

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

In dem hier vorgelegten Bericht für das Jahr 2003 werden vor allem die Arbeiten im SFB 375: ASTRO-TEILCHENPHYSIK dargestellt, soweit sie den Lehrstuhl betreffen. Der Lehrstuhlinhaber ist Initiator und Sprecher dieses SFB.

Die Forschungsarbeiten haben zwei Schwerpunkte: die Spektroskopie solarer Neutrinos mit den Experimenten BOREXINO und GNO (Nachfolge von GALLEX) sowie die Suche nach Dunkler Materie mit dem Experiment CRESST. Wegen interner Maßnahmen im gesamten Gran-Sasso-Untergundlabor zur Erhöhung der Betriebssicherheit konnten beim GNO-Experiment seit Anfang April 2003 keine Ge-Extraktionen durchgeführt werden. Die Messungen an den vorangegangenen Extraktionen liefen ohne Unterbrechung weiter. Der Aufbau des Experiments BOREXINO wurde fortgesetzt, allerdings konnten im Jahr 2003 keine Arbeiten vorgenommen werden, für die Flüssigkeiten erforderlich gewesen wären. Es wurde jedoch vom Gran-Sasso-Labor angekündigt, daß im Jahre 2004 diese Einschränkungen für BOREXINO weitgehend aufgehoben werden. Unsere Arbeiten am Experiment CRESST verliefen ohne Einschränkungen während des gesamten Berichtszeitraums.

Die Ursache für das in verschiedenen Sonnenneutrino-Experimenten gemessene Defizit an 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 (Massendifferenz und Mischungswinkel) entsprechen der LMA(MSW)-Lösung. Der Schwerpunkt der Experimente GNO und BOREXINO hat sich in starkem Maße auf astrophysikalische Fragestellungen verschoben. Die genaue Messung des dominierenden pp-Neutrinoflusses und des monoenergetischen ${}^7\text{Be}$ -Neutrinoflusses werden für den Vergleich mit Ergebnissen von Modellrechnungen für die Sonne und für Theorien zur Sternentwicklung von entscheidender Bedeutung sein. Weitere Ziele sind neue Obergrenzen oder Werte für den CNO-Beitrag zur Energieumsetzung in der Sonne.

Das Experiment CRESST hat das Ziel, nach schwach wechselwirkenden schweren Teilchen (Weakly Interacting Massive Particles, WIMPs) als Kandidaten zur Lösung des Problems der Dunklen Materie zu suchen. Es werden neu entwickelte Detektoren auf der Basis von CaWO_4 -Einkristallen eingesetzt, die gleichzeitig zum Phononensignal das bei

einer Wechselwirkung ebenfalls erzeugte Szintillationslicht messen. Dadurch konnte die Trennung von Kernrückstoß-Ereignissen und ionisierender Untergrundstrahlung so stark verbessert werden, daß das aktuelle Ergebnis von CRESST im wesentlichen nur noch vom Neutronenuntergrund im Gran-Sasso-Labor limitiert wird. Der Aufbau einer zusätzlichen Neutronenabschirmung und eines Myonvetos sind in Vorbereitung.

1 Personal

Lehrstuhlinhaber:

Prof. Dr. Franz von Feilitzsch

Professoren und Privatdozenten:

Prof. Dr. Franz von Feilitzsch [-12511/-12522], Prof. Dr. Lothar Oberauer [-12328], PD Dr. Josef Jochum [-14416].

Wissenschaftliche Mitarbeiter:

Dr. Marianne Göger-Neff [-12509], Dr. Gunther Korschinek [-14257], Dr. Walter Potzel [-12508], Dr. Wolfgang Rau [-12516], Dr. Marco Razeti [-12525], Dipl.-Phys. Doreen Wernicke [-12525], Dr. Hesti Wulandari [-14416].

Doktoranden:

Dipl.-Phys. Davide D'Angelo [-12328], Dipl.-Phys. Christian Grieb [-12328], Dipl.-Phys. Christian Hollerith [Infineon], Dipl.-Phys. Michael Huber [-12524], Dipl.-Phys. Thomas Jagemann [-12516], Dipl.-Phys. Tobias Lachenmaier [-12525], Dipl.-Phys. Jean-Côme Lanfranchi [-12525], Dipl.-Phys. Christian Lendvai [-12328], Dipl.-Phys. Ludwig Niedermeier [-12328], Dipl.-Phys. Michael Stark [-12516], Dipl.-Phys. Wolfgang Westphal [-12525].

Diplomanden:

Christian Isaila [Infineon], Jan König [-12525], Klemens Rottler [-12524].

Sekretariat:

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

Technisches Personal:

Norbert Gärtner [-14289], Harald Hess [-12521].

Werkstatt:

Thomas Richter [-12521], Erich Seitz [-12521].

2 Gäste

Prof. Dr. Samoil Bilenky, Dubna (Rußland).

3 Lehrtätigkeit, Prüfungen und Gremientätigkeit

3.1 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. Dadurch kann ein besonders breites Stoffgebiet angeboten werden.

Die Seminare und Vorlesungen werden an allen beteiligten Institutionen, d. h. insbesondere an den beiden Münchener Hochschulen und den Max-Planck-Instituten für Physik und für Astrophysik durchgeführt. Innerhalb der einzelnen Lehrveranstaltungen wird Wert darauf gelegt, daß auf die ergänzenden bzw. auch auf komplementäre Lehrveranstaltungen verwiesen wird.

Der SFB ist zusätzlich an Schwerpunktprogrammen und Europäischen Netzwerken zur Förderung des Austausches von jungen Wissenschaftlern beteiligt.

3.2 Prüfungen

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

3.3 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-Untergundlabor in Italien; Leiter des TU-Forschungskollegiums des gemeinsam mit der LMU betriebenen Beschleunigerlabors (Maier-Leibnitz-Labor); Mitglied im EU-network 'Applied Cryodetectors'; Mitglied des Peer Review Committee der ApPEC (Astroparticle Physics – European Coordination); Mitglied des Rates Deutscher Sternwarten; Mitglied des Gutachterausschusses Helmholtz-Preis; Chairman der 'XXth International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2002)', die vom 25. bis 30. Mai 2002 an der Technischen Universität München stattfand. Die Proceedings dieser Konferenz sind in Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 118 (2003) April 2003 (edited by Franz von Feilitzsch, Technische Universität München, und Norbert Schmitz, Max-Planck-Institut für Physik, München) veröffentlicht.

4 Wissenschaftliche Arbeiten

4.1 Spektroskopie solarer Neutrinos – GNO, BOREXINO

Teilprojektleiter: F. v. Feilitzsch.

Gruppenmitglieder: D. D'Angelo, F. v. Feilitzsch, M. Göger-Neff, C. Grieb, G. Korschinek, T. Lachenmaier, J.-C. Lanfranchi, C. Lendvai, L. Niedermeier, L. Oberauer, W. Potzel.

Einleitung

Die Gallium-Experimente GALLEX, SAGE und GNO, die die Reaktion ${}^{71}\text{Ga}(\nu_e, e){}^{71}\text{Ge}$ mit der niedrigen Energieschwelle von 233 keV verwenden, haben einerseits gezeigt, daß die theoretischen Vorstellungen zur Energieerzeugung in der Sonne zumindest in den wesentlichen Aspekten der pp-Reaktion richtig sind, andererseits haben sie das bereits im ${}^{37}\text{Cl}$ -Experiment von R. Davis Jr. gefundene Defizit an solaren Neutrinos mittlerer und hoher Energien auch für den Bereich niedriger Neutrinoenergien eindrucksvoll bestätigt. Dieses Defizit wurde als solares Neutrinorätsel bezeichnet. Die Echtzeitmessungen solarer ${}^8\text{B}$ -Neutrinos mit Hilfe der Cherenkov-Strahlung im Superkamiokande-Detektor und Sudbury Neutrino Observatory (SNO) und insbesondere die getrennte Messung der Raten von charged current (CC)- und neutral current (NC)-Reaktionen bei SNO haben klar gezeigt, daß bei solaren Neutrinos Flavorübergänge von Elektronneutrinos in Myonneutrinos oder Tauonneutrinos stattfinden (sog. Neutrinooszillationen). Auf dem Weg vom Entstehungsort im Inneren der Sonne bis zum Nachweis im Detektor auf der Erde wandeln sich etwa 2/3 der solaren ${}^8\text{B}$ -Elektronneutrinos in einen anderen Neutrino flavorzustand um. Der gesamte auf der Erde gemessene Fluß solarer ${}^8\text{B}$ -Neutrinos steht mit theoretischen Berechnungen voll in Einklang. Damit ist das solare Neutrinorätsel gelöst: es ist als eine Konsequenz von Neutrinomassen und Flavormischung zu verstehen, die zu Neutrinooszillationen führen. Al-

lerdings konnten die Oszillationsparameter (Massendifferenz Δm_{sol}^2 und Mischungswinkel θ_{sol}) erst durch das KamLAND-Experiment genauer eingegrenzt werden. Das KamLAND-Experiment mißt die Abnahme der Rate (disappearance) von Antielektronneutrinos $\bar{\nu}_e$, die von Leistungskernreaktoren im Umkreis von 80–350 km Entfernung zum Detektor (mittlere Entfernung ca. 180 km) erzeugt werden. Die von der KamLAND-Kollaboration erzielten Ergebnisse zeigen, daß im Rahmen von Flavor-Oszillationen und CPT-Invarianz die LMA(MSW)-Lösung in der Natur realisiert ist. Das hat zur Konsequenz, daß alternative Mechanismen, z. B. Spinflip durch ein eventuell vorhandenes magnetisches Moment des Neutrinos, Spin-Flavor-Präzession und Nicht-Standard-Neutrinowechselwirkungen, höchstens noch als Effekte höherer Ordnung zum solaren Neutrino-Rätsel beitragen können.

Eine globale Analyse aller bisherigen Daten über solare Neutrinos zusammen mit den Ergebnissen des KamLAND-Experiments ergibt als besten Fitpunkt für die Oszillationsparameter:

$$\Delta m_{sol}^2 = 7.1 \cdot 10^{-5} \text{eV}^2, \tan^2 \theta_{sol} = 0.406, \text{ d. h. } \theta_{sol} = 32.5^\circ.$$

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

$$\Delta m_{atm}^2 = 2.0 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2, \tan^2 \theta_{atm} = 1.0, \text{ d. h. } \theta_{atm} = 45^\circ.$$

Hier erfolgt eine Oszillation zwischen Myon- und Tauon neutrino, während eine Oszillation zwischen Myon- und Elektron neutrino bei diesen Parametern auf Grund der Reaktorexperimente Chooz und Palo Verde ausgeschlossen werden kann. Weiterhin ist eine Oszillation in sterile Neutrinos sehr unwahrscheinlich.

Im Vergleich zu Δm_{atm}^2 ist Δm_{sol}^2 etwa 30mal 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 das Ergebnis des LSND-Experiments bestätigt würde. In diesem Fall wäre ein steriles Neutrino erforderlich, das leicht genug sein müßte, um auch an den Oszillationen beteiligt zu sein. Das MiniBooNE-Experiment wurde begonnen, um das LSND-Ergebnis zu überprüfen. Bisher wurden von MiniBooNE noch keine Ergebnisse veröffentlicht.

Die Gallium-Experimente GNO und SAGE sind gegenwärtig die einzigen, die den niederenergetischen (sub-MeV) Anteil im solaren Neutrino-Spektrum messen können. Ein vorrangiges Ziel des BOREXINO-Experiments ist die erste direkte Messung des solaren ${}^7\text{Be}$ -Neutrinoflusses über die Neutrinostreuung an Elektronen. Weitere Ziele sind der Nachweis von 'long-baseline'-Reaktor-, Geo- und Supernovaneutrinos. Mit der erstmaligen Messung der solaren ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos kann die LMA-Lösung für Neutrinooszillationen überprüft werden und darüber hinaus könnte der fundamentale pp-Neutrinofluß unter Einbeziehung der Resultate von GNO, SAGE und SNO (sowie der Luminosität der Sonne) mit einer Genauigkeit $\leq 1\%$ bestimmt werden. Mögliche Beiträge zur Energieumsetzung in der Sonne aus dem CNO-Zyklus, die über den aus Modellen erwarteten Anteil hinausgehen, könnten gemessen werden. Der Fluß von Geoneutrinos verrät den Beitrag der Radioaktivität zum Wärmefluß der Erde. Neutrinos aller Flavors aus einer Supernova in unserer Galaxie würden über die Streuung an Protonen energiedispersiv nachgewiesen werden. Dies ist nur mit großen Szintillationsdetektoren wie BOREXINO möglich, die mit niedriger Energieschwelle arbeiten. Für die weitere Zukunft existieren Pläne zur Suche nach einem

magnetischen Neutrinomoment mit einer künstlichen Neutrinoquelle. Möglichkeiten für sensitive $\beta\beta$ -Experimente im BOREXINO-Detektor werden diskutiert.

Gallium Neutrino Observatory (GNO)

Im GNO-Experiment, das in den Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Italien) aufgebaut ist, werden 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 ist 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 besteht aus 101 t GaCl_3 , das in Wasser und Salzsäure aufgelöst ist und 30.3 t natürliches Gallium enthält. Die durch die solaren Neutrinos erzeugten ${}^{71}\text{Ge}$ -Atome werden etwa alle vier Wochen aus dem Galliumtank extrahiert und als German-Gas (GeH_4) in Proportionalzählrohre mit niedriger Untergrundaktivität eingebracht.

Die vorläufige bisherige Auswertung der Daten von GNO ergibt für die beobachtete Neutrinoeinfangsrate:

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

Werden die Daten von GALLEX und GNO kombiniert, so ergibt sich für die beobachtete 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 $(128^{+9}_{-7})\text{SNU}$. Dieses Ergebnis steht jedoch mit der von einer globalen Analyse (einschließlich der KamLAND-Ergebnisse) bevorzugten LMA-Lösung der Neutrino-Flavor-Übergänge (Neutrinooszillationen) voll in Einklang.

Gegenüber GALLEX konnte der systematische Fehler bei GNO insbesondere durch die inzwischen nahezu abgeschlossene 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-Untergrundeignisse, sowie einer neu entwickelten Datenanalyse unter Verwendung eines neuronalen Netzwerks. Der statistische Fehler bei GNO alleine entspricht gegenwärtig ± 5.4 SNU und der systematische Fehler ± 2.5 SNU. Im folgenden werden vorbereitende Arbeiten beschrieben, die das Ziel haben, beide Fehlerarten weiter zu reduzieren.

Kryodetektoren für das solare Neutrino-Experiment GNO

Um bei der Messung des Rückzerfalls von ${}^{71}\text{Ge}$ in ${}^{71}\text{Ga}$ sowohl die statistischen als auch die systematischen Fehler des Experiments noch weiter zu reduzieren, könnten die gegenwärtig verwendeten miniaturisierten Proportionalzählrohre durch hochauflösende Kryodetektoren ersetzt werden. Dabei ist aber darauf zu achten, daß die bereits etablierte hocheffiziente chemische Extraktionsmethode, die in einem monatlichen Zyklus einige wenige ${}^{71}\text{Ge}$ -Atome aus 101 t GaCl_3 -Lösung gewinnt, nicht geändert werden darf. Der Schlüssel ist das bei der chemischen Extraktionskette entstehende German-Gas (GeH_4), das durch CVD (Chemical Vapour Deposition) an einer heißen Oberfläche (Temperatur höher als 280 Grad Celsius) als metallisches Germanium abgeschieden werden kann.

Der von uns entwickelte 4π -Detektor mit hoher Nachweiswahrscheinlichkeit ($\sim 98\%$) erfüllt diese Anforderungen. Um die 4π -Geometrie zu erreichen, wurden zwei Kryodetektoren übereinander aufgebaut, wobei der untere den aus dem (GeH_4)-Gas abgeschiedenen Ge-Film von ca. $1 \mu\text{m}$ Dicke 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). Letztgenanntes 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 zu verhindern, daß die bei der Ge-Deposition notwendigen hohen Temperaturen das Ir/Au-Thermometer zerstören, wurde eine Methode entwickelt, die die Ge-Deposition von der Herstellung des Übergangsthermometers zeitlich trennt. Der wesentliche Schritt besteht dabei darin, daß ein Übergangsthermometer auf einem getrennten Silizium-Substrat (ca. $5 \times 7 \times 0.25 \text{ mm}^3$) hergestellt, getestet und erst nach der Ge-Deposition mit einem Spezialkleber auf dem Saphir-Substrat befestigt wird. Dieses Detektorkonzept hat sich sehr gut bewährt. Das Energiespektrum einer ^{55}Fe -Eichquelle hat gezeigt, daß der Klebeprozess die Energieauflösung (187 eV bei 6 keV) nicht negativ beeinflusst. Weiterhin ist die Energieschwelle des Detektors mit $\sim 100 \text{ eV}$ so niedrig, daß bei den Zerfallskanälen von ^{71}Ge nicht nur der Elektroneneinfang aus der K- und L-Schale, sondern auch aus der M-Schale (Energieabsorption von 160 eV) mit eingeschlossen werden kann.

Zur Vorbereitung eines Prototyp-Experiments am Gran-Sasso-Untergrundlabor (3600 m Wasseräquivalent) wurde im Untergrundlabor (15 m Wasseräquivalent) des „Beschleunigerlaboratoriums / Maier-Leibnitz-Laboratoriums“ in Garching ein Entmischungskryostat aufgebaut und getestet. Nach ersten Untergrundmessungen wurde die Abschirmung des Kryostaten verbessert. Sie besteht jetzt aus einer 15 cm dicken Bleiabschirmung, die 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. Das Hauptaugenmerk des weiteren Aufbaus liegt auf der Entwicklung einer untergrundarmen inneren Abschirmung des 4π -Detektors aus hoch-reinem Kupfer und antikem Blei.

BOREXINO

Eine erste direkte Messung des solaren ^7Be -Neutrinoflusses über die Neutrinostreuung an Elektronen ist ein ganz wesentliches Ziel des BOREXINO-Experiments. Der BOREXINO-Detektor wird im italienischen Gran-Sasso-Untergrundlabor aufgebaut. Als Target dient ein Flüssigszintillator mit einer Gesamtmasse von ca. 300 t. Das Szintillationslicht der Rückstoßelektronen wird von 2200 Photoelektronenvervielfachern (PVs) nachgewiesen, die auf der Innenseite einer Stahlkugel (Durchmesser 13 m) montiert sind. Energie und Ort werden über die Intensität und die zeitliche Analyse des Signals bestimmt. Die Nachschwelle soll bei 250 keV liegen. Damit kann für ein 'fiducial volume', das etwa 100 t entspricht, eine Reaktionsrate von etwa 35 solaren Neutrinos pro Tag erwartet werden. Erste Messungen der Lichtausbeute mit kleinen Szintillationsquellen zeigten sehr gute Werte. Auch (α/β)-Teilchenidentifikation über Pulsformanalyse wurde sehr erfolgreich getestet. Der Szintillatorbehälter besteht aus einem dünnen Nylonballon (Durchmesser des Ballons 8.5 m). Ein zweiter, äußerer Nylonballon soll Radondiffusion von außen liegenden Detektorkomponenten (z. B. PVs) unterbinden. Außerhalb des inneren Behälters befindet sich eine passive, transparente 'Buffer'-Flüssigkeit, die zur Abschirmung gegen Gammastrahlung und Neutronen dient. Die Stahlkugel befindet sich innerhalb eines großen Stahltanks (Höhe und Durchmesser jeweils ca. 18 m), der mit reinem Wasser gefüllt ist. Neben der zusätzlichen passiven Abschirmung wird durch die Anbringung von 208 externen PVs ein Myonveto (Wasser-Cherenkov-Detektor) realisiert, mit dem durchdringende kosmische Myonen nachgewiesen werden.

BOREXINO befindet sich im Aufbau der letzten Detektor-Komponenten. Zur Zeit werden die Nylonbehälter installiert. Danach können die letzten 200 PVs im inneren Detektor montiert und das Myonveto fertig gestellt werden. Dies sollte im Juni 2004 realisiert werden. Nach Tests der Elektronik könnte mit dem Füllen des Detektors begonnen werden. Zuerst soll der gesamte Detektor mit Reinstwasser gefüllt werden, das dann im inneren Teil durch den Szintillator (bzw. Buffer) ausgetauscht wird.

Zahlreiche Messungen zur Bestimmung der Konzentration radioaktiver Spurenelemente im Szintillator wurden in einer Testapparatur (ca. 4 t Szintillatormasse) im Gran-Sasso-Labor durchgeführt. Dabei wurden die Silikagelchromatographie und die Wasserextraktion als Reinigungsmechanismen untersucht. Es konnte gezeigt werden, daß im wesentlichen nur noch die Radontöchter ^{210}Pb , ^{210}Bi und ^{210}Po Probleme darstellen. Skaliert man die

jetzigen Werte auf die Größe von BOREXINO, so würde eine weitere Verringerung der Konzentrationen um einen Faktor von ca. 10 für das Gelingen von BOREXINO ausreichen. Laborexperimente und weitere Tests am Gran Sasso sollen belegen, daß dies zu erreichen ist. Weitere Probleme, die auf den Eintrag radioaktiver Isotope der Edelgase Kr und Ar (über N₂-Spülung des Szintillators) zurückzuführen sind, wurden inzwischen von der Arbeitsgruppe des MPI Heidelberg gelöst.

Arbeiten, die im letzten Jahr unter Mitwirkung der TUM-Gruppe durchgeführt wurden, werden im folgenden beschrieben.

*System zur Kalibrierung von BOREXINO mit radioaktiven Quellen
(Virginia Polytechnic Institute and State University und TU München)*

Eine Kalibrierung des BOREXINO-Detektors mit radioaktiven Quellen ist aus mehreren Gründen unerlässlich. Die Energieeichung und die Energieauflösung des Detektors werden eine räumliche Abhängigkeit besitzen, welche man mit einer im Detektor frei positionierbaren radioaktiven Quelle gut bestimmen kann. Eine Ortsrekonstruktion der einzelnen Events ist für die Analyse der Daten erforderlich, da ein Fiducial Volume Cut verwendet wird. Diese Ortsrekonstruktion geschieht mittels Analyse der Zeitinformation der PVs und muß ebenfalls getestet und kalibriert werden. Des weiteren wird bei der Analyse der BOREXINO-Daten eine Diskrimination zwischen Alpha- und Beta-Ereignissen angewandt. Die Effizienz dieser Diskrimination ist sowohl energie- als auch ortsabhängig und kann durch Einbringen verschiedener radioaktiver Quellen und Messung an verschiedenen Orten bestimmt werden.

Das Kalibrierungssystem besteht aus zwei Komponenten: Einer Vorrichtung, die das sichere Einführen radioaktiver Quellen in den Szintillator von BOREXINO erlaubt, und einem Lokalisierungssystem, welches die Position der radioaktiven Quelle mit einer Genauigkeit von ± 2 cm bestimmen kann. Das Lokalisierungssystem besteht aus 7 Digitalkameras, welche den Szintillator aus verschiedenen Richtungen überblicken. Eine an der radioaktiven Quelle angebrachte Leuchtdiode wird auf allen 7 Bildern gesucht und dann ihre Position trianguliert. Das System ist so realisiert, daß der gesamte Lokalisierungsvorgang vollautomatisch durchgeführt wird.

Myonveto (TU-München)

Der BOREXINO-Detektor wird von einem Tank mit ca. 2500 t Wasser abgeschirmt. Dieser Wassertank dient gleichzeitig als Wasser-Cherenkov-Detektor für atmosphärische Myonen. Dabei registrieren 208 PVs, die auf der Außenseite der Stahlkugel angebracht sind, die Cherenkov-Photonen, die von durchgehenden Myonen erzeugt werden. Dieses sogenannte Myonveto ist in der Lage, die Myonenrate im BOREXINO-Detektor um ca. 99 % zu unterdrücken. Gleichzeitig kann mittels des Myonvetos die Myonspur rekonstruiert werden. Die Genauigkeit, mit der diese Rekonstruktion durchgeführt wird, ist dafür ausschlaggebend, wie gut die myoninduzierten Sekundärteilchen detektiert und der durch sie eingebrachte Untergrundsbeitrag unterdrückt werden kann. Durch eine deutliche Unterdrückung dieses Beitrags können die gemessenen pep-Neutrino- sowie die CNO-Neutrino-Raten im Spektrum erkennbar werden. Im letzten Jahr wurde die Datenaufnahme des Myonvetos fertig gestellt und erfolgreich getestet. Die Hauptkomponenten der Offline-Analyse sind realisiert. Monte-Carlo Rechnungen zur Simulation der Spur-Rekonstruktion werden zur Zeit getestet.

Reinigung des Szintillators (TUM und University of Princeton)

In den letzten Jahren wurden mit der CTF-Testapparatur von BOREXINO wertvolle Informationen bzgl. der Möglichkeit zur Reinigung des Flüssigszintillators gewonnen. Dabei sollen radioaktive Isotope der Uran- und Thoriumketten sowie anderer primordialer Elemente wie z. B. ⁴⁰K, mittels geeigneter Verfahren aus der Flüssigkeit entfernt werden. Da der Szintillator nur ein sehr geringes elektrisches Dipolmoment besitzt, können vorliegende polare Verunreinigungen mittels Silikagel-Chromatographie und Wasserreinigung extrahiert werden. Labortests zeigten die prinzipielle Machbarkeit dieser Verfahren. In CTF-

Tests wurden diese Verfahren mit einer Masse von ca. 4 t Szintillator erprobt. Es verbleibt nur ein Untergrund, der auf die Radontöchter ^{210}Pb zurückzuführen ist. Gelingt es, diesen Beitrag noch um einen Faktor ~ 10 (durch Verhinderung von Rekontamination) in der Anlage zu drücken, wird das Neutrinosignal in BOREXINO den Untergrund dominieren.

4.2 Entwicklung und Einsatz von Kryodetektoren zum Nachweis von Teilchen der Dunklen Materie (WIMPs) über die elastische Streuung an Kernen

Teilprojektleiter: J. Jochum, Stellvertreter: F. Pröbst.

Gruppenmitglieder: F. von Feilitzsch, M. Huber, T. Jagemann, J. Jochum, J. König, W. Potzel, M. Razeti, W. Rau, K. Rottler, M. Stark, D. Wernicke, W. Westphal, H. Wulandari.

Einleitung

Das Experiment CRESST hat zum Ziel, nach schwach wechselwirkenden, schweren Teilchen – Weakly Interacting Massive Particles oder WIMPs – zu suchen. Solche Teilchen gelten als gute Kandidaten zur Lösung des Problems der Dunklen Materie. In dieser Funktion wären WIMPs in unserer Galaxie mit einer Dichte von ungefähr $3 \text{ GeV}/\text{cm}^3$ vorhanden und könnten terrestrisch nachgewiesen werden.

WIMPs wechselwirken mit üblicher, d. h. atomarer Materie über Rückstöße an Kernen. Zum Nachweis der Kernrückstöße wurden bei CRESST Tieftemperatur-Detektoren gewählt. Dabei handelt es sich um Kristalle, deren durch einen Kernrückstoß erzeugte Gitterschwingungen (Phononen) durch einen Phononensensor nachgewiesen werden. Damit der geringe zu erwartende Energieübertrag nachgewiesen werden kann, müssen die thermischen Phononen durch Abkühlen des Targets auf tiefe Temperaturen (um 10 mK) unterdrückt werden. Die bei der Wechselwirkung erzeugten Phononen werden in einem supraleitenden Film auf der Kristalloberfläche, der sich genau am Übergang vom supraleitenden zum normalleitenden Zustand befindet, absorbiert und erhöhen dessen Temperatur. Dadurch kommt es zu einer deutlichen Änderung des elektrischen Widerstandes, die mit einem SQUID-Auslesekreis gemessen wird. Ein solcher Sensor wird als Phasenübergangsthermometer oder auf englisch als Transition Edge Sensor (TES) bezeichnet.

Bei dem verwendeten Kristall handelt es sich um einen Szintillator (CaWO_4). Bei elektromagnetischen Wechselwirkungen, wie sie beispielsweise von γ -Strahlung hervorgerufen werden, beträgt die Lichtausbeute (das ist der Anteil der Energie, der in Szintillationslicht umgesetzt wird) ca. 1–2%. Bei Kernrückstößen ist die Lichtausbeute sehr viel niedriger. Durch gleichzeitige Beobachtung des Phononen- und des Lichtsignals läßt sich der Hauptuntergrund, die radioaktive β - und γ -Strahlung der Umgebung, sehr effektiv von dem gesuchten Signal, das von WIMPs erwartet wird, diskriminieren. Als Lichtdetektor dient ein Tieftemperatur-Detektor aus Silizium, der ebenfalls mit einem TES ausgestattet ist.

Das gesamte Detektormodul aus einem zylindrischen CaWO_4 -Kristall (Durchmesser und Höhe je 40 mm) und dem Lichtdetektor ($30 \times 30 \times 0,5 \text{ mm}$) ist für eine effiziente Lichtsammmlung von einer reflektierenden Folie umgeben. Die Energieschwelle, die mit diesem Modul erreicht werden kann, liegt für den Phononenkanal bei 1 bis 2 keV, der Lichtdetektor kann Energien ab etwa 20 eV nachweisen, was bei einer Lichtausbeute von 1% ebenfalls 2 keV entspricht. Die Schwelle, von der an effektiv zwischen elektromagnetischer Wechselwirkung und Kernrückstößen unterschieden werden kann, und die damit auch die Schwelle ist, von der an ein WIMP-Nachweis gelingen kann, liegt bei ungefähr 15 keV. Der erwartete Energieübertrag durch WIMPs liegt im Bereich von 10–50 keV.

Rückstoß-Eichung

Außer durch WIMPs können Kernrückstöße auch durch Neutronen hervorgerufen werden. Daher können Neutronen auch verwendet werden, um die Reaktion des Detektors auf diese Art der Wechselwirkung zu testen. Das von CRESST verwendete Targetmaterial besteht

aus drei verschiedenen Elementen. Bei Bestrahlung des Detektors mit einer üblichen Neutronenquelle wird das gemessene Signal von Sauerstoff-Kernrückstößen dominiert, weil ein Neutron als leichtes Projektil an einem leichten Target (die Masse des Sauerstoff-Kerns ist mit 16 a.u. gering im Vergleich zu Kalzium mit 40 a.u. oder gar Wolfram mit ca. 180 a.u.) einen höheren Energieübertrag erzielen kann als an einem schweren Target. Die erwartete Masse von WIMPs ist mit 10–1000 GeV deutlich größer, als die der Neutronen. Zudem ist der Wirkungsquerschnitt (im Falle, daß die Wechselwirkung nicht durch Spin-Effekte dominiert wird) proportional zum Quadrat der Kernmasse, so daß ein WIMP-Signal hauptsächlich von Rückstößen an Wolfram erwartet wird. Daher ist es notwendig, die Reaktion des Detektors auf einen Wolfram-Rückstoß gesondert zu untersuchen.

Dazu wurde am Maier-Leibnitz-Labor in Garching am dortigen Tandem-Beschleuniger ein Experiment aufgebaut, bei dem das zu untersuchende Target mit einem gepulsten monoenergetischen Neutronenstrahl beschossen wird. Die gestreuten Neutronen werden unter einem festen Winkel nachgewiesen und deren Energie durch die Messung der Flugzeit bestimmt. Dadurch ist die Kinematik jedes einzelnen nachgewiesenen Rückstoßereignisses vollständig festgelegt und aus der Vielzahl der Kernrückstöße können die wenigen niederenergetischen Rückstöße an Kalzium- und Wolfram-Kernen herausgefiltert werden.

Bislang wurden solche Messungen erfolgreich bei Raumtemperatur durchgeführt und erste Ergebnisse der sehr aufwendigen Datenanalyse werden in den nächsten Monaten erwartet.

Es ist jedoch bekannt, daß Szintillationseigenschaften stark von der Temperatur des Szintillators abhängen können. Daher ist die Installation eines Kryostaten im Neutronenstrahl in Arbeit. Zudem wurden spezielle Tieftemperatur-Detektoren aus CaWO_4 entwickelt, die unter den Bedingungen, wie sie bei einem solchen Experiment herrschen, betrieben werden können. Erste Tests dieser Detektoren in dem neuen Kryostaten sind in den nächsten Monaten vorgesehen.

Status des CRESST-Experiments

Das CRESST-Experiment wird zur Abschirmung gegen die Höhenstrahlung im Gran-Sasso-Untergrundlabor in Italien durchgeführt. Der Tieftemperatur-Kryostat ist umgeben von ca. 30 t Blei und Kupfer zur Abschirmung der radioaktiven Strahlung aus dem umgebenden Fels und von einem Faraday-Käfig zur Abschirmung von elektromagnetischen Störungen. Die aktuelle Ausstattung erlaubt den gleichzeitigen Betrieb von zwei Detektormodulen.

Resultate

Der jüngste Datensatz des CRESST-Experiments entspricht einer Exponierung von knapp 10 kg-Tagen. Das dominante Merkmal dieses Datensatzes ist erwartungsgemäß das Signal des radioaktiven γ -Untergrundes mit einer hohen Lichtausbeute. Hier fällt besonders eine Linie bei 46 keV auf, die auf eine externe Kontamination von ^{210}Pb zurückgeführt werden kann. Dieses Nuklid tritt in der natürlichen Zerfallsreihe von ^{238}U als langlebiges Tochter-nuklid von ^{222}Rn auf.

Diese Kontamination könnte auch verantwortlich sein für ein zweites Merkmal dieses Datensatzes: Im Bereich zwischen 60 und 120 keV gibt es eine Population von Ereignissen mit geringer Lichtausbeute. Dabei könnte es sich um Atomkerne handeln, die durch den α -Zerfall von ^{210}Po von dem umgebenden Material emittiert werden. Obwohl es sich bei dieser Population um Ereignisse handelt, die vermutlich von Kernrückstößen herrühren, bilden sie keine wesentliche Einschränkung der Empfindlichkeit für die Messung eines möglichen WIMP-Signals, da die Rückstoßenergie deutlich höher ist als die, welche von WIMPs erwartet wird.

Im Energiebereich, in dem WIMPs erwartet werden, liegen ungefähr 8–10 Ereignisse. Diese Anzahl entspricht in etwa dem, was von Neutronen aus spontaner Spaltung und (α ,n)-Reaktionen im umgebenden Gestein erwartet wird. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, daß es sich dabei nicht zum Teil auch um WIMP-Ereignisse handelt. Daher wird

eine konservative obere Grenze für den möglichen Wirkungsquerschnitt zwischen WIMPs und Nukleonen angeben. In die Berechnung dieser Grenze fließen Annahmen unter anderem über die Verteilung der Dunklen Materie in unserer Galaxie ein. Daher kann diesen Grenzen kein absoluter Wert beigemessen werden, jedoch ermöglicht dieses Vorgehen einen Vergleich zwischen verschiedenen Experimenten. Mit diesen neuesten Ergebnissen liegt CRESST nun nur noch etwa einen Faktor zwei hinter dem amerikanischen CDMS-Experiment, das lange führend war auf diesem Gebiet und erst kürzlich von EDELWEISS um ungefähr einen Faktor drei überholt wurde. Diese beiden Experimente arbeiten mit einer ähnlichen Technik wie CRESST, nur wird Germanium als Target eingesetzt und statt des Szintillationslichtes wird hier ein Ladungssignal gemessen.

Pläne für die Zukunft

Das aktuelle Ergebnis von CRESST wird durch den Neutronen-Untergrund limitiert. Daher ist es notwendig, zusätzlich zu der bisherigen Abschirmung noch eine Neutronen-Abschirmung zu installieren. Dafür eignen sich besonders wasserstoffreiche Materialien, die die Neutronen effektiv moderieren können. Vorgesehen ist die Installation eines Neutronen-Moderators aus 30–50 cm Polyethylen (insgesamt mehr als 10 t). Die nächste Limitierung wird dann von Neutronen kommen, die durch die wenigen in dieser Tiefe noch verbleibenden Myonen in der Blei-Abschirmung produziert werden. Daher soll gleichzeitig ein Myonenveto installiert werden. Um die Empfindlichkeit weiter zu erhöhen, soll auch die Target-Masse vergrößert werden. Zu diesem Zweck ist eine deutliche Erweiterung der Elektronik vorgesehen, so daß in Zukunft mehr als 30 Module (ungefähr 10 kg Targetmasse) gleichzeitig betrieben werden können. Die notwendigen Vorbereitungen für diese Aufrüstung sind im wesentlichen getroffen und das Material ist größtenteils vorhanden. Die Umbaumaßnahmen sollen im März 2004 beginnen.

Die aktuelle Empfindlichkeit für den Wirkungsquerschnitt zwischen WIMPs und Nukleonen liegt bei etwa 10^{-6} pb. Supersymmetrische Theorien sagen Elementarteilchen vorher, die als WIMPs in Frage kommen. Wenn ein Wirkungsquerschnitt von etwa 10^{-10} pb experimentell ausgeschlossen werden kann, dann bedeutet das eine extrem starke Einschränkung an mögliche supersymmetrische Modelle. Andererseits ist das Entdeckungspotential hoch, wenn man annimmt, daß diese Theorien eine richtige Beschreibung unserer Natur sind. Daher gibt es Pläne, die Möglichkeiten eines Experimentes mit dieser Empfindlichkeit zu untersuchen. Da die Kosten dafür sehr hoch sein werden, kann so ein Experiment nicht mehr auf nationaler Ebene durchgeführt werden.

Da Ähnliches auch für andere Bereiche der Astroteilchenphysik gilt, wurde im letzten Jahr das ILIAS-Projekt (Integrating Large Infrastructures for Astroparticle Science) ins Leben gerufen, gefördert innerhalb des 6. Rahmenprogramms der EU. Hier arbeitet eine große Zahl von Instituten aus ganz Europa zusammen, um die Forschung in der Astroteilchenphysik zu koordinieren. Innerhalb dieses Projekts gibt es Netzwerke, die dem Informationsaustausch dienen, sogenannte ‘Joint Research activities’, innerhalb derer konkrete Fragestellungen von mehreren Gruppen gemeinsam bearbeitet werden, und ein sogenanntes ‘Transnational Access’; hier wird insbesondere der Zugang zu den großen Untergrund-Laboratorien in Europa koordiniert und organisatorisch erleichtert.

Darüberhinaus wird in Zusammenarbeit mit Gruppen aus Deutschland, Frankreich und Großbritannien an einem Vorschlag gearbeitet, mit dem Ziel, konkrete Voruntersuchungen zu einem Experiment durchzuführen, das die Suche nach WIMPs mit hoher Empfindlichkeit ermöglicht.

Hochauflösende Röntgen-Detektoren basierend auf supraleitenden Tunneldioden

Weiterhin werden an unserem Institut Tieftemperaturdetektoren basierend auf supraleitenden Aluminium-Tunneldioden (Al-STD) für den Einsatz in der hochauflösenden Röntgenfluoreszenzanalyse entwickelt. Al-STD bestehen aus zwei supraleitenden Al-Schichten mit Dicken im 100-nm-Bereich, die durch eine dünne dielektrische Tunnelbarriere getrennt sind. Die Detektorfläche beträgt typischerweise $100 \times 100 \mu\text{m}^2$. Bei Energiedeposition in

den supraleitenden Elektroden werden Cooper-Paare aufgebrochen; das Tunneln der hierbei entstehenden Quasiteilchen über die Tunnelbarriere führt zu einem meßbaren Strom. Al-STD können entweder direkt als Detektor oder zur Auslese von supraleitenden Absorberfilmen verwendet werden. In unserem Fall wird auf der oberen Aluminiumelektrode ein supraleitender Bleiabsorberfilm von etwa $1.3 \mu\text{m}$ Dicke zur Erhöhung der Absorptionseffizienz aufgebracht; sie beträgt etwa 50 % bei Röntgenenergien um 6 keV und ist größer als 99.9 % unterhalb von 1 keV. Zwischen Bleiabsorber und Aluminiumelektrode befindet sich eine dielektrische Isolationsschicht, um eine gegenseitige Beeinflussung der Energielücken der beiden Supraleiter über den Proximity-Effekt zu vermeiden, welche zu einer Reduktion des Signals führen kann. Die Auslese des Absorbers geschieht über Phononen, die aus dem Absorber emittiert und in den Elektroden absorbiert werden. Ein derartiges Detektorsystem konnte eine Energieauflösung von 10.8 eV bei einer Röntgenenergie von 5.9 keV erreichen; kommerzielle halbleiterbasierte Detektorsysteme erreichen bei diesen Energien nicht unter 100 eV Auflösung.

Basierend auf Detektorcharakterisierungsmessungen, die in Kollaboration mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt am Elektronenspeicherring BESSY II (Berlin) durchgeführt wurden, konnte ein physikalisches Detektormodell entwickelt werden, das die Klärung von zwei zentralen anwendungsrelevanten Fragestellungen ermöglicht: Detektorlinearität und Detektorartefakte. Ein Kernpunkt dieses Modells ist das Verständnis des phononischen Energietransports aus dem Absorber in die Elektroden. Bei Röntgenstrahlungsabsorption im Absorber werden Cooperpaare in Quasiteilchen aufgebrochen. Nach einer gewissen Lebensdauer im μs -Bereich rekombinieren diese unter Emission monoenergetischer Phononen wieder zu Cooperpaaren. Die Zeitstruktur dieser Phononenemission, bestimmt durch die Lebensdauer der Quasiteilchen, spiegelt sich im Verlauf der ansteigenden Flanke der Signale wider. Leider weist die Lebensdauer der Quasiteilchen eine nichtlineare Energieabhängigkeit auf, die gemeinsam mit einem weiteren, bereits von Al-STDs ohne Absorber bekannten nichtlinearen Energieverlustprozeß eine physikalisch komplexe Nichtlinearität in die Relation von Signallhöhe und Röntgenenergie einführt. Mit dem neuen Detektormodell konnten diese Einflüsse nicht nur identifiziert und quantifiziert werden, sondern zudem eine Ladungsbilanzgleichung formuliert werden, welche eine schnelle und einfache Korrektur der Nichtlinearität des Detektorsignals ermöglicht.

Zudem konnte anhand des physikalischen Modells die Detektorresponse auf eine gegebene Röntgenenergie vollständig verstanden werden. Es sind im Spektrum der Detektorsignale einige Detektorartefakte sichtbar, die jedoch geringe Intensitäten von unter einem Prozent verglichen mit der Hauptlinie aufweisen. Das Modell erlaubt eine klare Zuordnung der Ereignisgruppen zu verschiedenen physikalischen Prozessen im Detektorsystem, welche die Abweichung der Detektorresponse verursachen. Da sich der Großteil dieser physikalischen Prozesse auch in einer Abweichung der Signalform äußert, konnten anhand des Detektormodells Methoden zur fast vollständigen Unterdrückung dieser Artefaktereignisse entwickelt werden.

Beide Erkenntnisse stellen, neben dem Gewinn durch das deutlich vertiefte Verständnis der Funktionsweise des Detektors, auch einen deutlichen Schritt zu einer praktischen Anwendung des Detektors dar, da hierfür Werkzeuge zur Korrektur der Nichtlinearität und zur Unterdrückung von Detektorartefakten eine notwendige Voraussetzung sind.

In einem ersten praktischen Schritt zur Anwendung wurde ein Al-STD-basiertes Detektorsystem in ein kryogenes Spektrometer integriert, welches bei der Fa. Infineon Technologies AG zur Fehleranalyse von Si-Wafern an einem Elektronenmikroskop eingesetzt wird. Dieser erste Test verlief zufriedenstellend und eröffnet den Weg zu einem industriellen Einsatz dieses Detektorsystems.

5 Dissertationen

Wulandari, Hesti R. T.: Study on Neutron-induced Background in the Dark Matter Experiment CRESST

6 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, so daß 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.

7 Veröffentlichungen

- Angloher, G. et al.: CRESST-II: Dark Matter search with scintillating absorbers. Nucl. Instr. Meth. A, accepted
- Angloher, G. et al. (CRESST Collaboration): CRESST-II: Dark Matter search with scintillating absorbers. In: Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP). Proc. 8th Int. Workshop, Sept. 5–9, 2003, Seattle, Wash. USA., accepted
- Back, H.O. et al. (BOREXINO Collaboration): New experimental limits on heavy neutrino mixing in ^8B -Decay obtained with the BOREXINO Counting Test Facility. JETP Lett. **78** (2003), 261
- Back, H.O. et al. (BOREXINO Collaboration): New limits on nucleon decays into invisible channels with the BOREXINO Counting Test Facility. Phys. Lett. B **563** (2003), 23
- Back, H.O. et al. (BOREXINO Collaboration): Study of neutrino electromagnetic properties with the prototype of the BOREXINO detector. Phys. Lett. B **563** (2003), 37
- Cozzini, C. et al. (CRESST Collaboration): CRESST cryogenic Dark Matter Search. In: Sources and Detection of Dark Matter and Dark Energy in the Universe. Proc. 6th UCLA Symp., Feb. 18–20, 2004, Marina del Rey, CA, USA., accepted
- Frank, M. et al.: Cryogenic detectors and their application to X-ray fluorescence analysis. J. X-ray Sci. Techn. **11** (2003), 83
- Hollerith, C. et al.: Energy dispersive X-ray spectroscopy with microcalorimeters. Nucl. Instr. Meth. A, accepted
- Huber, M. et al.: Superconducting tunnel junction as detectors for high-resolution X-ray spectroscopy. X-ray Spectrom., accepted
- Huber, M. et al.: Characterization of an Al-STJ-based X-ray detector with monochromatized synchrotron radiation. Nucl. Instr. Meth. A, accepted
- Jagemann, Th. et al. (CRESST Collaboration): Recent results of the CRESST WIMP search. In: Ryder, S., Pisano, D.J., Walker, M., Freeman, K. (eds.): Dark Matter in Galaxies. IAU Symposium 220. Publ. Astron. Soc. Pac., accepted
- Jochum, J. for the CRESST Collaboration: The CRESST Dark Matter search. In: Proc. Suppl. Nucl. Phys. B **124** (2003), 189
- Kirsten, T. et al. for the GNO Collaboration: Progress in GNO. In: Proc. Suppl. Nucl. Phys. B **118** (2003), 33

- Lanfranchi, J.-C. et al.: Development of Highly Efficient Cryogenic Detectors for GNO. In: Proc. Suppl. Nucl. Phys. B **118** (2003), 446
- Lanfranchi, J.-C. et al.: Development of a cryogenic detection concept for GNO. Nucl. Instr. Meth. A, accepted
- Lissitski, M.P. et al.: Annular superconducting tunnel junction with injected current as a new configuration of radiation detector. Nucl. Instr. Meth. A, accepted
- Lissitski, M.P. et al.: X-ray energy spectrum measurements by an annular superconducting tunnel junction with trapped magnetic flux quanta. Appl. Phys., Lett., submitted
- Niedermeier, L. et al.: Scintillator purification by Silica Gel chromatography in the context of low-counting rate experiments. In: Advanced Technology and Particle Physics (ICATPP). Proc. 8th Int. Conf., Oct. 6–10, 2003, Como, Italy. accepted
- Oberauer, L. et al.: Light Concentrators for the Solar Neutrino Experiment BOREXINO. Nucl. Instr. Meth. A., accepted
- Oberauer, L.: Low energy neutrino physics after SNO and KamLAND. Mod. Phys., Lett. A **19** (2004), 1
- Oberauer, L. et al.: A large liquid scintillator detector for low-energy neutrino astronomy. In: Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP). Proc. 8th Int. Workshop, Sept. 5–9, 2003, Seattle, Wash. USA., accepted
- Spiro, M., Lachenmaier, T.: Neutrino Properties and Neutrino Astronomy: Where do we stand, where are we going? – Experiments. In: Proc. Suppl. Nucl. Phys. B **118** (2003), 413
- Stark, M. et al.: Detectors with Ir/Au thermometers for high count rate tests in the CRESST experiment. Nucl. Instr. Meth. A, accepted
- Wulandari, H. et al.: Neutron background for the CRESST experiment. In: Spooner, N., Kudryavtsev, V. (eds.): Identification of Dark Matter (IDM 2002). Proc. 4th Conf., World Sci., hep-ex/0310042.
- Wulandari, H. et al.: Neutron flux underground revisited. Astroparticle Phys., submitted and hep-ex/0312050
- Wulandari, H. et al.: Neutron background studies for the CRESST Dark Matter experiment. Astroparticle Phys., submitted and hep-ex/0401032
- Wulandari, H. et al.: Study on neutron-induced background in the CRESST experiment. In: Ryder, S., Pisano, D.J., Walker, M., Freeman, K. (eds.): Dark Matter in Galaxies. IAU Symposium 220. Publ. Astron. Soc. Pac., accepted

Franz von Feilitzsch

