

München (Garching)

Lehrstuhl für Experimentalphysik und Astro-Teilchenphysik
Physik-Department E 15
Technische Universität München

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

0 Allgemeines

Der hier vorgelegte Bericht für das Jahr 2005 beschreibt vor allem die Arbeiten im SFB 375: ASTRO-TEILCHENPHYSIK, soweit sie den Lehrstuhl betreffen. Der Lehrstuhlinhaber ist Initiator und Sprecher dieses SFB.

Die Forschungsarbeiten konzentrierten sich auf mehrere Schwerpunkte: die Spektroskopie solarer Neutrinos mit den Experimenten GNO (Nachfolge von GALLEX) und BOREXINO, die Suche nach Dunkler Materie mit dem Experiment CRESST, sowie Machbarkeitsstudien für einen großen Flüssigszintillationsdetektor LENA. Das Experiment GNO wurde abgeschlossen. Die vollständigen Resultate der GNO-Messungen über fünf Jahre werden hier diskutiert. Der BOREXINO-Detektor wurde im Jahr 2005 fertig gestellt. Allerdings konnte im Jahr 2005 wegen sicherheitstechnischer Auflagen und Umbauarbeiten, die das gesamte Gran-Sasso-Untergrundlabor betreffen, der BOREXINO-Tank noch nicht mit Szintillatorflüssigkeit gefüllt werden. Der Schwerpunkt der Experimente GNO und BOREXINO liegt auf astrophysikalischen Fragestellungen: möglichst genaue Messungen des solaren Neutrinoflusses, insbesondere des dominierenden pp-Neutrinozweiges und der monoenergetischen ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos, sind von entscheidender Bedeutung für den Vergleich mit Ergebnissen von Modellrechnungen für die Sonne und für Theorien zur Sternentwicklung.

Für den LENA-Detektor wurden Monte-Carlo-Rechnungen durchgeführt, die den Protonzerfall in ein K^+ und ein Antineutrino simulieren. Es konnte gezeigt werden, dass mit dem LENA-Detektor bei zehnjähriger Messzeit eine untere Grenze für die Protonlebensdauer von $\tau > 4 \cdot 10^{34}$ y at 90% C.L. erreicht werden kann.

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. Das Experiment CRESST befindet sich in einer Umbauphase, in der die Masse des CaWO_4 -Detektormaterials von 0.3kg auf insgesamt 10kg erhöht wird. Eine Wiederaufnahme der Messungen ist für das Jahr 2006 geplant.

1 Personal und Ausstattung

1.1 Personalstand

Lehrstuhlinhaber:

Prof. Dr. Franz von Feilitzsch

Professoren und Privatdozenten:

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

Wissenschaftliche Mitarbeiter:

Dr. Walter Potzel [-12508], Dr. Wolfgang Rau [-12516], Dr. Loredana Gastaldo [-12522], Dr. Marianne Göger-Neff [-12432], Dr. Klaus Knie [-14257], Dr. Gunther Korschinek [-14257], Dr. Ludwig Niedermeier [-12328], Dr. Mikhail Poutivtsev [-14273], Dr. Georg Rugel [-14273], Dr. Michael Stark [-12516], Dipl.-Phys. Doreen Wernicke [-14416].

Doktoranden:

Dipl.-Phys. Davide D'Angelo [-12328], Dipl.-Phys. Chiara Coppi [-12504], Dipl.-Phys. Christian Hollerith, Dipl.-Phys. Christian Isaila [-12504], Dipl.-Phys. Tobias Lachenmaier [-12525], Dipl.-Phys. Jean-Côme Lanfranchi [-12525], Dipl.-Phys. Christian Lendvai [-12328], Dipl.-Phys. Teresa Marrodán Undagoitia [-12328], Dipl.-Phys. Herbert Reithmeier [-12704], Dipl.-Phys. Michael Stark [-12516], Dipl.-Phys. Wolfgang Westphal [-12504].

Diplomanden:

Kathrin Hochmuth [-12524], Emanuel Hofmann [-12328], Astrid Meier [-14282], Patrick Pfahler [-12328], Sebastian Pfister [-12525], Michael Wurm [-12524].

Sekretariat:

Lehrstuhl E15: Beatrice van Bellen [-12522]
SFB 375: Alexandra Földner [-12503]

Technisches Personal:

Harald Hess [-12494], Norbert Gärtner [-14289]

Werkstatt:

Erich Seitz [-12494], Thomas Richter [-12494]

1.2 Personelle Veränderungen

Ausgeschieden:

Dr. Christian Grieb: Virginia Tech, Blacksburg, VA/USA
Dr. Thomas Jagemann: European Space Agency (ESA), Noordwijk, NL
Dr. Tobias Lachenmaier: Universität Tübingen
Dr. Christian Lendvai: Lawrence Livermore Lab., Berkeley, CA/USA
Dr. Ludwig Niedermeier: Universität Tübingen
Dr. Herbert Reithmeier: LMU München
Dr. Michael Stark: Industrie, Forchheim
Dipl.-Phys. Doreen Wernicke: Industrie, Ismaning (LKr. München)

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 375 werden regelmäßig Seminare und Vorlesungen koordiniert und zum Teil auch gemeinsam abgehalten. Der SFB 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:

Initiator und Sprecher des SFB 375 – Astro-Teilchenphysik, an dem zwei Max-Planck-Institute sowie die Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) beteiligt sind; Mitglied des Executive Committee des internationalen BOREXINO-Experiments am Gran-Sasso-Untergrundlabor 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 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:

Seit Beginn des Wintersemesters 2005/06 Studiendekan des Physik-Departments der TUM; Mitglied des Steering Committee der IMPRS on Astrophysics

3 Wissenschaftliche Arbeiten

3.1 Low-Energy Neutrino Astronomy – GNO, BOREXINO, LENA

Teilprojektleiter: L. Oberauer, Stellvertreter: W. Potzel

Gruppenmitglieder: D. D'Angelo, F. v. Feilitzsch, M. Göger-Neff, K. Hochmuth, G. Korschinek, T. Lachenmaier, J.-C. Lanfranchi, C. Lendvai, T. Marrodán Undagoitia, L. Niedermeier, M. Wurm.

Die wesentlichste Aufgabe des GNO-Experiments war die Bestimmung des niederenergetischen (sub-MeV) Anteils im solaren Neutrino-Spektrum. Ein vorrangiges Ziel des BOREXINO-Experiments ist die erste direkte Messung des ${}^7\text{Be}$ -Neutrino-flusses über die Neutrinostreuung an Elektronen. Die Schwerpunkte des Projekts Low-Energy Neutrino Astronomy (LENA) sind auf dem Gebiet der Astroteilchenphysik die Entwicklung einer Echtzeit-Neutrinoastronomie, um Einzelheiten der solaren Fusionsprozesse in der Sonne und der Explosionsvorgänge bei Supernova-Explosionen untersuchen zu können, sowie die Messung des sog. diffusen Supernova-Neutrinountergrunds, wodurch Rückschlüsse auf die frühe Sternbildungsrate ermöglicht werden. Im Bereich der Geophysik steht die Messung der Geoneutrinos im Vordergrund. Auf dem Sektor der Elementarteilchenphysik ist die Bestimmung der Protonlebensdauer ein Hauptziel von LENA.

Gallium Neutrino Observatory (GNO)

Im GNO-Experiment, das in den Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Italien) aufgebaut war, wurden solare Neutrinos über die charged current (CC) - Reaktion ${}^{71}\text{Ga}(\nu_e, e){}^{71}\text{Ge}$ nachgewiesen. Aufgrund der niedrigen Energieschwelle von 233 keV war das Experiment hauptsächlich auf pp-Neutrinos empfindlich, die etwa 53 % des gesamten von der Theorie vorhergesagten Signals bei Galliumexperimenten ausmachen. Weitere Beiträge liefern die ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos (27 %), die ${}^8\text{B}$ -Neutrinos (12 %) und die CNO-Neutrinos (8 %). Das Target bestand aus 101 t GaCl_3 -Lösung, was 30.3 t natürlichem Gallium entspricht. Die durch die solaren Neutrinos erzeugten ${}^{71}\text{Ge}$ -Atome wurden etwa alle vier Wochen aus dem Galliumtank extrahiert und als German-Gas (GeH_4) in Proportionalzählrohre mit niedriger Untergrundaktivität eingebracht. Aus dem radioaktiven Rückzerfall der ${}^{71}\text{Ge}$ -Atome ($T_{1/2}=16.5\text{d}$) in ${}^{71}\text{Ga}$ konnte dann die Neutrinoeinfangsrate bestimmt werden.

Das GNO-Experiment hat von Mai 1998 bis April 2003 solare Neutrinos detektiert. Das Experiment wurde aus nicht-wissenschaftlichen Gründen beendet und Ende 2004 abgebaut. Zusammen mit dem Vorgängerexperiment GALLEX wurden niederenergetische solare Neutrinos über einen vollen Sonnenzyklus (von 1991-2003, mit einer Unterbrechung im Jahr 1997) gemessen. Im Jahr 2005 wurden nach Auswertung des gesamten Datensatzes alle Ergebnisse veröffentlicht. Unter der Annahme, dass sich der solare Neutrinofluss zeitlich nicht ändert, ergibt sich für die beobachtete Neutrinoeinfangsrate bei GNO:

$$R_{\nu_e}^{\text{GNO}} = (62.9 \pm 5.4(\text{stat}) \pm 2.5(\text{syst})) \text{SNU}.$$

Werden die Daten von GALLEX und GNO kombiniert, so ergibt sich für die beobachtete Rate:

$$R_{\nu_e} = (69.3 \pm 4.1(\text{stat}) \pm 3.6(\text{syst})) \text{SNU}.$$

Das sind nur $(54 \pm 5)\%$ der theoretisch nach dem Standard Solar Model (SSM) erwarteten Rate von $(128 \pm 9)\text{SNU}$. Dieses Ergebnis steht jedoch mit der in einer globalen Analyse gefundenen LMA(MSW)-Lösung der Neutrino-Flavor-Übergänge (Neutrinooszillationen) voll in Einklang.

Die GNO/GALLEX-Daten wurden auch hinsichtlich einer zeitlichen Variation des solaren Neutrino-Flusses analysiert. Wird z. B. eine lineare Zeitabhängigkeit über den gesamten Beobachtungszeitraum (1991-2003) angepasst, so ergibt sich eine mittlere Abnahme des Neutrino-Flusses von $(-1.7 \pm 1.1)\text{SNU}/\text{yr}$. Innerhalb der Fehlergrenzen sind die Messergebnisse konsistent mit einem zeitlich konstanten Neutrinofluss. Eine schwache zeitliche Abnahme, deren physikalischer Mechanismus allerdings bisher ungeklärt wäre, kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Von besonderem Interesse ist die Größe des Beitrags des CNO-Zyklus zur gesamten solaren Luminosität. Die GNO/GALLEX-Daten ergeben für einen solchen Beitrag eine Obergrenze von 6.5 % (3σ -Fehlergrenze) bei einem besten Fitwert von 0.8%. Dieses Ergebnis steht in guter Übereinstimmung mit der Vorhersage von $(1.6 \pm 0.6)\%$ durch Sonnenmodelle.

Durch den Abbruch des GNO-Experiments konnten keine Eichmessungen zur Bestimmung der Detektoreffizienz mit künstlichen, üblicherweise in einem Atomreaktor hergestellten Neutrino-Quellen durchgeführt werden. Für das Galliumexperiment SAGE konnte kürzlich jedoch eine derartige Messung mit Hilfe einer ${}^{37}\text{Ar}$ -Neutrino-Quelle, die in einem Hochflussreaktor aktiviert wurde, erfolgen. Auch im Rahmen des GALLEX-Experiments wurden bereits früher Eichmessungen durchgeführt. Werden die Ergebnisse aller Experimente mit künstlichen Neutrino-Quellen zur Bestimmung der Effizienz von Gallium-Detektoren zusammengenommen, wird eine leichte Diskrepanz festgestellt, die darauf hindeutet, dass der theoretische Wirkungsquerschnitt für die Galliumnachweisreaktion ${}^{71}\text{Ga}(\nu_e, e){}^{71}\text{Ge}$ etwas

überschätzt worden ist. Eine experimentelle Klärung dieser Frage ist nach dem Abbau des GNO-Experiments nur noch schwer zu erreichen.

Kryodetektoren für zukünftige Experimente

Auch nach Beendigung des GNO-Experiments wurde das spezielle, für die CVD (Chemical Vapour Deposition) geeignete Kryodetektorsystem wegen seines enormen Anwendungspotentials auch außerhalb des GNO-Projekts weiterentwickelt. Besondere Kennzeichen sind die 4π -Geometrie, die hohe Nachweiswahrscheinlichkeit ($\sim 98\%$) und die niedrige Energieschwelle ($\sim 100\text{eV}$). Um die 4π -Geometrie zu erreichen, wurden zwei Kryodetektoren übereinander aufgebaut, wobei der untere die zu untersuchende Radioaktivität trägt. Beide Detektoren bestehen aus jeweils einem Saphir-Substrat (Al_2O_3) von $10 \times 20 \times 1 \text{ mm}^3$ mit einem $1 \times 3 \text{ mm}^2$ Iridium-Gold-Film als supraleitendes Phasen-Übergangsthermometer (transition edge sensor).

Zum Betrieb des Detektorsystems bei den erforderlichen tiefen Temperaturen von typischerweise 10 mK wird im Untergrundlabor (15 m Wasseräquivalent) des "Beschleunigerlaboratoriums / Maier-Leibnitz-Laboratoriums" in Garching ein $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Entmischungskryostat verwendet, der zusätzlich mit einer effizienten Abschirmung gegen radioaktive Untergrundstrahlung ausgerüstet ist. Die Abschirmung besteht aus einem 15cm dicken Bleigürtel, der den Kryostaten vollständig umgibt und einem Myonveto, das aus 16 plattenförmigen Plastik-Szintillatoren außerhalb des Bleigürtels aufgebaut wurde. Dieses Myonveto wird in Antikoinzidenz mit dem 4π -Detektor betrieben. Weiterhin wurde eine untergrundarme kompakte innere Abschirmung aus hochreinem Kupfer und hochreinem Blei entwickelt, die den 4π -Detektor umgibt und gegen radioaktive Untergrundstrahlung aus dem Kryostatmaterial schützt. Das Detektorsystem hat in Experimenten über einen Zeitraum von mehreren Wochen seine hervorragende Langzeitstabilität unter Beweis gestellt. Weitere Einzelheiten sind in zwei Promotionsarbeiten (J. Lanfranchi, T. Lachenmaier) dargestellt, die im Jahr 2005 abgeschlossen wurden. Beide Arbeiten befassen sich zusätzlich zur Entwicklung komplexer Kryodetektoren ganz wesentlich auch mit deren Einsatz bei zukünftigen Experimenten in der Astroteilchenphysik. Insbesondere konnte ein Mikrokalorimeter mit einem supraleitenden Phasen-Übergangsthermometer entwickelt werden, das eine Energieauflösung von 5.9eV bei einer γ -Energie von 5.9keV erreicht. Die Pulse werden über ein SQUID-System ausgelesen.

BOREXINO

Das Hauptziel von BOREXINO ist die erstmalige Messung solarer ^7Be -Neutrinos, die im pp-Zyklus in der Reaktion $^7\text{Be} + e^- \rightarrow ^7\text{Li} + \nu_e$ erzeugt werden. Wird der Fluss dieser Neutrinos auf 10% Genauigkeit gemessen, kann die primäre Reaktion des solaren pp-Zyklus $p + p \rightarrow ^2\text{D} + e^+ + \nu_e$ unter Beachtung der solaren Luminosität und der seit jüngster Zeit bekannten Neutrinooszillationsparameter mit einer Genauigkeit von besser als 1% bestimmt werden. Da auch die theoretische Unsicherheit im Bereich von 1% liegt, kann das Sonnenmodell mit bisher unerreichter Präzision getestet werden.

Neben den ^7Be -Neutrinos kann man mit BOREXINO neue Erkenntnisse über die ebenfalls noch nicht experimentell erfasste thermonukleare Fusionsreaktion $p + e^- + p \rightarrow ^2\text{D} + \nu_e$ gewinnen und den Anteil des solaren CNO-Zyklus an der gesamten Energieumsetzung in der Sonne genauer bestimmen. Der BOREXINO-Szintillationsdetektor wird eine Echtzeitmessung der Neutrinoereignisse ermöglichen.

Der BOREXINO-Detektor mit all seinen externen Installationen befindet sich im italienischen Gran Sasso Untergrundlabor. Der Nachweis solarer Neutrinos soll über deren elastische Streuung an den Elektronen eines organischen, flüssigen Szintillators erfolgen. Insgesamt werden 300t dieser Flüssigkeit zur Verfügung stehen. Der Szintillator soll in einem transparenten Nylonballon gehalten werden und von einer transparenten, nichtszintillierenden Flüssigkeit gegen externe Radioaktivität abgeschirmt werden. Ca. 2200 Photosensoren weisen die Photonen nach, die vom Szintillator emittiert werden. Sie befinden sich auf der Innenseite einer Stahlkugel mit etwa 14m Durchmesser. Diese Stahlkugel

wiederum befindet sich in einem Stahldom mit ca. 18m Durchmesser. Der Raum dazwischen wird mit reinem Wasser gefüllt werden, das wiederum externe Radioaktivität abschirmt. Dazu wurden dort 205 Photosensoren montiert, die das Cherenkovlicht kosmischer Myonen registrieren sollen. In BOREXINO befinden sich also zwei Detektoren. Ein innerer zur Detektion von Neutrinos und ein äußerer, das 'Myon-Veto', das zur passiven und aktiven Abschirmung dient.

Es werden ca. 35 ${}^7\text{Be}$ -Neutrinoereignisse pro Tag erwartet. Die Rate für pep- und CNO-Neutrinos wird im Bereich von 1 Ereignis pro Tag liegen. Die Hauptschwierigkeit in BOREXINO ist die Trennung solarer Neutrinosignale von Untergründereignissen. Solare Neutrinos werden nur über das Rückstoßelektron, das seine Energie im Szintillator deponiert, nachgewiesen. Da ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos monoenergetisch sind ($E_\nu = 0.86 \text{ MeV}$), gleicht das Rückstoßspektrum in etwa dem einer Comptonverteilung mit einer scharfen Kante bei 660 keV. Signale durch Beta- oder Gammaaktivität in diesem Energiebereich sind von solaren Neutrinos nicht zu unterscheiden. Daher ist Low Background Technologie, insbesondere die Reinheit des Szintillators, von entscheidender Bedeutung für das Experiment. Eine untere Energie-Schranke von ca. 0.25 MeV ist durch die ${}^{14}\text{C}$ Aktivität der organischen Flüssigkeit gegeben. Im Falle von pep-Neutrinos sind durch die geringe Rate die Anforderungen noch höher. In dem Energiebereich der pep-Neutrinos ($0.8 < E/\text{MeV} < 1.2$) spielt auch kosmogen induzierter Untergrund (Bildung von ${}^{11}\text{C}$ -Nukliden) eine grosse Rolle. Bei CNO-Neutrinos kommt hinzu, dass ihre Energieverteilung kontinuierlich ist.

Status des Experiments

Der BOREXINO-Detektor wurde 2005 im Gran Sasso Untergrundlabor fertig gestellt und einschließlich des Myonvetos erfolgreich getestet. An unserem Institut wurde im Jahr 2005 eine Doktorarbeit (C. Lendvai) erfolgreich abgeschlossen, deren Schwerpunkt auf dem Aufbau und Test des Myonvetos für BOREXINO lag. In einer weiteren Dissertation, die im Jahr 2006 abgeschlossen werden wird, stehen die Effizienz des externen Wasser-Cherenkovdetektors sowie das Datenaufnahmesystem (Elektronik und Software) einschließlich der Algorithmen zur Datenanalyse im Mittelpunkt. Mit dem Prototypdetektor CTF (Counting Test Facility) wurden Reinigungsmethoden für Flüssigkeiten entwickelt und getestet. Bei der geplanten Messung der pep- und CNO-Neutrinos wird der Untergrund von ${}^{11}\text{C}$ -Nukliden, die in Spallationsprozessen von hochenergetischen Myonen gebildet werden, eine wichtige Rolle. Im Jahr 2005 konnten diese ${}^{11}\text{C}$ -Ereignisse in der CTF zweifelsfrei nachgewiesen und Identifikationsmethoden erfolgreich getestet werden, die für das spätere Hauptexperiment sehr wichtig werden können.

Wegen aufwendiger Arbeiten zur Drainage des gesamten Gran Sasso Labors wurde bisher noch nicht die Erlaubnis erteilt, mit größeren Mengen an Flüssigkeiten zu hantieren. Es ist jedoch zu erwarten, dass diese Erlaubnis im Jahre 2006 erteilt werden wird, sodass der BOREXINO-Detektor mit ca. 300t Szintillator gefüllt werden kann.

LENA

Die Niederenergie-Neutrinoophysik hat in den letzten Jahren mit den Entdeckungen der Neutrinooszillationen und der Messung des solaren Neutrino-Spektrums große Erfolge erzielt. Neutrinos sollen deshalb in Zukunft auch als Sonden für bisher kaum erforschte Objekte und Prozesse eingesetzt werden, die sonst nur sehr schwer oder gar nicht beobachtbar sind. An der TU München werden dazu das wissenschaftliche Potenzial und die technische Realisierbarkeit eines ca. 50 kt großen Szintillationsdetektors (genannt LENA-Detektor) untersucht. Im Fokus stehen dabei folgende Fragestellungen:

- 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 Anti-Elektronneutrinos aus dem Inneren der Erde, sog. Geoneutrinos, die beim radioaktiven Zerfall bei den Zerfallsketten von ^{238}U und ^{232}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 12 000 Photomultiplier mit einem Durchmesser von jeweils 50 cm werden das Licht nachweisen, das vom Szintillator bei einer Teilchenwechselwirkung erzeugt wird. Der Szintillator besteht aus PXE (phenyl-o-xylylethane, $\text{C}_{16}\text{H}_{18}$), in welchem ~ 2 g/l pTp und 20 mg/l bis-MSB, die als Fluor und Wellenlängenschieber fungieren, gelöst sind. Bei einer Abschwächlänge von 12 m wird eine Photoelektroneneffizienz von ca. 120 pe/MeV erwartet. 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. Es werden mehrere Untergrundlaboratorien in den USA (Kimballton mine und Homestake mine) und in Europa (Frejus-Tunnel, Frankreich; Mine in Pyhäsalmi, Finnland; Deep-sea Nestor-Labor in Pylos, Griechenland) diskutiert. Die Labors in Pyhäsalmi als auch Pylos sind durch eine Abschirmung von 4000 m.w.e. ausgezeichnet und sind auch weit genug weg von nuklearen Leistungsreaktoren, die zum Anti-Elektronneutrino-Untergrund bei den Messungen des diffusen Supernova-Neutrinountergrunds den größten Beitrag liefern.

Zwei Anwendungsbeispiele für das LENA-Projekt sollen genauer erwähnt werden: Gravitationskollaps einer Supernova und Protonzerfall.

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 Anti-Elektronneutrinos zeitaufgelöst gemessen werden. Bei einer Supernova von 8 Sonnenmassen im Zentrum der Milchstraße werden bei Reaktion 1 eine Rate von ca. 8700, bei Reaktion 2 von ca. 500 Ereignissen erwartet. Der Fluss an Elektronneutrinos ist mit Reaktion 3 zu messen (85 Ereignisse) und über die neutrale Stromwechselwirkung von Reaktion 4 (ca. 2900 Ereignisse) kann der Gesamtfluss der Supernovaneutrinos ermittelt werden. Über die Streureaktionen 5 (ca. 610 Ereignisse) und 6 (ca. 7400 Ereignisse) wird das Energiespektrum aller Neutrino flavors gemessen. Durch eine zeit-aufgelöste Messung sollte es möglich sein, verschiedene Modelle zum Gravitationskollaps zu unterscheiden. Läuft die Front der Supernovaneutrinos teilweise durch die Erde, kann man wegen der hohen Statistik und der guten Energieauflösung (im Gegensatz zu einem Cherenkovdetektor) im Spektrum der Anti-Elektronneutrinos Oszillationsmuster erkennen, die abhängig sind vom bisher unbekanntem Mischungswinkel Θ_{13} und der ebenfalls unbekanntem Hierarchie der Masseneigenzustände der Neutrinos. Mittels dieses Effekts könnte man also auch neue Erkenntnisse über intrinsische Neutrinoparameter gewinnen.

Ein großer Flüssigszintillationsdetektor wie LENA 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 1 GeV) beruht. Der oben erwähnte Zerfallsmodus wird von zahlreichen Supersym-

metrischen Theorien favorisiert, wobei eine Protonlebensdauer τ kleiner als 10^{35} y vorhergesagt wird. Die bisherige experimentelle Grenze dieses Zerfallskanals von $\tau > 2.3 \cdot 10^{33}$ y wurde im Super-Kamiokande-Experiment erreicht. Diese Grenze ist i. w. durch die erreichbare Unterdrückung der Untergrundrate im Super-Kamiokande-Detektor bestimmt. 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 $\tau > 4 \cdot 10^{34}$ y mit 90% C.L. erreicht werden kann. Auch dieses Ergebnis belegt das enorme wissenschaftliche Potenzial des geplanten LENA-Detektors.

3.2 Suche nach Dunkler Materie mit CRESST und EURECA

Teilprojektleiter: W. Rau, Stellvertreter: F. Pröbst

Gruppenmitglieder: C. Coppi, F. von Feilitzsch, C. Isaila, W. Potzel, M. Stark, D. Wernicke, W. Westphal.

Einleitung

Seit der Beobachtung von Inkonsistenzen bei der Bewegung der Galaxien im Coma-Galaxienhaufen durch Fritz Zwicky in den 1930er Jahren wissen wir, dass wesentliche Bestandteile des Universums der direkten astronomischen Beobachtung nicht zugänglich sind. Diese Tatsache ist inzwischen durch eine beeindruckende Liste von Messungen (u.a. Gravitationslinsen, Rotationskurven von Galaxien, kosmische Hintergrundstrahlung) bestätigt worden: weniger als 1 % der gesamten Masse-Energiedichte des Universums liegt in leuchtender Form vor. 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 werden der sogenannten Dunklen Energie zugeschrieben.

Die einzigen bekannten Kandidaten für nicht-baryonische Materie sind die Neutrinos. Zwar wissen wir seit einigen Jahren, dass diese eine endliche Masse besitzen, jedoch können sie nur in geringem Maße (wenige %) zur Materie beitragen. Daher muss es eine weitere Klasse von bislang unbeobachteten Teilchen geben, die den dominanten Beitrag zur Dunklen Materie liefern.

Da diese Teilchen sich auch in unserer Umgebung befinden, wie wir aus der Rotationskurve unserer eigenen Galaxie wissen, wir sie bisher aber noch nicht beobachtet haben, muss ihre Wechselwirkung mit normaler Materie sehr schwach sein. Auch an Beschleunigern konnten sie bisher nicht erzeugt werden, was dafür spricht, dass sie schwer sind im Vergleich zu den bisher bekannten Teilchen. Aussichtsreiche Kandidaten sind also schwach wechselwirkende, schwere Teilchen oder *Weakly Interacting Massive Particles* (WIMPs).

Supersymmetrische Theorien sind eine naheliegende Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik. Diese aus rein theoretischen Erwägungen eingeführte Klasse von Theorien fordert eine erhebliche Erweiterung des Teilchenrepertoires. Es wird erwartet, dass das leichteste dieser Teilchen stabil und neutral und damit ein idealer Kandidat für die Dunkle Materie ist.

Die WIMP-Suche und das CRESST-Experiment

Bei der Suche nach WIMPs werden zwei grundsätzlich unterschiedliche Strategien verfolgt: die direkte und die indirekte Suche. In Bereichen hoher WIMP-Dichte kann es zu WIMP-WIMP-Annihilationen kommen, was zu einer charakteristischen Strahlung führt. Bei der indirekten Suche nach WIMPs wird nach dieser Strahlung, z.B. aus dem Zentrum der Sonne oder der Milchstraße, Ausschau gehalten.

Die einzige Möglichkeit zum direkten Nachweis von WIMPs ergibt sich durch Streuung von WIMPs an Atomkernen. Für eine kohärente Wechselwirkung wird ein starker Anstieg des

Wechselwirkungsquerschnitts mit der Zahl der Nukleonen im Atomkern erwartet, weshalb sich schwere Kerne besonders gut zum Nachweis eignen.

Das Hauptproblem 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 also eine zentrale Voraussetzung.

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 über ein thermisches Signal bestimmt wird. Als Target werden szintillierende CaWO_4 -Kristalle verwendet. 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.

Detektorkalibrierung

Aufgrund der Zusammensetzung der CRESST-Detektoren aus Atomen mit sehr unterschiedlicher Masse besteht grundsätzlich auch die Möglichkeit, Untergrund von Neutronenereignissen zu diskriminieren: wie bereits erwähnt, wechselwirken WIMPs bevorzugt mit schweren Kernen (Wolfram des CaWO_4 -Kristalls) während das Signal von Neutronen von Rückstößen leichter Kerne (Sauerstoff) dominiert wird. Messungen bei Zimmertemperatur zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Lichtausbeute von der Kernmasse, sodass Wolfram- und Sauerstoffrückstöße zumindest teilweise unterschieden werden können. Eine Aufgabe der CRESST-Gruppe an der TU-München ist es, entsprechende Messungen auch bei tiefen Temperaturen durchzuführen. Erste Messungen mit einer Standard-Neutronenquelle (Am-Be) deuten darauf hin, dass sich die Lichtausbeute auch bei tiefen Temperaturen unterscheidet. Weitere Messungen mit einem verbesserten Detektor und einer weiteren Neutronenquelle sind geplant, um genauere Ergebnisse zu erhalten.

Am Tandem-Beschleuniger des Maier-Leibnitz-Labors wurde ein Neutronenstreuexperiment mit monoenergetischem gepulsten Neutronenstrahl aufgebaut. Die erste Messphase bei Zimmertemperatur wurde erfolgreich abgeschlossen und Messungen bei tiefen Temperaturen werden vorbereitet.

Eine weitere wichtige Untergrundquelle neben den Neutronen sind Oberflächenverunreinigungen mit α -aktiven Materialien. Dies ist hauptsächlich ^{210}Po , ein Tochternuklid des langlebigen ^{210}Pb , das wiederum als Tochter des omnipräsenten ^{222}Rn auftritt. In etwa der Hälfte der Fälle findet der Zerfall so statt, dass der Tochterkern den Detektor trifft während das α -Teilchen nach außen fliegt. Das kann zum Nachweis eines schweren Rückstoßkerns (^{206}Pb) führen, der nicht von einem Wolfram-Kern unterscheidbar ist. Daher wurden Untersuchungen angestellt, um die genaue Charakteristik dieses Untergrundes zu studieren. Messungen mit einer chemisch deponierten ^{210}Po -Quelle wurden durchgeführt. Eine weitere Quelle ist in Vorbereitung, bei der das ^{210}Po wie im Falle der natürlichen Kontamination über den Zerfall von Radon aus der Gasphase deponiert wird. Damit sollte es möglich sein, in der Testmessung ein Spektrum zu erhalten, das sich nicht von dem der natürlichen ^{210}Po -Kontamination unterscheidet.

Erste Ergebnisse von CRESST

Bereits im Jahr 2004 hat CRESST demonstriert, dass mit der neuen Technik der gleichzeitigen Messung von Szintillationslicht und eines thermischen Signals eine empfindliches Experiment zur Suche nach Dunkler Materie möglich ist. Mit zwei Detektoren und einer Gesamtexposition von 20 kg-Tagen wurde eine Empfindlichkeit von 6×10^{-6} pb für den

Wechselwirkungsquerschnitt von WIMPs mit Nukleonen bei kohärenter Streuung erreicht. Die Messungen wurden ohne Neutronenabschirmung durchgeführt, so dass die Empfindlichkeit erwartungsgemäß durch Neutronen begrenzt war. Einer der beiden Detektoren hatte eine ausreichende Auflösung im Lichtkanal, so dass die unterschiedliche Lichtausbeute der verschiedenen Kerne für eine Diskriminierung des Neutronensignals genutzt werden konnte. Damit konnte mit etwa 10 kg-Tagen eine Empfindlichkeit von 1.6×10^{-6} pb erreicht werden.

Status und Pläne

Um die Empfindlichkeit von CRESST zu verbessern, wurde der experimentelle Aufbau mit einem Neutronenmoderator aus etwa 50 cm Polyethylen umgeben. Außerdem wurde zur Identifikation von myoneninduzierten Untergrundereignissen ein Myonveto-Detektor installiert. Auch wurden 66 neue Auslesekanäle installiert, was eine Vergrößerung der Targetmasse auf etwa 10 kg erlaubt. Erste Test haben gezeigt, dass der Kryostat auch nach den Umbauten noch seine Spezifikationen erfüllt. Ein neues Datenaufnahmesystem und neue Datenanalysesoftware für die größere Zahl an Kanälen stehen zur Verfügung.

Mit dem veränderten Aufbau soll CRESST eine Empfindlichkeit von etwa 10^{-8} pb erreichen. 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. Die Kerngruppe wird von den an CRESST und EDELWEISS beteiligten Wissenschaftlern gebildet. Weitere Gruppen (z. B. vom CERN) sind jedoch bereits jetzt beteiligt oder haben den Wunsch zur Mitarbeit geäußert.

4 Diplomarbeiten, Dissertationen

4.1 Diplomarbeiten

Hochmuth, Kathrin: The Angular Distribution of Geoneutrinos and their Detection with LENA

Marrodán Undagoitia, Teresa: Search for the Proton Decay in the Large Liquid Scintillator Detector LENA - a Feasibility Study

Wurm, Michael: Untersuchungen zu den optischen Eigenschaften eines auf PXE basierenden Flüssigszintillators und zum Nachweis von 'Supernova Relic Neutrinos' mit dem zukünftigen Neutrinodetektor LENA

4.2 Dissertationen

Lachenmaier, Tobias: Messungen mit untergrundarmen Tieftemperaturdetektoren zum hocheffizienten Nachweis des ^{71}Ge -Zerfalls

Lanfranchi, Jean-Côme: Development of a New Composite Cryogenic Detector Concept for a Radiochemical Solar Neutrino Experiment

Lendvai, Christian: Identification of Muon Induced Signals in the Deep Underground Neutrino Scintillation Detector BOREXINO

Niedermeier, Ludwig: High Efficiency Purification of Liquid Scintillators for the Solar Neutrino Experiment BOREXINO

Reithmeier, Herbert: ^{129}I in Umweltproben als Tracer für die atmosphärischen ^{131}I -Freisetzungen in Majak

Stark, Michael: Detektoren mit effizienter und schneller Phononensammlung für das CRESST-Experiment

5 Kooperationen

Das Institut ist Mitglied im EU-Network 'Applied Cryodetectors', des ILIAS-Projektes (Integrating Large Infrastructures for Astroparticle Sciences), des „Virtuellen Institut für Dunkle Materie und Neutrinophysik (VIDMAN)“ sowie der IMPRS on Astrophysics.

Innerhalb des SFB 375 ergab sich eine Reihe von direkten Kooperationen einzelner Teilprojekte, deren Ergebnisse und Erfahrungen in die Projekte eingeflossen sind.

Viele der Forschungsarbeiten innerhalb des SFB 375 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. Der SFB 375 stellt inzwischen unzweifelhaft eine Institution dar, die weit über den nationalen und europäischen Rahmen hinaus Bedeutung erlangt hat.

6 Veröffentlichungen

- M. Altmann et al. (GNO Collaboration), 'Complete results for five years of GNO solar neutrino observations', *Physics Letters B* 616 (2005), 174.
- G. Angloher et al. (CRESST Collaboration), 'Limits on WIMP Dark Matter using scintillating CaWO_4 cryogenic detectors with active background suppression', *Astropart. Phys.* 23 (2005), 325.
- G. Angloher et al. (CRESST Collaboration), 'CRESST-II: Dark Matter search with scintillating absorbers', *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 138 (2005), 153.
- H.O. Back et al. (BOREXINO Collaboration), 'Current Status of the BOREXINO experiment', *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 143 (2005) 21.
- C. Cozzini et al. (CRESST Collaboration), 'CRESST cryogenic Dark Matter Search', *New Astronomy Reviews* 49 (2005), 255.
- C. Cozzini et al. (CRESST Collaboration), 'CRESST II Background Discrimination: Detection of ^{180}W ', *Proc. of the 5th Int. Workshop on the Identification of Dark Matter*, Edinburgh, UK, 2004 (eds. N.J.C. Spooner, V. Kudryavtsev), World Scientific, Singapore (2005), 517.
- T. Jagemann, J. Jochum, and F.v. Feilitzsch, 'Neutron scattering facility for the measurement of nuclear recoil quenching factors', *Nucl. Instrum. Methods A* 551 (2005), 245.
- B. Majorovits et al. (CRESST Collaboration), 'The CRESST Dark Matter Search', *Proc. of the 5th Int. Workshop on the Identification of Dark Matter*, Edinburgh, UK, 2004 (eds. N.J.C. Spooner, V. Kudryavtsev) World Scientific, Singapore (2005), 212; Preprint astro-ph/0411396.
- T. Marrodán et al., 'Search for the Proton Decay $p \rightarrow K^+\bar{\nu}$ in the large liquid scintillator low energy astronomy detector LENA', *Physics Review D* 72 (2005), 075014; Preprint hep-ph/0511230.
- J. Ninković et al., 'CaWO₄ crystals as scintillators for cryogenic dark matter search' *Nucl. Instr. Meth. A* 537 (2005), 339.
- L. Oberauer, 'A large liquid scintillator detector for low energy neutrino astronomy', *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)* 138 (2005), 108.
- L. Oberauer, ' Θ_{13} measurements at reactors', *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)* 143 (2005), 277.
- L. Oberauer and C. Hagner, 'Neutrino Physics', *Nuclear Physics News* Vol. 15 No. 1 (2005), 12.

- F. Reines and L. Oberauer, 'Neutrinos', Encyclopedia of Physics, Third Edition, Vol. 2, Eds. R.G. Lerner and G.L. Trigg, Wiley-VCH, (2005), 1700.
- W. Rau, 'Auf der Suche nach der Dunklen Materie', Sterne und Weltraum, Vol. 01/2005, 32.
- G. V. Smirnov et al., 'Propagation of nuclear polaritons through a two-target system: Effect of inversion of targets', Phys. Rev. A 71 (2005), 023804.
- M. Stark et al., 'Application of the Neganov-Luke effect to low-threshold light detectors', Nucl. Instr. Meth. A545 (2005), 738.
- H. Wulandari et al., 'Status of Neutron Background Studies in CRESST', Proc. of the 5th Int. Workshop on the Identification of Dark Matter, Edinburgh, UK, 2004 (eds. N.J.C. Spooner, V. Kudryavtsev) World Scientific, Singapore (2005), 477.

Franz von Feilitzsch