

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
WWW: <http://www.e15.physik.tu-muenchen.de/>
E-Mail: franz.vfeilitzsch@ph.tum.de

0 Allgemeines

Der hier vorgelegte Bericht für das Jahr 2004 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 zwei Schwerpunkte: die Spektroskopie solarer Neutrinos mit den Experimenten GNO (Nachfolge von GALLEX) und BOREXINO sowie die Suche nach Dunkler Materie mit dem Experiment CRESST. Das Experiment GNO wurde Ende des Jahres 2004 abgebaut und wird nicht weiter geführt. Die endgültigen Messresultate werden hier beschrieben. Der Aufbau des Experiments BOREXINO wurde fortgesetzt, allerdings konnte im Jahr 2004 wegen sicherheitstechnischer Auflagen, die das gesamte Gran-Sasso-Untergrundlabor betreffen, der BOREXINO-Tank noch nicht mit Szintillatorflüssigkeit gefüllt werden. Es wird jedoch erwartet, dass damit im Jahr 2005 begonnen werden kann.

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.

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.

Mit dem Experiment CRESST wurden in der ersten Jahreshälfte von 2004 Messdaten gewonnen. Anschließend begann eine Umbauphase, in der die Masse des CaWO_4 -Detektormaterials von derzeit 0.3kg auf insgesamt 10kg erhöht wird. Eine Wiederaufnahme der Messungen ist für das Frühjahr 2005 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], PD Dr. Josef Jochum.

Wissenschaftliche Mitarbeiter:

Dr. Walter Potzel [-12508], Dr. Wolfgang Rau [-12516], Dr. Marianne Göger-Neff [-12432], Dr. Gunther Korschinek [-14257], Dr. Hesti Wulandari, Dr. Marco Razeti, Dipl.-Phys. Doreen Wernicke [-12524].

Doktoranden:

Dipl.-Phys. Davide D'Angelo [-12328], Dipl.-Phys. Chiara Coppi [-12504], Dipl.-Phys. Christian Grieb, Dipl.-Phys. Christian Hollerith, Dipl.-Phys. Michael Huber, Dipl.-Phys. Thomas Jagemann, Dipl.-Phys. Tobias Lachenmaier [-12525], Dipl.-Phys. Jean-Côme Lanfranchi [-12525], Dipl.-Phys. Christian Lendvai [-12328], Dipl.-Phys. Teresa Marrodán Undagoitia [-12328], Dipl.-Phys. Ludwig Niedermeier [-12328], Dipl.-Phys. Michael Stark [-12516], Dipl.-Phys. Wolfgang Westphal [-12504].

Diplomanden:

Kathrin Hochmuth [-12524], Christian Isaila, Jan König, 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. Michael Huber: Entwicklungsabteilung Industrie

PD Dr. Josef Jochum: Berufung als Ordinarius an die Eberhard-Karls-Universität Tübingen

Dr. Marco Razeti: Université de Lyon

Dr. Hesti Wulandari: Ruf als Dozentin an das Departemen Astronomi Institut Teknologi Bandung, Bandung/Indonesien

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 von jungen Wissenschaftlern 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-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 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.

3 Wissenschaftliche Arbeiten

3.1 Spektroskopie solarer Neutrinos – GNO, BOREXINO

Teilprojektleiter: L. Oberauer, Stellvertreter: W. Potzel

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

Einleitung

Die Ursache für das in verschiedenen Neutrino-Experimenten gemessene Defizit an solaren Neutrinos ist geklärt, das sog. solare Neutrino-Rätsel ist gelöst: Flavormischung und ein nicht-entartetes Neutrinomassenspektrum führen zu Neutrinooszillationen auf dem Weg vom Entstehungsort im Innern der Sonne bis zum Nachweis im Detektor auf der Erde. Die Oszillationsparameter (Quadrat der Massendifferenz Δm_{sol}^2 und Mischungswinkel θ_{sol}) entsprechen der LMA (MSW)-Lösung. Alternative Mechanismen, z. B. Spinflip durch ein eventuell vorhandenes magnetisches Moment des Neutrinos, Spin-Flavor-Präzession und Nicht-Standard-Neutrinowechselwirkungen, können höchstens noch als Effekte höherer Ordnung zum solaren Neutrino-Rätsel beitragen.

Eine gemeinsame Analyse der Messdaten aller Sonnenneutrino-Experimente und des Reaktorexperiments KamLAND ergab als besten Fitpunkt für die Oszillationsparameter solarer Neutrinos:

$$\Delta m_{sol}^2 = 7.9 \cdot 10^{-5} \text{eV}^2, \tan^2 \theta_{sol} = 0.406, \text{ d. h. } \theta_{sol} = 32.5^\circ.$$

Die Oszillation erfolgt zwischen Elektron-Neutrino und einer Superposition von Myon- und Tauon-Neutrino mit nahezu gleichen Anteilen.

Neutrinooszillationen treten auch bei atmosphärischen Neutrinos auf. Der beste Fitpunkt für atmosphärische Neutrinooszillationen ergibt sich zu

$$\Delta m_{atm}^2 = 2.1 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2, \tan^2 \theta_{atm} = 1.0, \text{ d. h. } \theta_{atm} = 45^\circ.$$

Hier erfolgt eine Oszillation zwischen Myon- und Tauonneutrino, während eine Oszillation zwischen Myon- und Elektronenneutrino bei diesen Parametern auf Grund der Reaktorexperimente Chooz und Palo Verde ausgeschlossen werden kann.

Im Vergleich zu Δm_{atm}^2 ist Δm_{sol}^2 etwa 27mal kleiner und der Mischungswinkel θ_{sol} ist zwar groß, liegt aber signifikant unterhalb des Wertes für maximale Mischung ($\tan^2 \theta_{sol} = 1$).

Das einfachste Szenario von Neutrinooszillationen erfordert also drei leichte Neutrinos mit den Massenzuständen m_1 , m_2 und m_3 , die durch folgende Parameter charakterisiert sind:

- solare Neutrinooszillationen: Massendifferenz $\Delta m_{sol}^2 \equiv \Delta m_{21}^2$; Mischungswinkel $\theta_{sol} \equiv \theta_{12}$ groß, aber nicht maximal
- atmosphärische Neutrinooszillationen: Massendifferenz $\Delta m_{atm}^2 \equiv \Delta m_{32}^2 \gg \Delta m_{sol}^2$; Mischungswinkel $\theta_{atm} \equiv \theta_{23}$ (nahezu) maximal
- Mischungswinkel θ_{13} (klein, laut der Ergebnisse der Reaktorexperimente Chooz und Palo Verde).

Dieses einfachste Szenario wäre jedoch nicht mehr haltbar, wenn sterile Neutrinos eine Rolle spielen sollten. Für die Existenz steriler Neutrinos gibt es bisher jedoch keine Hinweise.

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.

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 ${}^{71}\text{Ga}$ kann 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. Unter der Annahme, dass sich der solare Neutrinofluss zeitlich nicht ändert, ergibt die endgültige Auswertung aller Daten von GNO für die beobachtete Neutrinoeinfangsrate:

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

Gegenüber GALLEX konnte der systematische Fehler bei GNO durch eine Kalibrierung aller Proportionalzählrohre mit aktivem (${}^{71}\text{Ge}$ und ${}^{69}\text{Ge}$) German-Gas signifikant reduziert werden. Weiterhin konnten Fortschritte erzielt werden durch den Einsatz schnellerer Analog- und Digital-Elektronik, einer verbesserten Behandlung der Rn-Untergrundereignisse, sowie einer neu entwickelten Datenanalyse unter Verwendung eines neuronalen Netzwerks.

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

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

Das sind nur $(54 \pm 5)\%$ der theoretisch nach dem Standard Solar Model (SSM) erwarteten Rate von (128 ± 9) SNU. Dieses Ergebnis steht jedoch mit der in einer globalen Analyse gefundenen LMA(MSW)-Lösung der Neutrino-Flavor-Übergänge (Neutrinooszillationen) voll in Einklang. Der Oszillationsmechanismus ändert sich grundlegend bei einer Neutrinoenergie von etwa 2 MeV: er geht vom MSW-Materie-Mechanismus (oberhalb von 2 MeV) über in den Mechanismus der Vakuumoszillationen (unterhalb von 2 MeV). Dieser Übergang konnte allerdings bisher experimentell noch nicht in einer modellunabhängigen Weise untersucht werden.

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 ± 1.1) SNU/yr. Alle derartigen Analysen zeigen, dass die Messergebnisse konsistent sind 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.

Kryodetektoren für das solare Neutrino-Experiment GNO

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 (~ 100 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 $10 \times 20 \times 1$ mm³ mit einem 1×3 mm² Iridium-Gold-Film als supraleitendes Phasen-Übergangsthermometer (transition edge sensor). Letzteres ist wiederum über einen dünnen ($25\mu\text{m}$) Golddraht mit dem Heliumbad thermisch schwach gekoppelt. Zwei Aluminium-Bonddrähte des gleichen Durchmessers verbinden das Thermometer mit dem elektronischen SQUID-Auslesesystem.

Um das Detektorsystem auf die zum Betrieb erforderlichen tiefen Temperaturen abzukühlen, wurde im Untergrundlabor (15 m Wasseräquivalent) des "Beschleunigerlaboratoriums / Maier-Leibnitz-Laboratoriums" in Garching ein Entmischungskryostat mit effizienter Abschirmung gegen radioaktive Untergrundstrahlung aufgebaut und getestet. 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 Kryostatenmaterial schützt. Das Detektorsystem hat sich in vielen Testmessungen sehr gut bewährt und hat in Experimenten über einen Zeitraum von mehreren Wochen seine hervorragende Langzeitstabilität unter Beweis gestellt.

BOREXINO

Das Hauptziel von BOREXINO ist die erstmalige Messung solarer ${}^7\text{Be}$ 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 ${}^7\text{Be}$ -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.

Ein weiteres wissenschaftliches Ziel von BOREXINO ist die Messung von Neutrinos aus europäischen Kernreaktoren und damit die Überprüfung der Evidenz von Neutrinooszillationen, wie sie in dem japanischen Reaktorexperiment KamLAND gefunden wurde. In BOREXINO wird es auch möglich sein, Neutrinos zu detektieren, die von der Erde emittiert werden. Diese Teilchen stammen aus den radioaktiven Zerfallsketten von Uran und Thorium. Mit BOREXINO kann also der Beitrag der natürlichen Radioaktivität zum Wärmefluss unserer Erde bestimmt werden. Im Falle einer Supernova des Typs II in unserer Milchstraße würde BOREXINO mit der Messung der dabei emittierten Neutrinos (ca. 99% der Energie einer SN des Typs II werden in Form von Neutrinos ausgestrahlt) einen Beitrag zum besseren Verständnis des Gravitationskollapses liefern.

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.

Wir erwarten ca. 35 ${}^7\text{Be}$ -Neutrinoereignisse pro Tag. 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.

Für Geo- und Reaktor-neutrinos wird als Nachweisreaktion der Einfang von Elektron-Antineutrinos an den freien Protonen des organischen Szintillators verwendet: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$. Mit verzögerter Koinzidenz wird sowohl das Positron als auch das Neutron nachgewiesen. Letzteres erzeugt ein sichtbares Signal im Detektor durch den Neutroneneinfang an einem Proton, wobei die Bindungsenergie des entstehenden ${}^2\text{D}$ in Form eines Gammaquants der Energie 2.2 MeV emittiert wird. Durch diese Technik können im Gegensatz zu solaren Neutrinos Untergründereignisse viel effizienter von echten Anti-Neutrinosignalen getrennt werden. Nach unseren Ergebnissen mit der Counting Test Facility, einem Prototypen von BOREXINO mit ca. 4t Szintillatormasse, können Antineutrinos im wesentlichen untergrundfrei gemessen werden.

Status des Experiments

Die Detektorkomponenten von BOREXINO im Gran Sasso Labor sind nun komplett installiert. Insbesondere konnte im Frühjahr 2004 der Nylonballon, der später den Szintillator halten soll, in den Detektor eingebaut werden. Erste Tests über Funktionsfähigkeit und Dichtigkeit der Nylonhülle sind positiv. Davor wurden in mehreren Tests die Lichtsammeleffizienz der Photomultiplier mit Lichtkonzentratoren (Design, Entwicklung und Realisation wurde von der Gruppe der TU München ausgeführt) mit kleinen Szintillatorproben getestet. Die Ergebnisse zeigen eine hervorragende Effizienz von ca. 450 Photoelektronen pro MeV Energiedeposition im Szintillator und eine damit einhergehende sehr gute Energieauflösung und Beta-Alpha-Separation durch Pulsformanalyse. In 2004 wurden zwei Doktorarbeiten der Münchner Gruppe fertig gestellt. Thema einer Arbeit waren die bereits erwähnten Lichtkonzentratoren, sowie die verschiedenen Kalibrationssysteme des Detektors. Bei den Lichtkonzentratoren waren vor allem die Reinheit des verwendeten Reflektormaterials (Aluminium) bzgl. radioaktiver Spurenelemente (hier insbesondere bzgl. ^{208}Th) und die chemische Kompatibilität sowohl mit dem organischen Lösungsmittel Pseudokumol (Buffer-Flüssigkeit) als auch mit Reinstwasser die Hauptprobleme, die gemeistert wurden. Die zweite Doktorarbeit beschäftigte sich mit der Möglichkeit, organische Szintillatoren so zu reinigen, dass sie die Bedingungen für BOREXINO erfüllen. Dazu wurde die Säulenchromatographie mit Kieselgel als Reinigungsmethode getestet. In Labormessungen wurden die Enthalpien zur Adsorption des radioaktiven Elements ^{210}Pb und seiner Tochterelemente an Kieselgel bestimmt. Die Kontamination des Szintillators mit diesem Isotop ist das Hauptproblem bei BOREXINO. Mit weiteren Messungen konnte ein Modell zur Säulenchromatographie bestätigt werden, mit dem vorhergesagt werden kann, dass mit dieser Methode die Spezifikationen in BOREXINO erfüllbar sein sollten. Zum Myonveto von BOREXINO werden zwei weitere Dissertationen an der TU München im Jahre 2005 geschrieben werden. Dabei steht die Effizienz des externen Wasser-Cherenkovdetektors im Mittelpunkt. Dieser Teil des Detektorsystems wurde in den letzten Jahren von der Münchner Gruppe realisiert. Der Aufbau und Test des Myonvetos wurde im Herbst 2004 abgeschlossen.

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 2005 erteilt werden wird.

CTF Resultate

Seit der Unterbrechung der Arbeiten in der Halle C des Gran Sasso Labors im August 2002 werden mit dem Prototypdetektor CTF (3.8t Szintillator) laufend Daten genommen. Dabei zeigt sich deutlich, dass die wesentlichsten Probleme der Kontamination des Szintillators (bis auf ^{210}Pb) gelöst werden können. Neben diesen technischen Aspekten konnten aber auch interessante neue physikalische Erkenntnisse gewonnen werden, die in mehreren Publikationen veröffentlicht wurden. Die exzellente Abschirmung der CTF und die Reinheit der Detektorkomponenten, insbesondere des Szintillators selbst, erlaubten nach seltenen Ereignissen zu suchen und aus der Nichtbeobachtung neue, bisher nicht erreichte, experimentelle Grenzen für folgende Phänomene zu ziehen:

- Aus der Suche nach hypothetischen radiativen Zerfällen solarer Neutrinos in der CTF können Limits zu der Größe elektromagnetischer Neutrino-Formfaktoren gewonnen werden
- Grenzen für die Verletzung des Pauli-Prinzips aus der Nichtbeobachtung elektronischer und nukleonischer Zerfallskanäle
- Obere Grenzen für eine hypothetische Beimischung schwerer (größer als $1\text{MeV}/c^2$) Neutrinos ν_h zum Elektroneneutrino durch die Suche nach den Zerfällen $\nu_h \rightarrow \nu_1 e^+ e^-$ solarer ^8B -neutrinos
- Untere Grenzen für Lebensdauern von bestimmten Zerfallsmoden bei Nukleonen

Weitere Publikationen aus Daten der CTF werden in Kürze folgen. Dazu gehört auch die Suche nach Elektron-Antineutrinos $\bar{\nu}_e$, wie sie z.B. von nuklearen Reaktoren emittiert werden. Während einer Messzeit von ca. 600 Tagen wurde ein $\bar{\nu}_e$ -Ereignis als solches identifiziert. Von allen europäischen Kernreaktoren (mittlerer Abstand zum Gran Sasso ca. 800 km) würde man in diesem Zeitraum ~ 0.4 Ereignisse erwarten. Dieses Beispiel zeigt, dass die Suche nach $\bar{\nu}_e$ -Events in BOREXINO im wesentlichen untergrundfrei erfolgen kann. Daneben wird in der CTF die Möglichkeit studiert, ob mit BOREXINO die Messung der solaren pep- und CNO-Neutrinos erfolgen kann. Dazu wird der dafür relevante ^{11}C -Untergrund gemessen, der kosmogen durch hochenergetische Myonen im Untergrundlabor erzeugt wird.

Low Energy Neutrino Astronomy: LENA

Die großen Erfolge der Niederenergie-Neutrino-Physik mit den Entdeckungen der Neutrinooszillationen lassen es plausibel erscheinen, diese Teilchen als Sonden für bisher kaum erforschte Objekte zu verwenden, die sonst nur sehr schwer oder gar nicht beobachtbar sind. An der TU München werden dazu das wissenschaftliche Potential und die technische Realisierbarkeit eines ca. 50kt großen Szintillationsdetektors untersucht. Im Fokus stehen dabei astrophysikalische Fragestellungen.

Mit LENA sollte 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) and
- 5) $\nu_x + p \rightarrow \nu_x + p$ (elastic scattering).

Dabei kann sehr genau über den inversen Betazerfall (Reaktion 1) der spektrale Fluss von Anti-Elektronneutrinos zeitaufgelöst gemessen werden. Der Fluss an Elektronneutrinos ist mit Reaktion 3 zu messen und über die neutrale Stromwechselwirkung 4 kann der Gesamtfluss der Supernovaneutrinos ermittelt werden. Über die Streureaktion 5 wird das Energiespektrum aller Neutrino-Flavors gemessen. Damit sollte es möglich sein, verschiedene Modelle zum Gravitationskollaps zu unterscheiden. Läuft die Front der Supernovaneutrinos wenigstens 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. Mit LENA könnte man auch die Hintergrundneutrinos vergangener Supernovaexplosionen messen und damit mehr über die Strukturbildung im frühen Universum lernen.

Zusätzlich würden wegen der extrem hohen Statistik die thermonuklearen Fusionsprozesse in der Sonne mit bisher unerreichter Genauigkeit studiert werden können. Selbst kleine zeitliche Fluktuationen des ${}^7\text{Be}$ -Neutrino-Flusses, die durch g-Moden der Helioseismologie verursacht sein könnten, wären mit LENA nachweisbar.

Weitere Themen von LENA, die nicht im direkten Zusammenhang mit astrophysikalischen Fragestellungen stehen, sind die Suche nach Arten des Protonzerfalls, die von Wasser-Cherenkovdetektoren nicht oder nur mit kleiner Sensitivität beobachtbar sind, sowie der direkte Test geophysikalischer Modelle durch die Messung terrestrischer Neutrinos aus Kruste, Mantel und Erdkern.

3.2 Suche nach Teilchen der Dunklen Materie mit Kryodetektoren

Teilprojektleiter: W. Rau, Stellvertreter: F. Pröbst

Gruppenmitglieder: Ch. Choppi, F. von Feilitzsch, C. Hollerith, M. Huber, C. Isaila, T. Jagemann, J. Jochum, J. König, W. Potzel, M. Razeti, M. Stark, D. Wernicke, W. Westphal, H. Wulandari.

Einleitung

Die Bewegungen von Galaxien in Galaxienhaufen oder auch die Drehung von Objekten um Galaxien lässt sich in vielen Fällen nicht mit den bekannten Gesetzen der Gravitation angesichts der geringen Menge an sichtbarer Materie erklären. Die derzeit am aussichtsreichsten erscheinende Lösung dieses Rätsels ist das Vorhandensein dunkler, das heißt nicht mit elektromagnetischer Strahlung wechselwirkender Materie. Aus verschiedenen Beobachtungen lässt sich ableiten, dass es sich bei dieser Dunklen Materie nicht um übliche, aus Atomen (oder allgemeiner: aus Baryonen) aufgebaute Materie handeln kann.

Es gibt erste Hinweise, dass das bislang sehr erfolgreiche Standardmodell der Teilchenphysik an seine Grenzen stößt. Es existiert eine Reihe von Theorien, die dieses Modell erweitern oder ergänzen. Viele dieser Theorien, unter denen die Supersymmetrie besonders hervorzuheben ist, sagen neue Teilchen vorher, die geeignete Eigenschaften haben, um die oben genannten Beobachtungen erklären zu können.

Bislang wissen wir nicht, was die Lösung des Problems ist. Jedoch ist sicher, dass, wenn es sich um bislang unbekannte Elementarteilchen handelt, diese auch hier bei uns in nicht unerheblichem Maße vorkommen (Dichte ca. 0.3 GeV/cm^3). Da wir sie bisher nicht direkt beobachtet haben, folgt daraus, dass sie nur schwach mit atomarer Materie wechselwirken. Auch an Beschleunigern haben wir sie bisher nicht nachweisen können. Das könnte seine Ursache in einer zu großen Masse haben, die die Produktion bei den bisher zur Verfügung stehenden Energien nicht erlaubt. Wir suchen also nach schwach wechselwirkenden, schweren Teilchen: Weakly Interacting Massive Particles oder WIMPs.

Das CRESST-Experiment

Es wird erwartet, dass WIMPs mit atomarer Materie durch Kernrückstöße wechselwirken. Ein Teil der Energie führt dabei zu Ionisation im Target, die bei geeignetem Material über ein Ladungs- oder Lichtsignal nachgewiesen werden kann. Der größte Teil der Energie wird jedoch in Wärme umgesetzt. Daher werden bei CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers) Kryodetektoren eingesetzt, Detektoren also, die bei sehr tiefen Temperaturen (ca. 10 mK) betrieben werden und daher in der Lage sind, auch geringe Energiemengen bis hinunter zu etwa 1 keV über eine Temperaturerhöhung nachzuweisen.

Neben der geringen zu erwartenden Energie von WIMP-Wechselwirkungen ist die geringe Rate das Hauptproblem, insbesondere, da radioaktive oder kosmische Strahlung zu Störereignissen im Detektor führen und ein mögliches Signal überdecken. Da aber radioaktive Strahlung im Wesentlichen mit der Atomhülle, also über Elektronrückstöße reagiert, gibt es eine Unterscheidungsmöglichkeit: die Signalausbeute für ein Licht- oder Ladungssignal hängt von der Art der Wechselwirkung ab; bei Kernrückstößen ist das Signal wesentlich geringer als bei Elektronrückstößen. Kombiniert man also die Messung der Temperaturerhöhung mit der Messung eines solchen Signals, so kann die deponierte Energie über das Temperatursignal gemessen werden, während das zweite Signal (Licht oder Ladung) Auskunft über die Art der Wechselwirkung gibt.

CRESST setzt als Target szintillierende zylindrische CaWO_4 -Kristalle (Höhe und Durchmesser je 4 cm, Masse 300 g) ein. Die Temperaturerhöhung wird mit Hilfe eines supraleitenden Phasenübergangsthermometers (SPT) bestimmt. Dabei handelt es sich um einen dünnen supraleitenden Film, der gerade am Übergang zum normal-leitenden Zustand betrieben wird, wodurch sich eine starke Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur

ergibt. Das Licht wird mit einem zweiten, separaten Kryodetektor aus Silizium nachgewiesen. Dabei wird die durch die Absorption des Lichtes hervorgerufene Temperaturerhöhung wieder mit einem SPT gemessen.

Das Experiment ist im Gran Sasso-Untergundlabor in Italien aufgebaut, das durch etwa 1300 m Gestein vor kosmischer Strahlung geschützt ist. Zur Unterdrückung radioaktiver Strahlung aus der Umgebung sind die Detektoren von einer Abschirmung aus Kupfer und Blei (ca. 30 t) umgeben.

Detektorkalibrierung

Um das Messsignal richtig interpretieren zu können, muss die Reaktion der Detektoren auf die verschiedenen Wechselwirkungen bekannt sein. Die Reaktion auf Elektronrückstöße lässt sich vergleichsweise leicht mit verschiedenen radioaktiven Quellen testen. Da Neutronen als ungeladene Projektile wie die WIMPs mit den Kernen wechselwirken, können Neutronen zur Bestimmung der Wirkung von Kernrückstößen verwendet werden.

Das CaWO_4 -Target ist aus drei verschiedenen Materialien aufgebaut: Sauerstoff, Kalzium und Wolfram. Während Neutronen das stärkste Signal bei Rückstößen an Sauerstoff verursachen, bevorzugen WIMPs die schweren Kerne, insbesondere Wolfram. Es ist also notwendig, die Rückstöße der drei verschiedenen Kerne getrennt zu untersuchen.

Quantifiziert werden die Ergebnisse solcher Messungen üblicherweise mit dem sogenannten Quenchingfaktor; das ist das Verhältnis der Signalhöhe einer bestimmten Ereignisklasse im Vergleich zu einer Referenz-Ereignisklasse. Als Referenz werden üblicherweise Gamma-Ereignisse verwendet.

Bei Bestrahlung des Detektors mit einer üblichen Neutronenquelle werden Reaktionen an allen drei Kernen hervorgerufen. Der Anteil der Rückstöße der verschiedenen Kerne hängt stark von der Energie ab: bei hoher Energie treten hauptsächlich Sauerstoffrückstöße auf, während das Spektrum bei niedriger Energie durch Wolframrückstöße dominiert wird. Der Vergleich der mittleren Lichtausbeute bei verschiedenen Energien gibt also Aufschluss über Unterschiede zwischen den Quenchingfaktoren der verschiedenen Kerne.

Allerdings muss dafür angenommen werden, dass sich die Lichtausbeute an einem bestimmten Kern mit der Energie nicht ändert. Erste Messungen mit dieser Methode deuten jedoch darauf hin, dass sich mit dieser Annahme kein konsistentes Bild ergibt. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass die genauen Anteile der verschiedenen Kerne am Gesamtspektrum bekannt sein müssen.

Daher wurde am Tandem-Beschleuniger des Maier-Leibnitz-Labors (MLL) in Garching ein spezielles Experiment aufgebaut, das zum Ziel hat, diese Untersuchung zu verfeinern. Mit dem Beschleuniger wird ein monoenergetischer gepulster Neutronenstrahl erzeugt, der auf ein CaWO_4 -Target geschossen wird. Die gestreuten Neutronen werden unter einem festen Winkel nachgewiesen und ihre Energie über die Flugzeit bestimmt. Aus einem Vergleich der Daten der gestreuten Neutronen mit dem Signal im CaWO_4 -Kristall lässt sich so für jedes einzelne Ereignis der beteiligte Kern bestimmen.

Eine erste Serie von Messungen wurde bei Raumtemperatur durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen zeigen, dass sich die Lichtausbeute der verschiedenen Kerne in der Tat unterscheidet. Der Quenchingfaktor für Sauerstoff liegt danach bei 12.8 ± 0.5 , der für Kalzium bei 16 ± 4 . Für den Quenchingfaktor von Wolfram konnte nur eine untere Grenze von 33 bestimmt werden. Der nächste Schritt sind Messungen bei tiefen Temperaturen. Ein Kryostat für diese Messungen wird derzeit am MLL installiert.

Ein anderer Ansatz zur Bestimmung der Quenchingfaktoren von CaWO_4 wird bei der ebenfalls an CRESST beteiligten Gruppe des MPI für Physik in München verfolgt. Da die chemische Bindungsenergie der Atome an ihren Gitterplätzen gering ist im Vergleich zu der bei einer Wechselwirkung deponierten Energie, sollte die Lichtausbeute unabhängig davon sein, ob ein Kern im Gitter angestoßen wird, oder ob ein Kern mit der entsprechenden Energie von außen auf den Kristall trifft. Daher werden hier mit Hilfe eines

Flugzeitmassenspektrometers verschiedene Ionen auf ein CaWO_4 -Target geschossen und die Lichtausbeute bestimmt. Auch hier ergibt sich ein Unterschied der Quenchingfaktoren für verschiedene eintreffende Ionen. Insbesondere ist ein deutlicher Trend der Abnahme des Signals mit steigender Masse des Projektils zu beobachten. Die absoluten Zahlen der Quenchingfaktoren unterscheiden sich etwas von den am MLL gemessenen. Für Sauerstoff ergibt sich hier 14 ± 1 , für Kalzium 26 ± 3 und für Wolfram 40 ± 5 .

Zwar konnten bisher nur bei Zimmertemperatur präzise Ergebnisse erzielt werden, jedoch deuten erste Versuche der Quenchingfaktormessungem mit dem Flugzeitmassenspektrometer bei tieferen Temperaturen an, dass der Trend zu weniger Licht bei schwereren Kernen erhalten bleibt. Das ermöglicht es den CRESST-Detektoren, nicht nur - wie oben beschrieben - den dominierenden Untergrund durch Elektronrückstöße effektiv zu unterdrücken, sondern darüber hinaus in gewissem Maße auch den dann noch verbleibenden Untergrund durch Neutronen vom Signal zu trennen. Diese Neutronen werden erzeugt durch die Radioaktivität in der Umgebung oder durch die auch in großer Tiefe noch in geringem Umfang anzutreffenden Myonen der kosmischen Strahlung.

Erste Ergebnisse von CRESST

Im Frühjahr des Jahres 2004 konnten erfolgreiche Messungen mit zwei Detektormodulen durchgeführt werden. Bei einer Exponierung von etwa 20 kg-Tagen wurden insgesamt 16 Ereignisse im interessanten Bereich (Kernrückstöße im Energiebereich von 12 - 40 keV) registriert. Macht man keine Annahme über den Ursprung der Ereignisse, so lässt sich damit (unter gewissen Annahmen über die Verteilung der WIMPs in unserer Galaxie) eine Obergrenze für den Wirkungsquerschnitt von WIMPs mit Nukleonen errechnen. Bei einer angenommenen WIMP-Masse von 60 GeV liegt diese Grenze bei etwa 6×10^{-4} pb.

Die gemessene Ereignisrate stimmt andererseits in etwa mit dem überein, was von Neutronen aus der Umgebung erwartet wird. Nimmt man an, dass die Quenchingfaktormessungen sich direkt auf das Verhalten bei tiefen Temperaturen übertragen lassen, so zeigt sich, dass die beobachteten Ereignisse in der Tat in Parameterbereichen auftreten, wo Neutronen erwartet werden. Eines der beiden Module zeigt eine besonders gute Energieauflösung im Lichtkanal. Hier findet man unter der genannten Annahme über die Quenchingfaktoren kein Ereignis im für WIMPs erwarteten Parameterbereich (Wolfram-Rückstöße). Unter diesen Voraussetzungen lässt sich eine deutlich schärfere Grenze für den Wirkungsquerschnitt von unter 2×10^{-6} pb angeben. Damit sind die Ergebnisse von CRESST bereits in dieser frühen Phase konkurrenzfähig zu Messungen von anderen Experimenten, wie z.B. EDELWEISS. Das derzeit führende Experiment auf diesem Gebiet, das US-amerikanische CDMS-Experiment hat derzeit eine Empfindlichkeit, die um etwa einen Faktor 4 besser ist.

Als Nebenergebnis dieser Messungen wurde erstmals zweifelsfrei der α -Zerfall des Wolframisotops ^{180}W beobachtet und eine Halbwertszeit von 1.8×10^{18} Jahren bestimmt.

Status und Pläne

Derzeit befindet sich CRESST in einer Umbauphase. Zur Abschirmung gegen Neutronen, die die Empfindlichkeit des Experiments begrenzt haben, wurde der experimentelle Aufbau mit 30 - 50 cm Polyethylen umgeben. Zusätzlich wird ein Myonen-Detektor installiert, um Ereignisse zu unterdrücken, die von myoneninduzierten Neutronen hervorgerufen werden.

Außerdem wird die Anzahl der elektronischen Kanäle von 4 auf knapp 70 vergrößert, sodass in Zukunft Detektoren mit einer Gesamtmasse von bis zu 10 kg simultan betrieben werden können. Dadurch soll die Empfindlichkeit des Experiments um mehr als zwei weitere Größenordnungen gesteigert werden.

Im Frühjahr 2005 soll der Messbetrieb wieder aufgenommen werden. Die Targetmasse soll im Laufe der darauf folgenden Monate stufenweise auf 10 kg erhöht werden, um eine Empfindlichkeit von ca. 10^{-8} pb zu erreichen.

Bei dieser Empfindlichkeit können dann erste supersymmetrische Modelle getestet werden. Allerdings ist eine weitere Steigerung der Empfindlichkeit um mehrere Größenordnungen

notwendig, um den gesamten supersymmetrischen Parameterbereich testen, und im Falle eines positiven Signals die Eigenschaften der WIMPs genauer einschränken zu können. Daher wird weltweit bereits über die nächste Generation von Experimenten nachgedacht. Die an den europäischen Experimenten CRESST und EDELWEISS beteiligten Gruppen planen gemeinsam ein solches Projekt unter dem Namen EURECA (European Underground Rare Event search with Calorimeter Array), das mit einer Targetmasse von bis zu einer Tonne eine Empfindlichkeit um oder unter 10^{-10} pb erreichen soll.

4 Diplomarbeiten, Dissertationen

4.1 Diplomarbeiten

König, Jan: Arbeiten zur Untergrundbestimmung für CRESST

Isaila, Christian: Quantitative Röntgenspektrometrie mit Mikrokalorimetern zur Analyse von Mikrostrukturen in der Halbleitertechnik

4.2 Dissertationen

Grieb, Christian: Future Neutrino Detectors and their Impact on Particle and Astrophysics
Huber, Michael: Supraleitende Tunnelioden: Detektoren für die Röntgenfluoreszenzanalyse

Jagemann, Thomas: Measurement of the Scintillation Light Quenching for Nuclear Recoils Induced by Neutron Scattering in Detectors for Dark Matter Particles

5 Kooperationen

Das Institut ist Mitglied im EU-network 'Applied Cryodetectors', beim ILIAS-Projekt (Integrating Large Infrastructures for Astroparticle Science) und beim „Virtuellen Institut für Dunkle Materie und Neutrinophysik (VIDMAN)“.

Innerhalb des SFB 375 ergab sich eine Reihe von direkten Zusammenarbeiten zwischen den Teilprojekten, bei denen Erfahrungen und Ergebnisse in die Projekte einfließen konnten.

Viele der Forschungsarbeiten innerhalb des SFB erfolgen in internationalen Kooperationen, sodass für Kontakte der Mitarbeiter im internationalen Rahmen hervorragende Voraussetzungen gegeben sind. Der SFB stellt inzwischen zweifellos eine Institution dar, die im nationalen, aber auch im internationalen Rahmen Bedeutung hat.

6 Veröffentlichungen

G. Angloher et al., 'CRESST-II: Dark Matter search with scintillating absorbers', Nucl. Instr. Meth. A520 (2004), 108.

G. Angloher et al. (CRESST Collaboration), 'CRESST-II: Dark Matter search with scintillating absorbers', Proceedings of 8th International Workshop on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP), Sept. 5 - 9, 2003, Seattle, Wash. USA.

C. Cozzini et al. (CRESST Collaboration), 'CRESST cryogenic Dark Matter Search', Proceedings of 6th UCLA Symposium on Sources and Detection of Dark Matter and Dark Energy in the Universe, Feb. 18-20, 2004, Marina del Rey, CA, USA.

C. Cozzini et al. (CRESST Collaboration), 'Detection of the Natural Alpha Decay of Tungsten', Phys. Rev. C70 (2004), 064606 and nucl-ex/0408006

C. Hollerith et al., 'Energy dispersive X-ray spectroscopy with microcalorimeters', Nucl. Instr. Meth. A520 (2004), 606.

M. Huber et al., 'Superconducting tunnel junction as detectors for high-resolution X-ray spectroscopy', X-ray Spectrom. 33 (2004), 253.

- M. Huber et al., 'Characterization of an Al-STJ-based X-ray detector with monochromatized synchrotron radiation', Nucl. Instr. Meth. A520 (2004), 234.
- Th. Jagemann et al. (CRESST Collaboration), 'Recent results of the CRESST WIMP search', IAU Symposium 220, 'Dark Matter in Galaxies', eds. S. Ryder, D. J. Pisano, M. Walker, and K. Freeman, Publ. Astron. Soc. Pac.
- J.-C. Lanfranchi et al., 'Development of a cryogenic detection concept for GNO', Nucl. Instr. Meth. A520 (2004), 135.
- M. P. Lissitski et al., 'Annular superconducting tunnel junction with injected current as a new configuration of radiation detector', Nucl. Instr. Meth. A520 (2004), 240.
- M. P. Lissitski et al., 'X-ray energy spectrum measurements by an annular superconducting tunnel junction with trapped magnetic flux quanta', submitted to Appl. Phys. Lett.
- L. Niedermeier et al., 'Scintillator purification by Silica Gel chromatography in the context of low-counting rate experiments', Proceedings of the 8th Conference: Astroparticle, Particle and Space Physics, Detektors and Medical Physics Applications; World Scientific; edited by M. Barone et al.; pp. 81 (2004)
- L. Oberauer et al., 'Production of Light Concentrators for BOREXINO and its Counting Test Facility', Nucl. Instr. Meth. A530 (2004), 453.
- L. Oberauer, 'Low Energy Neutrino Physics after SNO and KamLAND', Modern Physics Letters A, Vol. 19, No. 5 (2004), 1.
- L. Oberauer et al., 'A large liquid scintillator detector for low-energy neutrino astronomy', Proceedings of 8th International Workshop on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP), Sept. 5 - 9, 2003, Seattle, Wash. USA.
- S. Rutzinger et al., 'Development of a superconducting phase-transition thermometer (SPT) for the application in a time-of-flight mass spectrometer (TOF-MS) for heavy-mass molecules', Nucl. Instr. Meth. A520 (2004), 625.
- M. Stark et al., 'Detectors with Ir/Au thermometers for high count rate tests in the CRESST experiment', Nucl. Instr. Meth. A520 (2004), 197.
- H. Wulandari et al., 'Neutron flux underground revisited', Astropart. Phys. 22 (2004), 313 and hep-ex/0312050.
- H. Wulandari et al., 'Neutron background studies for the CRESST Dark Matter experiment', submitted to Astroparticle Physics and hep-ex/0401032.
- H. Wulandari et al., 'Study on neutron-induced background in the CRESST experiment', IAU Symposium 220, 'Dark Matter in Galaxies', eds. S. Ryder, D. J. Pisano, M. Walker, and K. Freeman, Publ. Astron. Soc. Pac.

Franz von Feilitzsch