos aus den pep- und ${}^7\text{Be}$ -Reaktionen besonders gut geeignet.

b) Mit dem LENA-Detektor wird es möglich sein, über folgende Reaktionen den Gravitationskollaps einer galaktischen Supernova des Typs IIa im Detail zu verfolgen:

- 1) $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ ($Q = 1.8$ MeV)
- 2) $\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow e^+ + {}^{12}\text{B}$ ($Q = 17.3$ MeV)
- 3) $\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N} + e^-$ ($Q = 13.4$ MeV)
- 4) $\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{C}^* + \nu_x$ mit ${}^{12}\text{C}^* \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$ ($E_\gamma = 15.1$ MeV)
- 5) $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$ (elastic scattering)
- 6) $\nu_x + p \rightarrow \nu_x + p$ (elastic scattering).

Dabei kann sehr genau über den inversen Betazerfall (Reaktion 1) der spektrale Fluss von Elektron-Antineutrinos zeitaufgelöst gemessen werden. Bei einer Supernova von 8 Sonnenmassen im Zentrum der Milchstraße werden bei Reaktion 1 eine Rate von ca. 9200, bei Reaktion 2 von ca. 250 Ereignissen erwartet. Der Fluss an Elektronneutrinos ist mit Reaktion 3 zu messen (500 Ereignisse) und über die neutrale Stromwechselwirkung von Reaktion 4 (ca. 1250 Ereignisse) kann der Gesamtfluss der Supernovaneutrinos ermittelt werden. Über die Streureaktionen 5 (ca. 700 Ereignisse) und 6 (ca. 2350 Ereignisse) wird das Energiespektrum aller Neutrino flavors gemessen. Durch eine zeit-aufgelöste Messung sollte es möglich sein, verschiedene Modelle zum Gravitationskollaps zu unterscheiden. Bei einer Supernovaexplosion wird erwartet, dass die Neutrinoereignisse innerhalb einer verhältnismäßig kurzen Zeit von typischerweise 10 Sekunden im Detektor stattfinden. Deshalb wurde ein Monte-Carlo-Programm entwickelt mit dem Ziel, verschiedene Ereignis-Typen durch eine Ortsrekonstruktion innerhalb des Detektors zu trennen. Die Monte-Carlo-Simulationen zeigen, dass bei einem Ereignis mit einer Energiedeposition von 10 MeV eine Ortsauflösung von ca. 20 cm erreicht werden kann. Dadurch sollte es möglich sein, unterschiedliche Ereignis-Typen korrekt zuzuordnen.

c) In einem großen Szintillationsdetektor wie LENA können diffuse Supernova-Neutrinos (DSN) in einem nahezu untergrundfreien Energiefenster zwischen ~ 10 und 25MeV nachgewiesen werden. Dazu wird der inverse Betazerfall als Nachweisreaktion verwendet. Eine hohe Unterdrückung von Untergründereignissen wird durch den Nachweis des bei der Reaktion entstehenden Neutrons erreicht. Oberhalb von $\sim 10\text{MeV}$ ist der Beitrag der Reaktor-neutrinos i. Vgl. zum DSN-Fluss vernachlässigbar klein. Oberhalb von $\sim 25\text{MeV}$ dominiert jedoch der Fluss atmosphärischer Elektron-Antineutrinos. An unserem Institut durchgeführte Rechnungen zeigen, dass für den LENA-Detektor im CUPP-Laboratorium (Pyhäsalmi, Finnland) - abhängig von der Supernova-Rate - zwischen 6 und 13 DSN-Ereignissen pro Jahr im oben genannten Energiefenster zu erwarten sind, wobei $\sim 25\%$ dieser DSN-Ereignisse dem Rotverschiebungsbereich zwischen $1 \leq z \leq 2$ zuzuordnen sind. Falls bei einer Messzeit von 10 Jahren kein Signal beobachtet wird, kann eine untere Grenze von $0.13\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ für den DSN-Fluss oberhalb von 19.3MeV erreicht werden, was einer Verbesserung von etwa einem Faktor 9 gegenüber dem Limit des Super-Kamiokande-Detektors entspricht. Die beim LENA-Detektor im Energiebereich zwischen 10.5 und 19.3MeV erreichbare untere Grenze von $0.3\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ liegt etwa um den Faktor 5 unterhalb der Rate, die gegenwärtige Modelle vorhersagen. LENA wird deshalb nicht nur die Möglichkeit bieten, DSN zum ersten Mal nachzuweisen, sondern auch in der Lage sein, verschiedene Modelle für Core-Collapse-Supernovae zu testen und Aussagen zur z -Abhängigkeit der Supernovarate zu treffen.

d) Um den Nachweis von Elektron-Antineutrinos aus dem Erdinneren mit dem LENA-Detektor zu untersuchen, wurden an unserem Institut Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Es zeigte sich, dass der Geoneutrinofluss mit hoher Signifikanz nachgewiesen werden kann. Im CUPP-Laboratorium (Finnland) können im LENA-Detektor ~ 1000 Ereignisse pro Jahr erwartet werden. Das ermöglicht Vorhersagen verschiedener geophysikalischer Modelle für den Gesamtfluss an Geoneutrinos und zum Neutrinospektrum zu überprüfen. Die Rechnungen zeigen weiterhin, dass ein hypothetischer Georeaktor im Erdkern von 2TW Leistung nach einer Messzeit von bereits einem Jahr mit einer statistischen Signifikanz von 3σ identifiziert werden könnte.

e) Der LENA-Detektor erreicht eine einzigartige Empfindlichkeit hinsichtlich des Protonzerfallskanals $p \rightarrow K^+\bar{\nu}$. Die hohe Empfindlichkeit wird durch die gute Energieauflösung des Szintillators ermöglicht, die wiederum auf einem im Vergleich zu einem Wasser-Cherenkovdetektor etwa 50 mal größeren Lichtsignal (bei Energien unterhalb von 1GeV) beruht. Der oben erwähnte Zerfallsmodus wird von zahlreichen Supersymmetrischen Theorien favorisiert, wobei eine Protonlebensdauer τ kleiner als 10^{35}y vorhergesagt wird. Die bisherige experimentelle Grenze dieses Zerfallskanals von $\tau > 2.3 \cdot 10^{33}\text{y}$ wurde im Super-Kamiokande-Experiment erreicht. Monte-Carlo-Rechnungen, die an unserem Institut für den LENA-Detektor durchgeführt wurden, zeigen, dass für diesen Zerfallsmodus bei zehnjähriger Messzeit eine untere Grenze von $\tau > 4 \cdot 10^{34}\text{y}$ mit 90% C.L. erreicht werden kann.

3.2 Suche nach Dunkler Materie mit CRESST und EURECA

Teilprojektleiter: W. Potzel, Stellvertreter: J. Jochum, H. Clement

Gruppenmitglieder: C. Cierniak, C. Coppi, F. von Feilitzsch, A. Gütlein, C. Isaila, J. Lanfranchi, S. Pfister, S. Roth, W. Westphal.

Einleitung

Eine Vielzahl von Messungen (vor allem kosmische Hintergrundstrahlung, Rotationskurven von Galaxien, Gravitationslinsen) zeigen, dass weniger als 1% der gesamten Masse-Energiedichte des Universums in leuchtender Form vorliegt. Nur etwa 4% sind normale (baryonische) Materie. Insgesamt macht Materie jedoch ca. 30% aus, d. h. ca. 26% der gesamten Materiedichte wird durch nicht-baryonische Dunkle Materie gebildet. Der weitaus größte Teil (70%) der gesamten Masse-Energiedichte des Universums wird durch die sog-

nannte Dunkle Energie hervorgerufen. Die physikalische Natur der Dunklen Energie und der Dunklen Materie ist bisher völlig ungeklärt.

Viele Wissenschaftler vertreten die Ansicht, dass es eine weitere Klasse von bislang unbeobachteten Teilchen gibt, die als nicht-baryonische Materie den dominanten Beitrag zur Dunklen Materie liefert. Aussichtsreiche Kandidaten für diese nicht-baryonische Materie sind schwach wechselwirkende, schwere Teilchen oder *Weakly Interacting Massive Particles* (WIMPs). Supersymmetrische Theorien erfordern in der Tat die Einführung einer Vielzahl neuer Teilchen. Es wird vermutet, dass das leichteste dieser Teilchen (das sog. Neutralino) stabil und neutral und damit ein idealer Kandidat für die Dunkle Materie ist.

Das CRESST-Experiment

Eine vielversprechende Möglichkeit zum direkten Nachweis von WIMPs ergibt sich durch Streuung von WIMPs an Atomkernen. Für eine kohärente Wechselwirkung wird erwartet, dass der Wechselwirkungsquerschnitt quadratisch mit der Zahl der Nukleonen im Atomkern zunimmt, weshalb sich schwere Kerne besonders gut zum Nachweis eignen. Die bei einer WIMP-Streuung deponierte Energie liegt im Bereich von einigen keV.

Eine ganz wesentliche Schwierigkeit bei Experimenten zur direkten Suche nach WIMPs ist die geringe Ereignisrate. Vermeidung und Diskriminierung von Untergrund durch kosmische Strahlung oder Radioaktivität aus der Umgebung oder auch aus Detektormaterialien ist deshalb eine zentrale Voraussetzung für eine Beobachtung von WIMPs.

CRESST (*Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers*) ist ein Experiment zur direkten Suche nach WIMPs. Um die geringen bei einer WIMP-Wechselwirkung umgesetzten Energiemengen messen zu können, setzt CRESST Tieftemperaturdetektoren ein, bei denen die Energiedeposition im Targetmaterial über ein thermisches Signal bestimmt wird. Als Target werden szintillierende CaWO_4 -Kristalle verwendet. Dadurch ist es möglich, bei einem Streuprozess nicht nur das thermische Signal sondern auch das Lichtsignal zu messen. Dieses Lichtsignal wird in einem Si-Absorber in Wärme umgewandelt und über einen zweiten Tieftemperaturdetektor nachgewiesen. Die Ausbeute an Szintillationslicht hängt von der Art der Teilchenwechselwirkung ab: bei Kernrückstößen, wie sie von WIMPs oder Neutronen hervorgerufen werden, wird ein sehr viel geringerer Teil der Energie in Licht umgesetzt, als bei Elektronrückstößen, wie sie durch sonstige radioaktive Strahlung erzeugt werden. Zusammen mit einer guten Abschirmung gegen kosmische Strahlung (das Experiment steht im Gran Sasso-Untergrundlabor mit ca. 3600 m Wasseräquivalent Abschirmung) und Gamma-Strahlung (ca. 30 t Blei und Kupfer) kann so der Untergrund durch Elektronrückstöße oberhalb etwa 12 keV vollständig beseitigt werden.

Durch Neutronen hervorgerufene Untergrundereignisse

Aufgrund der Zusammensetzung der CRESST-Detektoren aus Atomen mit sehr unterschiedlicher Masse (Sauerstoff, Kalzium, Wolfram) besteht grundsätzlich auch die Möglichkeit, Untergrund von Neutronenereignissen zu diskriminieren: WIMPs wechselwirken bevorzugt mit schweren Kernen (Wolfram des CaWO_4 -Kristalls) während das Signal von Neutronen durch Rückstöße leichter Kerne (Sauerstoff) dominiert wird. Am Tandem-Beschleuniger des Maier-Leibnitz-Labors wurde ein Neutronenstreuexperiment mit einem monoenergetischen gepulsten Neutronenstrahl und einem ^3He - ^4He -Entmischungskryostaten hoher Kühlleistung aufgebaut.

Nach Optimierung der mechanischen Aufhängung konnten Vibrationen weitgehend unterdrückt werden, sodass routinemäßig Temperaturen von $\leq 10\text{mK}$ erreicht werden. In einem Neutronenstreuexperiment mit einem monoenergetischen (11 MeV) Neutronenstrahl wurde ein Tieftemperaturdetektor mit einem CaWO_4 -Einkristall von 20 mm Durchmesser und 5 mm Dicke auf $\sim 15\text{mK}$ abgekühlt. Der Messaufbau an der Mischkammer ist gegenwärtig mit 2 (in Zukunft mit bis zu 4) SQUID-Auslesekanälen bestückt, um die bei Neutronenstreuexperimenten in CaWO_4 -Einkristallen deponierte Energie jeweils in Form eines Phononen- und eines Lichtsignals auslesen zu können. Erste Messungen dieser Art Ende des Jahres 2007 verliefen sehr vielversprechend. Es sollte in der Tat auf diese Weise mög-

lich sein, Wolfram-, Kalzium- und Sauerstoffrückstöße bei ähnlich tiefen Temperaturen zu unterscheiden, bei denen auch die CRESST-Messungen im Gran Sasso-Labor durchgeführt werden.

Erhöhung der Empfindlichkeit der Lichtdetektoren

Beim CRESST-Experiment werden für die Untergrunddiskriminierung hoch empfindliche Lichtdetektoren benötigt, da nur ein kleiner (1-2%) Bruchteil der durch ein einfallendes Teilchen im CaWO_4 -Einkristall deponierten Energie in Form von Licht emittiert wird. Die Schwelle der Lichtdetektoren kann durch Anwendung des Neganov-Luke-Effekts beträchtlich verbessert werden. Hierbei werden die im Si-Absorber durch das Licht erzeugten Ladungsträger (Elektron-Loch-Paare) durch ein angelegtes elektrisches Feld beschleunigt. Durch Stöße der Ladungsträger mit dem Gitter werden zusätzlich Phononen erzeugt und auf diese Weise das durch das Licht ausgelöste Phononensignal verstärkt. Die Ende 2007 durchgeführten Experimente verliefen sehr vielversprechend: es konnte eine Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses um den Faktor 3 erreicht werden.

Erweiterung des CRESST-Experiments: erste Ergebnisse, zukünftige Projekte

Bereits im Jahr 2006 wurde der experimentelle Aufbau beträchtlich erweitert: Um die Empfindlichkeit von CRESST weiter zu verbessern, wurde der gesamte Messaufbau mit einem Neutronenmoderator aus etwa 50 cm Polyäthylen umgeben. Außerdem wurde zur Identifikation von myoneninduzierten Untergrundereignissen ein Myonveto-Detektor installiert. Insgesamt wurden 66 neue SQUID-Auslesekanäle eingebaut, was eine Vergrößerung der Targetmasse auf etwa 10 kg erlaubt. Um alle CaWO_4 -Detektoren während des Betriebs unabhängig voneinander überprüfen zu können, wurde eine mit Pressluft betriebene Vorrichtung eingebaut, die es ermöglicht, γ -Eichquellen in der Nähe jedes einzelnen CaWO_4 -Detektors zu positionieren. Der Kryostat arbeitet auch nach dem Umbau sehr zuverlässig. Im Jahr 2007 wurden mehrere CRESST-Messungen mit dem erweiterten Aufbau durchgeführt. Bei diesen Messungen konnten zwei Phonon-Licht-Detektormodule verwendet werden. Es wurde eine Empfindlichkeit von 5×10^{-7} pb für den spin-unabhängigen WIMP-Nukleon-Wirkungsquerschnitt bei einer WIMP-Masse von ca. $50 \text{ GeV}/c^2$ erreicht.

Mit dem erweiterten Aufbau soll die Empfindlichkeit von CRESST auf etwa 10^{-8} pb gesteigert werden. Damit können bereits zentrale Bereiche der Vorhersage der Supersymmetrie getestet werden. Jedoch liegt der theoretisch favorisierte Bereich bei Wirkungsquerschnitten von $10^{-8} - 10^{-10}$ pb. Um diesen Bereich ausschöpfen zu können, sind wesentlich größere Targetmassen (zwischen einigen 100 und etwa 1000 kg) notwendig. Daher wird innerhalb Europas ein neues Projekt unter dem Namen EURECA (*European Underground Rare Event Calorimeter Array*) vorgeschlagen, in dem die europäische Expertise für die Suche nach Dunkler Materie mit Tieftemperaturdetektoren gebündelt ist. Ein wesentliches Ziel von EURECA ist die Verwendung von mehreren unterschiedlichen Targetmaterialien zur eindeutigen Identifikation der WIMPs. Um diese Ziele, Verwendung von großen Targetmassen und von unterschiedlichen Targetmaterialien erreichen zu können, wurde an unserem Institut die sog. composite detector technique entwickelt. Bei dieser Technik kann die Herstellung der supraleitenden Thermometer und der Targeteinkristalle unabhängig voneinander optimiert werden: Die supraleitenden Thermometer werden auf jeweils eigene Substrate gesputtert, getestet und danach zusammen mit dem Substrat auf den vorher überprüften Target-Einkristall geklebt. Unsere Messungen zeigten, dass die composite detector technique eine äußerst vielversprechende Methode darstellt, um Temperaturdetektoren mit großer Reproduzierbarkeit und Empfindlichkeit herzustellen, wie es für die großen Targetmassen des EURECA-Experiments erforderlich ist.

4 Diplomarbeiten, Dissertationen, Habilitationen

4.1 Diplomarbeiten

Gütlein, Achim: Entwicklung von Kryodetektoren zum Nachweis kohärenter Neutrinostrahlung an Atomkernen.

Hofmann, Martin: Low-background gamma spectroscopy for the neutrino oscillation experiment DOUBLE CHOOZ.

Lewke, Timo: Calibration and efficiency determination of the Borexino muon veto based on the first realtime measurements of the ^7Be solar neutrinos.

Roth, Sabine: Sputtered tungsten thin films and composite detectors for the application in the Dark Matter experiments CRESST and EURECA.

Winter, Jürgen: Phenomenology of super nova neutrinos, spatial event reconstruction, and scintillation-light yield measurements for the liquid-scintillator detector LENA.

5 Auswärtige Tätigkeiten

5.1 Kooperationen

Das Institut ist Mitglied im EU-Netzwerk 'Applied Cryodetectors', des ILIAS-Projektes (Integrating Large Infrastructures for Astroparticle Sciences), sowie der IMPRS on Astrophysics. Auf dem Gebiet der Neutrinophysik und Neutrinoastronomie ist das Institut an den internationalen Projekten BOREXINO, DOUBLE-CHOOZ und LAGUNA (Large Apparatus for Grand Unification and Neutrino Astronomy) beteiligt.

Innerhalb des SFB/TR 27 'Neutrinos and Beyond', der den SFB 375 'Astro-Teilchenphysik' ablöste, ergab sich eine Reihe von direkten Kooperationen einzelner Teilprojekte, deren Ergebnisse und Erfahrungen in die Projekte eingeflossen sind.

Viele der Forschungsarbeiten innerhalb des SFB/TR 27 erfolgen im Rahmen internationaler Kooperationen, mithin ideale Voraussetzungen für sämtliche Mitarbeiter, internationale Kontakte zu knüpfen und zu entwickeln. Dies wiederum führt häufig nach der Promotion zu exzellenten Angeboten, sich in Richtung Ausland - insbesondere in die USA - zu orientieren.

In Zusammenarbeit mit der Firma KETEK GmbH, Oberschleißheim, werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet hoch empfindlicher Strahlungsdetektoren unter Anwendung des Neganov-Luke-Effekts durchgeführt.

6 Veröffentlichungen

Arpesella, C., et al., (BOREXINO coll.): First real time detection of ^7Be solar neutrinos by Borexino. *Phys. Lett. B* **658** (2008), 101–108. e-Print: arXiv: 0708.2251 [astro-ph].

Autiero, D., et al.: Large underground, liquid based detectors for astro-particle physics in Europe: Scientific case and prospects. *JCAP* **0711** (2007), 11–39. e-Print: arXiv: 0705.0116 [hep-ph].

Back, H. O., et al., (BOREXINO coll.): Response to a critique of the Borexino result in 'A new experimental limit for the stability of the electron' by H.V. Klapdor-Kleingrothaus, I.V. Krivosheina and I.V. Titkova. e-Print: hep-ex/0703044.

Bilenky, S. M., et al.: Recoilless resonant neutrino capture and basics of neutrino oscillations. *J. Phys. G* **34** (2007), 987–997. e-Print: hep-ph/0611285.

Bilenky, S. M., et al.: Recoilless resonant neutrino experiment and origin of neutrino oscillations. *AIP Conf. Proc.* **944** (2007), 119–129. e-Print: arXiv: 0705.0345 [hep-ph].

Gil-Botella, I., et al., (Double Chooz coll.): The Double Chooz reactor neutrino experiment.

e-Print: arXiv: 0710.4258 [hep-ex].

Hochmuth, K. A., et al.: Probing the Earth's interior with a large-volume liquid-scintillation detector. *Astropart. Phys.* **27** (2007), 21–29. e-Print: hep-ph/0509136

Maricic, J., et al., (Double Chooz coll.): The quest for Θ_{13} angle with the Double Chooz detector. *AIP Conf. Proc.* **928** (2007), 161–168.

Tonazzo, A., et al., (Double Chooz coll.): The Double Chooz detector. *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **172** (2007), 41–44.

Wurm, M., et al.: Detection potential for the diffuse supernova neutrino background in the large liquid-scintillator detector LENA. *Phys. Rev. D* **75** (2007), 023007-1–023007-11. e-Print: astro-ph/0701305.

Wurm, M., et al.: Low energy neutrino astrophysics with the large liquid-scintillator detector LENA. *AIP Conf. Proc.* **944** (2007), 82–91.

Franz von Feilitzsch