

## München (Garching)

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

James-Franck-Straße, 85748 Garching  
Tel.: (089) 289-12511, Fax: (089) 289-12680  
Internet: <http://www.e15.physik.tu-muenchen.de/>  
E-Mail: [franz.vfeilitzsch@ph.tum.de](mailto:franz.vfeilitzsch@ph.tum.de)

### 0 Allgemeines

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

Schwerpunkte der Forschungsarbeiten sind die Spektroskopie solarer Neutrinos mit den Experimenten BOREXINO und GNO (Nachfolge von GALLEX) sowie die Suche nach Dunkler Materie mit dem Experiment CRESST.

Die Frage nach der Ursache für das in verschiedenen Sonnenneutrino-Experimenten gemessene Defizit an Neutrinos, das sog. solare Neutrino-Rätsel, erscheint beantwortet: 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 wird zukünftig in noch stärkerem Maße auf astrophysikalischen Fragestellungen liegen als bisher. Von besonderer Bedeutung wird die genaue Bestimmung des fundamentalen pp-Neutrinoflusses und des monoenergetischen  ${}^7\text{Be}$ -Neutrinoflusses sein. Weitere Ziele sind neue Obergrenzen oder Werte für den CNO-Beitrag zur Energieumsetzung in der Sonne.

Das Experiment CRESST wurde nach dem Umzug in Halle A des Gran-Sasso-Untergroundlabors wieder in Betrieb genommen. Es werden neu entwickelte Detektoren auf der Basis von  $\text{CaWO}_4$ -Einkristallen eingesetzt, die gleichzeitig zum Phononensignal das bei einer Wechselwirkung ebenfalls erzeugte Szintillationslicht messen. Dadurch wurde die Trennung von Kernrückstoß-Ereignissen und ionisierender Untergrundstrahlung wesentlich verbessert. Es ist das Ziel von CRESST, einen signifikanten Teil des von Theorien der Supersymmetrie vorhergesagten Parameterbereichs für Kandidaten der Dunklen Materie zu erfassen.

Unser Institut war maßgeblich an der Organisation der 'XXth International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2002)' beteiligt, die vom 25. bis 30. Mai 2002 an der Technischen Universität München stattfand. Einzelheiten sind im WEB unter <http://neutrino2002.ph.tum.de/> zu finden.

## 1 Personal und Ausstattung

### 1.1 Personalstand

#### *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], Doreen Wernicke [-12525].

#### *Doktoranden:*

Dipl.-Phys. Christian Grieb [-12328], 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. Alexander Wingler [-12525], Dipl.-Phys. Hesti Wulandari [-14416].

#### *Diplomanden:*

Christian Hollerith [-12525], Stefan Waller [-12516].

#### *Sekretariat:*

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

#### *Technisches Personal:*

Harald Hess [-12521].

#### *Werkstatt:*

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

## 2 Gäste

Prof. Dr. Samoil Bilenky, Dubna (Rußland); Dr. Bryce Moffat, Queen's University, Kingston, Ontario (Kanada).

## 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 zum Teil gemeinsam oder auch koordiniert 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 und stellen eine zwingende Voraussetzung für den Studiengang Astro-Teilchenphysik dar. 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-Untergrundlabor 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.

## 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, A. Winkler.

#### *Einleitung*

Die solare Neutrinoforschung hat sich seit dem Pionier-Experiment von R. Davis Jr, das solare Neutrinos radiochemisch über die Reaktion  $^{37}\text{Cl}(\nu_e, e)^{37}\text{Ar}$  nachwies zu einem wichtigen Forschungsgebiet der Astroteilchenphysik entwickelt. 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 (unter der Annahme, daß die pp-Reaktion und nicht der CNO-Zyklus für den weitaus größten Anteil der Luminosität verantwortlich ist), andererseits haben sie das bereits im  $^{37}\text{Cl}$ -Experiment 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 Cerenkov-Strahlung bei Superkamiokande und bei SNO und insbesondere die getrennte Messung der Raten von CC- und NC-Reaktionen bei SNO haben deutlich gemacht, daß das solare Neutrinorätsel mit großer Wahrscheinlichkeit als eine Konsequenz von Neutrinomassen und Flavormischung zu verstehen ist. Die Existenz von Flavormischung und eines nicht-entarteten Massenspektrum führt zu Neutrinooszillationen auf dem Weg vom Entstehungsort im Innern der Sonne bis zum Nachweis im Detektor auf der Erde. Allerdings konnten die Oszillationsparameter (Massendifferenz  $\Delta m_{sol}^2$  und Mischungswinkel  $\theta_{sol}$ ) nicht eindeutig bestimmt, sondern nur auf drei Bereiche mit großem Mischungswinkel eingeschränkt werden: den LMA(MSW)-, LOW(MSW)- und VAC-Lösungen. Der experimentell bestimmte Gesamtfluß an  $^8\text{B}$ -Neutrinos steht mit den theoretischen Vorhersagen des Standard Solar Model (SSM) in guter Übereinstimmung. Innerhalb der drei Oszillationslösungen kommen die im Sonneninnern erzeugten Elektroneneutrinos  $\nu_e$  nur noch mit etwa 1/3 des Gesamtflusses auf der Erde an. Die restlichen

2/3 des Gesamtflusses der  $^8\text{B}$ -Neutrinos bestehen aus anderen Flavorzuständen (Myon- und/oder Tauon-Neutrinos). Allerdings wurden auch sog. Nicht-Standard-Lösungen weiterhin eingehend diskutiert. Erst in jüngster Zeit konnte durch das KamLAND-Experiment ein weiterer bedeutender Fortschritt erzielt 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 erzeugt werden. Bei einer mittleren Entfernung von ca. 180 km zwischen Reaktoren und Detektor ist es möglich, die LMA(MSW)-Lösung sensitiv zu testen. Das erste von der KamLAND-Kollaboration veröffentlichte Ergebnis mit 54 Ereignissen (nach allen cuts) zeigt, daß im Rahmen von Flavor-Oszillationen und CPT-Invarianz die LMA(MSW)-Lösung gegenüber den beiden anderen in der Natur stark ( $>3\sigma$ ) bevorzugt 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, nur noch als Effekte höherer Ordnung zum solaren Neutrino-Rätsel beitragen können.

Werden alle bisherigen Daten über solare Neutrinos zusammen mit den Ergebnissen des KamLAND-Experiments in einer globalen Analyse berücksichtigt, so ergibt sich als bester Fitpunkt für die Oszillationsparameter:

$$\Delta m_{sol}^2 = 6.9 \cdot 10^{-5} \text{eV}^2, \tan^2 \theta_{sol} = 0.46.$$

Im Vergleich zum besten Fitpunkt für atmosphärische Neutrinooszillationen

$$\Delta m_{atm}^2 = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2, \tan^2 \theta_{atm} = 1.0$$

ist  $\Delta m_{sol}^2$  etwa 30mal kleiner und der Mischungswinkel  $\theta_{sol}$  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  $\theta_{13}$  (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 hat inzwischen mit den Messungen begonnen, um das LSND-Experiment zu überprüfen.

Die Experimente GNO und BOREXINO werden auch zukünftig für die solare Neutrinospektroskopie eine entscheidende Rolle spielen. Die Gallium-Experimente GNO und SAGE sind gegenwärtig die einzigen, die den niederenergetischen (sub-MeV) Anteil im solaren Neutrino-Spektrum messen können. Im  $^{37}\text{Cl}$ -Experiment besteht zwar ein Teil der beobachteten  $\nu_e$ -Rate aus  $^7\text{Be}$ -Ereignissen. Nach Abzug der  $^8\text{B}$ -Rate ist jedoch der Fehler in der Bestimmung der  $^7\text{Be}$ -Rate verhältnismäßig groß. Durch eine gemeinsame Analyse der GNO- und BOREXINO-Resultate wird es möglich sein, den pp- $\nu_e$ -Fluß und den  $^7\text{Be}$ - $\nu_e$ -Fluß mit einer Genauigkeit von jeweils  $\sim 20\%$  getrennt zu messen. Falls ein unerwartet hoher Anteil des  $\nu_e$ -Flusses aus dem CNO-Zyklus auftreten würde, könnte mit diesen Daten auch dazu eine Aussage gemacht werden.

Es ist möglich, bei den GNO-Messungen den Gesamtfehler auf  $\sim 5\%$  zu erniedrigen. Dazu ist es notwendig, sowohl den statistischen als auch die systematischen Fehler weiter zu reduzieren. Das könnte, wie weiter unten genauer dargelegt wird, durch den Einsatz

von hochauflösenden Kryodetektoren mit supraleitenden Übergangsthermometern erreicht werden. Dann wäre der Neutrino-Einfangsquerschnitt von  $^{71}\text{Ga}$  die Größe, die die Meßgenauigkeit des  $\nu_e$ -Flusses aus dem GNO-Experiment entscheidend beschränkt. Eine Bestimmung des Einfangsquerschnitts mit einer Genauigkeit von  $\sim 5\%$  kann mit Hilfe einer starken ( $>2.5\text{MCi}$ )  $^{51}\text{Cr}$ -Neutrinoquelle erreicht werden.

Die bisherigen GNO-Daten zusammen mit zukünftigen Messungen höherer Genauigkeit ermöglichen eventuell auftretende Änderungen des Neutrinoflusses während des 11jährigen Sonnenfleckenzyklus zu erfassen. Das wäre einerseits von großer astrophysikalischer Bedeutung. Andererseits könnte daraus abgeleitet werden, in welchem Ausmaß zusätzlich zur LMA(MSW)-Lösung auch Spin-Flavor-Präzessionsbeiträge von Bedeutung sind, bzw. könnten Obergrenzen für magnetische Übergangsdipolmomente der Neutrinos angegeben werden.

Die jüngsten Resultate von SNO und KamLand werden mit BOREXINO bei niedrigen Energien unabhängig überprüft werden können. Dabei werden bei einer Energieschwelle von ca. 250 keV mittels Streuung an Elektronen die monoenergetischen solaren  $^7\text{Be}$ -Neutrinos vermessen. Mit den nach SNO und KamLAND verbliebenen Lösungen erwartet man in BOREXINO eine  $^7\text{Be}$ -Neutrinorate von  $0.6 < R/R_{sol} < 0.7$ , wobei  $R_{sol}$  die Rate (theoretische Unsicherheit  $\Delta R_{sol}/R_{sol} = 0.09$ ) ohne Oszillation bezeichnet. Es werden ca. 100 t Flüssigszintillator als Target für solare Neutrinos verwendet. Die experimentelle Unsicherheit in BOREXINO wird vom Untergrund, insbesondere von der Konzentration radioaktiver Spurenelemente im Szintillator, abhängen. Mit Werten für U und Th (Konzentrationen zwischen  $\simeq 10^{-15}$  und  $\simeq 10^{-16}$  g/g), wie sie in dem Prototypdetektor CTF gemessen wurden, erwartet man eine experimentelle Unsicherheit im gemessenen solaren  $^7\text{Be}$ -Fluß nach dreijähriger Meßzeit von ca. 15%. Berücksichtigt man noch die theoretische Unsicherheit für den  $^7\text{Be}$ -Fluß, wäre die LMA-Lösung mit einer Signifikanz von ca. 2 bis 3  $\sigma$  zu überprüfen.

Daneben aber besteht mit BOREXINO die Möglichkeit, die LMA-Lösung analog zu KamLand mit Reaktorneutrinos zu verifizieren. Dabei beträgt die mittlere Distanz zu den Leistungsreaktoren in Frankreich, Schweiz und Süddeutschland etwa 800 km. Nach einer Laufzeit von etwa drei Jahren sollte man ca. 50 anstatt 80 Ereignisse des Typs inverser Betazerfall am Wasserstoff registrieren. Da die theoretische Unsicherheit bei Reaktorneutrinos mit ca. 1.5% sehr klein ist, kann man somit nach drei Jahren Meßzeit die LMA-Lösung mit einer Sensitivität von etwa 4  $\sigma$  testen.

BOREXINO wird in der Lage sein, auch Supernova-Neutrinos flavorspezifisch zu spektroskopieren. Mittels folgender Reaktionen

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \quad (Q = 1.8 \text{ MeV}),$$

$$\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow e^+ + {}^{12}\text{B} \quad (Q = 17.3 \text{ MeV}),$$

$$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N} + e^- \quad (Q = 13.4 \text{ MeV}),$$

$$\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{C}^* + \nu_x \quad \text{mit } {}^{12}\text{C}^* \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma \quad (Q = E_\gamma = 15.1 \text{ MeV}) \text{ und}$$

$$\nu_x + p \rightarrow \nu_x + p \quad (\text{elastische Streuung})$$

ist ein eventuelles Supernovaisignal flavorspezifisch aufzuschlüsseln. Für eine Supernova des Typs II im Zentrum unserer Galaxie erwarten wir etwa 85 Ereignisse aus den ersten vier Reaktionskanälen. Bei genügend kleiner Schwelle (ca. 250 keV) ergibt die elastische Streuung an Protonen einen zusätzlichen interessanten Kanal der neutralen Stromwechselwirkung.

Mit einer MCi-Neutrinoquelle ist es möglich, sensitiv nach einem magnetischen Neutrinomoment zu suchen. Die Empfindlichkeit sollte ca.  $\mu_\nu < 1 \cdot 10^{-11} \mu_B$  erreichen. Damit verknüpft ist die Suche nach solaren  $\bar{\nu}_e$ -Signalen aus dem  $^8\text{B}$ -Zweig. Dies könnte durch magnetfeldinduzierte Spinflip-Übergänge beim Durchlaufen der solaren Konvektionszone bewirkt werden.

Weiterhin kann BOREXINO zukünftig die Messung von terrestrischen Neutrinos komplementär zu KamLAND durchführen. Dies kann besonders interessante Informationen liefern zu Geomodellen bzw. hinsichtlich der Verteilung von U und Th in der Erdkruste und

speziell im Erdmantel, der bzgl. derartiger Fragestellungen mit anderen experimentellen Methoden kaum zugänglich ist.

Unabhängig von den Neutrinospektroskopischen Messungen im Bereich der Astrophysik wird BOREXINO in der Lage sein, über Neutrinoeigenschaften im Bereich der Teilchenphysik Aussagen zu machen: zukünftige BOREXINO-Daten sind wichtig, um entscheiden zu können, ob und in welchem Ausmaß zusätzlich zur LMA(MSW)-Lösung auch Beiträge durch Spin-Flavor-Präzession von Bedeutung sind und um gegebenenfalls Obergrenzen für magnetische Übergangsdipolmomente abzuleiten.

#### *Gallium Neutrino Observatory (GNO)*

Die Gallium-Experimente GNO (Gallium Neutrino Observatory) und SAGE sind gegenwärtig die einzigen, die den niederenergetischen Anteil im solaren Neutrino-Spektrum messen können.

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 Tonnen  $\text{GaCl}_3$ , das in Wasser und Salzsäure aufgelöst ist und 30.3 Tonnen 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 ( $\text{GeH}_4$ ) in Proportionalzählrohre mit niedriger Untergrundaktivität eingebracht.

Die Kombination der Daten von GNO I (19 solar runs, Mai 1998 bis Januar 2000) und von GNO II (24 solar runs, Januar 2000 bis Januar 2002) ergibt für die beobachtete Neutrino-einfangrate:

$$R_{\nu_e}^{I+II} = (65.2 \pm 6.4(\text{stat}) \pm 3.0(\text{syst})) \text{ SNU}.$$

Werden die bisher publizierten Daten von GALLEX und GNO kombiniert (insgesamt 108 solar runs), so ergibt sich für die beobachtete Neutrinoeinfangrate:

$$R_{\nu_e} = (70.8 \pm 4.5(\text{stat}) \pm 3.8(\text{syst})) \text{ SNU}.$$

Das sind nur  $(55 \pm 6) \%$  der theoretisch nach dem SSM erwarteten Rate von  $(128 \pm 9)$  SNU. Diese Ergebnis steht 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 insbesondere durch die inzwischen nahezu abgeschlossene Kalibrierung aller Proportionalzählrohre mit aktivem ( ${}^{71}\text{Ge}$  und  ${}^{69}\text{Ge}$ ) German-Gas signifikant reduziert werden. Während eines solar runs wird die Energiegleichung mit einer Röntgenquelle, die innerhalb der Abschirmung installiert ist, durchgeführt. Beide Maßnahmen führten zu einer beträchtlichen Verbesserung der sog. energy cuts und pulse shape cuts. Weiterhin konnten Fortschritte erzielt werden durch den Einsatz schnellerer Analog- und Digital-Elektronik, einer verbesserten Behandlung der Rn-Untergrundergebnisse, sowie einer neuentwickelten Datenanalyse unter Verwendung eines neuronalen Netzwerks. Als Basis dieser nun in GNO etablierten Methode diente die bereits in der letzten Förderperiode in unserer Gruppe entwickelte Datenanalyse für miniaturisierte Proportionalzählrohre. Hauptaugenmerk dieser Methode war die Untergrundunterdrückung durch Pulsformanalyse. Der statistische Fehler bei GNO alleine entspricht gegenwärtig  $\pm 6.4$  SNU und der systematische Fehler  $\pm 3.0$  SNU.

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, ist es für die solare Neutrinospektroskopie entscheidend, den pp- $\nu$ -Fluß als auch den  ${}^7\text{Be}$ - $\nu$ -Fluß voneinander getrennt zu bestimmen. Um eine Genauigkeit von  $\sim 5 \%$  bei der GNO-Messung zu erreichen, ist es notwendig, sowohl den statistischen als auch die systematischen Fehler weiter zu reduzieren. Dazu sind zwei

wesentliche Verbesserungen besonders wichtig: der  $^{71}\text{Ge}$ -Nachweis durch Detektoren mit höherer Nachweiseffizienz und besserer Energieauflösung sowie eine genauere Bestimmung des Neutrino-Einfangquerschnitts von  $^{71}\text{Ga}$ . Zu beiden Aspekten wurden vorbereitende Arbeiten durchgeführt.

#### 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 Tonnen  $\text{GaCl}_3$ -Lösung gewinnt, nicht geändert werden darf.

Als erster Schritt wurde ein  $4\pi$ -Detektor mit hoher Nachweiswahrscheinlichkeit ( $\sim 98\%$ ) entwickelt, getestet und durch Monte-Carlo-Simulationen überprüft. Das Zeitfenster zwischen Extraktion und Messung ist aufgrund der kleinen Halbwertszeit von  $^{71}\text{Ge}$  ( $T_{1/2} = 11.43$  d) sehr kurz. Es wurde deshalb ein Detektorkonzept entwickelt, das es ermöglicht, die Herstellung bzw. den Test des Übergangsthermometers des Kryodetektors und die chemische Deposition des Ge-Trägers (inklusive des durch den Neutrino-Einfang produzierten  $^{71}\text{Ge}$ ) mit Hilfe von CVD (chemical vapour deposition) auf das Detektorsubstrat getrennt voneinander durchzuführen. Im Anschluß an die CVD wird das Übergangsthermometer mit dem Substrat durch einen speziellen Tieftemperaturkleber gekoppelt und in die  $4\pi$ -Geometrie integriert. Als Substrat wurde Saphir verwendet. Kernstück des Übergangsthermometers ist ein Ir-Au-Film, der auf ein dünnes Si-Scheibchen aufgedampft wird. Das Si-Scheibchen selbst wird dann auf das Saphir-Substrat geklebt.

Dieses Detektorkonzept hat sich sehr gut bewährt. Das Energiespektrum einer  $^{55}\text{Fe}$ -Eichquelle hat gezeigt, daß der Klebeprozess die Energieauflösung (187 eV bei 6 keV) in keiner Weise negativ beeinflusst. Weiterhin ist die Energieschwelle des Detektors mit  $\sim 100$  eV so niedrig, daß bei den Zerfallskanälen von  $^{71}\text{Ge}$  nicht nur der Elektroneneinfang aus K- und L-Schale sondern auch aus der M-Schale (Energiedeposition von 160 eV) mit eingeschlossen werden kann. Damit ist die Effizienz des Detektors alleine durch die geometrische Anordnung der beiden Absorbersubstrate begrenzt und erreicht  $\sim 98\%$ .

Zur Vorbereitung eines Prototyp-Experiments am Gran-Sasso-Untergroundlabor (3600 m Wasseräquivalent) wurde im Untergroundlabor (15 m Wasseräquivalent) des „Beschleunigerlaboratoriums / Maier-Leibnitz-Laboratoriums“ in Garching ein neuer Entmischungskryostat aufgebaut und getestet. Dieser Kryostat wurde mit einem Myon-Veto ausgestattet, das aus plattenförmigen Plastikszintillatoren und einer untergrundarmen Bleiabschirmung besteht, die den Kryostaten vollständig umgibt. In den Tieftemperatureinsatz des Kryostaten wurden neben den Sensoren für die Thermometrie insgesamt 3 Meßplätze bestehend aus jeweils einem SQUID-Kanal, einem supraleitenden Bias-Stromkreis und den elektrisch gefilterten Zuleitungen eingebaut.

Es wurden Langzeitmessungen von ca. 6 Wochen Dauer sowie mehrere Temperaturzyklen zwischen Raumtemperatur und  $\sim 20$  mK durchgeführt. Diese Messungen konnten die hervorragende Stabilität sowohl des Kryodetektors als auch des gesamten SQUID-Auslesesystems vollumfänglich bestätigen. Die nächsten Schritte werden sich auf die Aufnahme der Zerfallskurve von künstlich aktiviertem  $^{71}\text{Ge}$  und auf low-background-Untersuchungen mit dem  $4\pi$ -Detektor konzentrieren, insbesondere hinsichtlich der Verwendung von Materialien mit äußerst geringen radioaktiven Verunreinigungen.

Die Entwicklung derartiger Kryodetektoren in unserem Labor in Garching bis zur Einsatzreife in zukünftigen Großexperimenten stellt eine enorme Herausforderung dar. Andererseits ist der zu erwartende Gewinn beträchtlich: er entspricht einer Erhöhung der Masse des Gallium-Detektors um  $\sim 40\%$ .

*Vorarbeiten für eine neue  $^{51}\text{Cr}$ -Neutrinoquelle*

Die zweite Verbesserung mit dem Ziel, die Genauigkeit der GNO-Messung wesentlich zu steigern, ist die Bestimmung des Neutrino-Einfangsquerschnitts von  $^{71}\text{Ga}$  mit einer künstlich hergestellten Neutrinoquelle. Von den prinzipiell als Neutrinoemitter in Frage kommenden Isotopen hat sich  $^{51}\text{Cr}$  als das geeignetste herausgestellt. Durch den Einfang von Neutrinos einer  $^{51}\text{Cr}$ -Quelle werden die Kernniveaus von  $^{71}\text{Ge}$  bevölkert, die auch von den dominierenden Teilkomponenten des Sonnenneutrinoflusses angeregt werden. Das Vorläuferexperiment GALLEX wurde 1994/95 mit einer 1.7 MCi starken  $^{51}\text{Cr}$ -Quelle mit einer Genauigkeit von  $\sim 11\%$  getestet. Zusammen mit den durchgeführten Arsen-Tests ergibt eine Bestrahlung des Gallium-Targets mit der  $^{51}\text{Cr}$ -Quelle eine erhöhte Genauigkeit und damit eine echte Eichung. Eine Bestimmung des Einfangsquerschnitts mit einer Genauigkeit von  $\sim 5\%$  erscheint möglich bei Verwendung einer Quellstärke von mindestens 2.5 MCi. Um diese hohe Quellstärke zu erzeugen, ist ein Hochflußreaktor erforderlich, der eine Bestrahlungsposition für große Proben (10 bis 100 kg) aufweist.

*BOREXINO*

Das BOREXINO-Experiment wird in der Halle C des italienischen Gran-Sasso-Untergrundlabors (LNGS) aufgebaut. Der Nachweis der Neutrinos wird über Neutrino-Elektron-Streuung in 300 t ultrareinem Flüssigszintillator erfolgen. Das dabei emittierte Licht wird von 2200 Photovervielfachern registriert, die auf der Innenseite einer Stahlkugel (13,7 m Durchmesser) angebracht sind. Lichtkonzentratoren vor den Photovervielfachern erhöhen die Detektionseffizienz und verbessern damit die Energieauflösung. Der Szintillator befindet sich im Inneren einer dünnen, transparenten Nylonkugel (8,5 m Durchmesser, 0,1 mm Dicke) und wird zur Abschirmung gegen externe Gammastrahlung von 1000 t einer transparenten Flüssigkeit umgeben. Als zusätzliche Radon-Konvektionssperre wird ein zweiter, transparenter Nylonballon mit einem Durchmesser von 12 m zwischen dem Szintillatorbehälter und den Photomultipliern angebracht. Der ganze Aufbau befindet sich in einem äußeren Stahltank mit 17 m Durchmesser, der zur Abschirmung mit 2400 t Reinstwasser gefüllt ist. 200 weitere Photovervielfacher auf der Außenseite der Stahlkugel dienen dem Nachweis von Cherenkovlicht, das von eindringender kosmischer Strahlung, hauptsächlich Myonen, im Wasser erzeugt wird. Um die Nachweiseffizienz zu erhöhen, wird der äußere Tank mit einer reflektierenden weißen Folie (Tyvek) ausgekleidet.

*Arbeiten an der Counting Test Facility (CTF) und an BOREXINO*

Im Zentrum der Arbeiten standen Tests flüssiger Szintillatoren in der Counting Test Facility CTF im Gran Sasso Untergrundlabor, Messungen zu optischen Eigenschaften, insbesondere zur Alpha-Beta-Separation, von Pseudokumulon und PXE sowie die Charakterisierung bzgl.  $^{14}\text{C}$  und primordialer Radionuklide von Pseudokumulon. Von besonderer Bedeutung waren unsere Entwicklungen auf dem Gebiet der 'low level background'-Technologie.

*Forschung und Entwicklung 'low level background'*

Eng verbunden mit unseren Erforschungen von neuen Techniken und Methoden der Neutronenaktivierung und Gammaspektroskopie auf dem Gebiet der 'low level background'-Technologie ist die Entwicklung von SiGel-Säulen zur Szintillatortreinigung. An unserem Institut wurden Experimente zur Szintillatortreinigung mit Silicagelsäulen zunächst im kleinen Maßstab (3 g Silicagel, 40 g Szintillator) durchgeführt. Dabei wurden die Reinigungsfaktoren bzgl.  $^{210}\text{Po}$  der in der Counting Test Facility (CTF) verwendeten bzw. für BOREXINO vorgesehenen Silicagelsorten in drei Experimenten zu  $350_{-80}^{+90}$ ,  $400_{-50}^{+70}$  und  $520_{-110}^{+200}$  bestimmt. Für  $^{210}\text{Bi}$  ergaben sich die Faktoren  $24_{-9}^{+16}$ ,  $53_{-6}^{+7}$  sowie  $130_{-40}^{+90}$ . Der jeweils dritte (und höchste) angegebene Faktor wurde zusammen mit dem nun für BOREXINO vorgesehenen Silicagel erreicht. Die Ergebnisse verhalfen zur Bestimmung der Adsorptionsenthalpien im Kontext eines den Reinigungsvorgang beschreibenden Theoriemodells und gaben zudem wichtige praktische Erfahrungen im Umgang mit den verschiedenen Stoffen.



Im Jahr 1995 war in der Halle C des LNGS eine Prototypversion eines Szintillatortreinigungs-systems aufgebaut worden. Seit Ende 1999 wurde anstelle der Prototypversion ein neues, größeres System zur Handhabung und Reinigung von Flüssigszintillatoren installiert, das sog. 'Modul-0'. Das System bedient die CTF und beinhaltet Adsorptionssäulen zur Reinigung des Szintillators. Über das 'Interconnection-System' ist es möglich, Flüssigkeiten mit allen anderen Modulen des Systems auszutauschen. Der Aufbau von Modul-0, unter Berücksichtigung der Spezifikationen bzgl. radioaktiver Kontaminationen, ist abgeschlossen. Die Sicherheitsmaßnahmen, die von einem unabhängigen Experten empfohlen wurden, sind erfüllt worden. Alle bisher durchgeführten Untergrundmessungen (s. u.) wurden erfolgreich und sicher über das Modul-0 realisiert. Die beiden Adsorptionssäulen, vorgesehen für die Reinigung des gesamten BOREXINO-Szintillators (300 t), wurden fertiggestellt und jeweils mit 30 kg synthetischem, ultra-reinem Silicagel gefüllt. Der hervorragende Reinheitsgrad dieser Säulen incl. des Silicagels wurde nach dem Einbau mit Hilfe einer  $^{222}\text{Rn}$ -Emanationsmessung (ca. 5 mBq für die gesamte Säule, d.h. 0.14 mBq/kg für das Silicagel) nachgewiesen. Darüber hinaus ist eine weitere Adsorptionssäule in das System integriert, die bereits seit 1995 erfolgreich zu CTF-Testzwecken verwendet wird und wahlweise mit verschiedenen Silicagelarten und Mengen gefüllt werden kann.

Im Zeitraum von Oktober 2001 bis Juni 2002 wurden 270 t Pseudocumol bei einem italienischen Chemieunternehmen (Polimeri Europa) erworben und lagern seitdem in der sog. 'Storage Area' (4 Tanks zu je 100 m<sup>3</sup>) in der Halle C des LNGS. Im Zuge dieser Beschaffung des BOREXINO-Szintillators wurde ab November 2001 in CTF-3 ('Upgrade' mit Radonschild und Myonveto) mit neuen Versuchen zur Reinigung der Szintillatorflüssigkeit begonnen. Die an mehreren Proben gemessene  $^{14}\text{C}$ -Konzentration war im tolerierbaren Bereich. Allerdings lagen die gemessenen Werte an Uran und Thorium anfangs höher als  $10^{-15}$  und somit oberhalb der erlaubten Spezifikationsgrenze. Ein deutlich zu hoher Untergrund wurde für  $^{210}\text{Po}$  (Alphazerfall, Radontochter) und für  $^{85}\text{Kr}$  (Betazerfall, Spaltprodukt) beobachtet. Reinigung mittels Adsorptionssäulen, Wasserextraktion sowie N<sub>2</sub>-Spülung reduzierte die Werte für Uran und Thorium auf  $\sim 10^{-15}$ . Die Aktivitäten von  $^{210}\text{Po}$  und  $^{85}\text{Kr}$  wurden um mehr als eine Größenordnung reduziert. Sind diese Beobachtungen zwar auch ermutigend, so ist doch die Effizienz der Methoden noch zu steigern, da die Werte im Falle von Uran und Thorium marginal die Spezifikation erfüllen und die Aktivitäten von Po und Kr noch zu hoch sind.

Innerhalb des Jahres 2002 wurden verschiedene CTF-Tests unter Verwendung des Modul-0 durchgeführt, nämlich vier Messungen des  $^{14}\text{C}$ -Gehalts im Szintillator, zwei Silicagel-Chromatographie-Tests sowie zwei Tests einer Wasserextraktionsanlage. Dabei blieb das  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis in Anbetracht der Meßwerte  $(1.34 \pm 0.01)10^{-18}$ ,  $(2.6 \pm 0.2)10^{-18}$ ,  $(4.4 \pm 0.02)10^{-18}$ ,  $(4.4 \pm 0.4)10^{-18}$  unterhalb der geforderten Grenze. Die Silicagelchromatographie wurde auf zwei verschiedene Arten getestet. Im Rahmen eines sogenannten 'loop'-Tests, bei dem der CTF-Szintillator nur über die Chromatographiesäule mit 2.4 kg Silicagel ohne Verwendung anderer Tanks zirkuliert wird, wurde im Februar 2002 die technische Funktionsfähigkeit des Konzeptes nachgewiesen. Das Verhältnis der Menge an Silicagel zu dem Szintillator der CTF entspricht dem gleichen wie es später für BOREXINO verwirklicht werden soll. Da im loop-Modus der gereinigte Szintillator unmittelbar wieder mit dem ungereinigten vermischt wird, kann hier allerdings kein großer Reinigungsfaktor erwartet werden, sondern nur ein moderater, kontinuierlicher Rückgang der Aktivität. Die  $^{210}\text{Po}$ -Konzentration verringerte sich während der durchgeführten sechs Volumenzyklen um einen Faktor 2.5, ohne das Erreichen einer unteren Schranke anzudeuten. Dies bestätigt einerseits die aus Laborexperimenten gewonnene Theorievorhersage und ist andererseits vereinbar mit wesentlich höheren Reinigungseffizienzen, die sich mit demselben Silicagel durch Anwendung einer veränderten Prozedur ergeben sollten ('batch'-Modus, s. u.). Bzgl. U- und Th-Töchtern ließ sich jeweils ein Faktor 2 nachweisen. Die Emanation von  $^{220}\text{Rn}$  und  $^{222}\text{Rn}$  aus dem Silicagel wurde nachgewiesen und warf keine neuen Probleme auf.  $^{220}\text{Rn}$  ist aufgrund seines raschen Zerfalls in einen stabilen Pb-Kern ungefährlich, und die gemessene Obergrenze für  $^{222}\text{Rn}$ -Emanation lag mit 0.9 mBq/kg unter dem damaligen

Limit. Im Juni 2002 wurde die Silicagelsäule im sogenannten ‘batch’-Modus untersucht, wobei man den gereinigten Szintillator unter Benutzung von Zwischenlagertanks nicht mit dem ungereinigten in Berührung bringt. Der Theorie nach brächte dies einen wesentlich höheren Reinigungsfaktor, das eigentliche Ziel im Hinblick auf BOREXINO. Leider deutet das erste Testergebnis auf eine Rekontamination des Szintillators mit  $^{222}\text{Rn}$ -Töchtern durch die benutzten Tanks hin. Diese, einschließlich des Rohrsystems, wurden mittlerweile gereinigt, um den Test zu wiederholen. Solange diesbezüglich ein positives Testergebnis aussteht, kann der Aufbau der Reinigungsanlage nicht als abgeschlossen betrachtet werden. Daneben wurde von März bis Mai 2002 versucht, mittels Wasserextraktion den Szintillator in einem Loop-Test zu reinigen. Dabei wurde die für BOREXINO erstellte Anlage verwendet. Zusätzlich wurde die Flüssigkeit mit reinem  $\text{N}_2$  gespült. Die  $^{210}\text{Po}$ -Konzentration konnte um einen Faktor 6,5 verringert werden. Weitere Versuche, auch mit Wasser verschiedenen pH-Werts, konnten aber keine weitere Verbesserung erzielen. Allerdings ist zu erwähnen, daß die verbleibende Zählrate (ca. 100/d) an Alphaereignissen vergleichbar mit dem externen Untergrund der CTF wird und die systematische Unsicherheit des Meßwertes noch ermittelt werden muß. Die Konzentration von Th nahm während der Wasserextraktion etwa um einen Faktor 2 ab. Überraschenderweise erzielte man keinen deutlichen Erfolg in der Reduktion von  $^{85}\text{Kr}$  (ca. Faktor 15) mittels  $\text{N}_2$ -Spülen. Der Verdacht, daß Krypton im verwendeten (und bzgl. Radon ultrareinem)  $\text{N}_2$  präsent ist, wurde dann auch in direkten Messungen (Massenspektrometrie) bestätigt. Das kosmogene  $^{39}\text{Ar}$  wurde in diesen Messungen ebenfalls gefunden.

Ab Mitte August 2002 sollte die dritte Reinigungsmethode – Destillation des Szintillators – getestet werden. Dabei wurden irrtümlicherweise von der verantwortlichen Arbeitsgruppe (Princeton, USA) ca. 50 Liter PC in das Abwassersystem des Untergrundlabors geleitet. Davon konnten nur ca. 20 Liter aufgefangen werden. Aufgrund dieses Vorfalls wurden die dabei benutzten Anlagen (Modul-0 ist nicht betroffen) von den Genehmigungsbehörden versiegelt. Der Zeitpunkt der Wiederaufnahme der Testmessungen an der CTF ist z. Zt. (Ende Januar 2003) nicht bekannt.

Die Messung der myoninduzierten Produktion von Radioisotopen in Szintillatoren am SPS (CERN) und Bestimmung von ‘in-situ’-Untergrundraten durch kosmische Strahlung in BOREXINO und KamLAND sind von großer Wichtigkeit für die mögliche Detektion von pep- und CNO-Neutrinos in BOREXINO. Der ‘in-situ’ produzierte und daher unvermeidliche Untergrund durch  $^{11}\text{C}$  dominiert in diesem Bereich. Mit einer Lebensdauer von ca. 20 min ist ein direktes Veto nach Detektion des verursachenden Myons nicht möglich (Myonrate  $\sim 3/\text{min}$ ). Da aber mit einer  $^{11}\text{C}$ -Produktion immer eine Abspaltung eines Neutrons verbunden sein muß, kann man die verzögerte Koinzidenz zwischen Myon und Neutroneneinfang ausnutzen, wenn es gelingt, systematische Unsicherheiten der örtlichen Korrelation zwischen der Koinzidenz und dem  $^{11}\text{C}$ -Signal in den Griff zu bekommen. Da  $^{11}\text{C}$  ein Positronemitter ist und die sichtbare Energie wegen der Annihilation immer oberhalb von  $\sim 1$  MeV liegt, besteht für die  $^7\text{Be}$ -Neutrinomessung keine Gefahr.

#### *Status Äußerer Detektor*

Der äußere BOREXINO-Detektor ist ein im wesentlichen aus 208 PMTs bestehender Wasser-Cherenkov-Detektor. Um die Wasserdichtigkeit und Drucksteifigkeit der PMTs zu gewährleisten, wurden alle PMTs nach einem im Vorfeld getesteten Design eingekapselt und auf ihre Funktionalität hin überprüft. Anschließend wurden 230 eingekapselte PMTs (208 + 22 Reserve) zum Experimentstandort transportiert. In einer Dunkelkammer wurde jeder PMT so eingestellt, daß die Erfassung einzelner auf die Photokathode auftreffender Photonen gewährleistet ist. Dann wurden 62 dieser PMTs in den äußeren Detektor eingebaut, während der Einbau der restlichen PMTs nicht vor Beendigung sämtlicher Installationsarbeiten im Detektor stattfinden kann. Es wurde ein sehr leistungsfähiges Myon-Veto-System aufgebaut, das es u. a. ermöglicht, die Spur des Myons durch den Detektor darstellen. Um eine möglichst genaue Erfassung der Myon-Spur zu erreichen, wurde in Zusammenarbeit mit dem MPIK Heidelberg ein LED-Kalibrationssystem entwickelt. Dieses aus 208 LEDs

bestehende System wird auch von einem Power-PC aus über eine Kalibrations-Software gesteuert. Jede LED kann in ihrer Signalstärke, d. h. Anzahl an ausgestrahlten Photonen, eingestellt werden. Das Lichtsignal wird über 208 Glasfaserkabel an die PMTs in dem Detektor übertragen. Das bereits fertige Kalibrationssystem wird Anfang März 2003 zusammen mit dem Gesamtsystem in einem so genannten Air-Run getestet.

Auch für die CTF wurde von unserer Gruppe ein Myonveto mit 16 eingekapselten PMTs realisiert. Damit können jetzt Ereignisse, die von Myonen erzeugt wurden, im Energieintervall von 0.2 bis 0.8 MeV mit einer Effizienz von 95 % identifiziert werden. Im Energiebereich darüber beträgt die Effizienz 99 %. Dies erlaubt das Studium des 'in-situ'-Untergrundes von Neutronen, die durch Schauer kosmischer Myonen erzeugt werden. Mit Hilfe des Myonvetos konnten zusätzlich neue Grenzen für den Zerfall des Elektrons gewonnen werden.

#### *Lichtkonzentratoren*

Die Entwicklung und Realisation von Lichtkonzentratoren für die CTF und BOREXINO konnte in der letzten Förderperiode abgeschlossen werden. Die Konzentratoren basieren auf hochreinem, eloxiertem Aluminium und sind sowohl für den Einsatz in PC als auch in deionisiertem Wasser geeignet. Die Lichtsammelleffizienz beträgt ca. 89 %, der Beitrag zum Untergrund im  ${}^7\text{Be}$ -Neutrinofenster ist mit ca. 0.1/d deutlich kleiner als der unvermeidliche 'in-situ'-Untergrund von kosmogener Strahlung (ca. 0.3/d). Der Lichtverstärkungsfaktor ist 2.5 und die Kosten für einen Konzentrator betragen ca. 100 Euro. Der Einbau der Lichtkonzentratoren zusammen mit den 2200 Photomultipliern (PM) in den inneren Detektor wurde im Dezember 2001 erfolgreich abgeschlossen. In ersten Messungen des BOREXINO-Detektors ('air runs') wurde neben der Elektronik die Funktionsweise aller PMs getestet. Dabei konnten ca. 10 PMs als Quellen sehr störender Lichtpulse identifiziert werden. Dieser 'instrumentelle Untergrund' ist von SNO, welches den gleichen PM-Typ wie BOREXINO verwendet, bekannt.

## 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, W. Potzel, W. Rau, A. Rüdig, M. Stark, D. Wernicke, H. Wulandari.

#### *Einleitung*

CRESST sucht mit Tieftemperatur-Detektoren nach Teilchenkandidaten der Dunklen Materie. Beobachtungen der Dynamik von Galaxien und Galaxien-Clustern zeigen, daß neben der leuchtenden, sichtbaren Materie der größte Anteil der Materiedichte aus Dunkler Materie besteht. Messungen der Elementhäufigkeit im Universum und auch neuere Untersuchungen der Anisotropie des Mikrowellenhintergrundes zeigen, daß der dominante Teil dieser Dunklen Materie nicht-baryonisch ist und damit aus exotischen, bisher unbekanntem Teilchen besteht. Um die Strukturbildung im Universum zu verstehen, müssen diese Teilchen nicht-relativistisch und damit relativ schwer sein. Diese Teilchenkandidaten für die Dunkle Materie werden daher WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) genannt.

Erste Ergebnisse vom DAMA-Experiment, das in strahlungsarmer Umgebung die Ereignisrate in etwa 100 kg NaJ-Szintillationskristallen mißt, deuten auf eine jährliche Modulation der Rate hin, die auf die veränderliche Geschwindigkeit zurückgeführt werden könnte, mit der sich die Erde aufgrund ihrer Drehung um die Sonne durch die im Mittel ruhende WIMP-Verteilung bewegt. Allerdings ergeben sich hier seit der ersten Veröffentlichung der Daten des US-amerikanischen CDMS-Experimentes Interpretationsschwierigkeiten, da das DAMA-Ergebnis unter Standard-Annahmen über die Verteilung möglicher WIMPs in unserer Galaxie nur schwer mit der absoluten Rate vereinbar ist, die bei CDMS gemessen wurde.

Wegen ihrer zu hohen Energieschwelle sind diese, wie auch alle anderen Experimente nicht sensitiv auf leichte WIMPs im Bereich unter etwa 10 GeV. Dies gilt sowohl für die spinnabhängige wie für die spinn-unabhängige Wechselwirkung der WIMPs mit den Nukleonen. Ziel der ersten Phase von CRESST war neben dem Aufbau einer Experimentiereinrichtung im Gran Sasso-Labor die Entwicklung von Tieftemperaturkalorimetern mit sehr niedriger Energieschwelle und guter Energieauflösung, die dazu in der Lage sind, diesen niedrigen Massenbereich zwischen etwa 2 und 10 GeV abzudecken. Dies gelang in Form von 262 g schweren Saphir-Detektoren, die bei 15 mK betrieben werden. Die durch eine Teilchenwechselwirkung entstehenden Phononen werden in einem aufgedampften Wolframfilm absorbiert, der sich gerade am Übergang vom supraleitenden zum normalleitenden Zustand befindet. Die dadurch hervorgerufene Widerstandsänderung wird mit einem SQUID-Auslesekreis gemessen. Die Energieschwelle liegt im Bereich von 500 eV, die Energieauflösung beträgt etwa 130 eV bei 1.5 keV.

Ein wesentlicher Fortschritt bei der direkten Suche nach WIMPs ist nur mit Detektoren zu erwarten, die den Untergrund aktiv unterdrücken. Deshalb wurde in der zweiten Phase von CRESST, die im Jahr 2002 begann, ein neues Detektorkonzept entwickelt: Mit den sogenannten Phononen-Licht-Detektoren können Kernrückstöße von Elektronrückstößen durch die unterschiedliche Lichtausbeute in einem szintillierenden Kristall unterschieden werden. Es wurde gezeigt, daß mit  $\text{CaWO}_4$  als Target auch mit großen (300 g) Detektoren eine gute Diskriminierung erreicht werden kann. Mit dem Wolfram-Kern stellt dieses Material ein geeignetes Target für WIMPs in dem theoretisch favorisierten Massenbereich bereit.

#### *Detektorprinzip*

Das Prinzip des direkten Nachweises von WIMPs beruht auf der Detektion der durch die Streuung von WIMPs hervorgerufenen Kernrückstöße. Die Ionisationseffizienz von Kernrückstößen kann je nach Material um bis zu einer Größenordnung kleiner sein als die Ionisationseffizienz von Photonen und Elektronen. Dies bedeutet zum einen, daß beim Nachweis der Rückstoßenergie eine kalorimetrische Messung, d. h. die Messung der Gesamtenergie, gegenüber der Messung eines Ladungs- oder Lichtsignals einen Effizienzvorteil hat. Zum anderen kann durch die Kombination von kalorimetrischer und Ladungs- bzw. Licht-Messung zwischen Kernrückstößen und elektromagnetischer Strahlung unterschieden werden. Dies kann die Sensitivität des Experimentes hin zu kleineren Ereignisraten erweitern und um Größenordnungen verbessern, da der dominante Beitrag zum Untergrund erkannt werden kann. CRESST setzt zwei Detektortypen ein. Durch die Verwendung reiner Kalorimeter, bestehend aus Saphir-Kristallen als Absorber mit supraleitenden dünnen Wolfram-Filmen als Phasenübergangsthermometer auf der Kristalloberfläche, kann die Sensitivität bis zu sehr kleinen Kernrückstoßenergien und damit im Bereich von WIMPs kleiner Massen optimiert werden. Der zweite von CRESST eingesetzte Detektortyp nutzt die Möglichkeit der Untergrundunterdrückung durch die simultane Messung von Wärme und Szintillationslicht. Diese Detektoren bestehen aus  $\text{CaWO}_4$ -Kristallen als Target, mit aufgedampften Wolfram-Filmen als Thermometer und in unmittelbarer Nachbarschaft ein zweites, kleineres Kalorimeter zur Detektion des vom  $\text{CaWO}_4$  emittierten Szintillationslichtes. Elektromagnetischer Untergrund kann durch ein höheres Verhältnis zwischen Licht- und Wärmesignal von den Kernrückstößen unterschieden werden.

In seiner ersten Phase (bis März 2001) hat CRESST mit den reinen kalorimetrischen Detektoren und durch Reduktion des Untergrunds auf nur wenige Ereignisse/kg/keV/Tag erstmals neue Grenzen für leichte WIMPs bestimmen können. Von März bis Ende des Jahres 2001 mußte der gesamte Aufbau innerhalb des Gran-Sasso-Labors von Halle B nach Halle A umgezogen werden. Dies wurde durch die Vorbereitungen für die 'Long-Baseline'-Neutrinoexperimente erforderlich. Im Frühjahr 2002 wurde der Kryostat erstmals wieder in Betrieb genommen, und nach Fertigstellung aller Zusatzinstallationen kann CRESST – nun in seiner zweiten Phase – wieder Messungen im Gran Sasso-Labor durchführen.

*Die neuen Detektoren von CRESST: gleichzeitige Phononen- und Licht-Messung*

Für die zweite Phase von CRESST wurden Detektoren entwickelt, die gleichzeitig zum Phononen-Signal das von der Wechselwirkung erzeugte Szintillationslicht messen. Die Schwierigkeit der Phonon-Licht-Detektoren ist es, die Lichtsammlung so effizient und den Lichtnachweis so sensitiv zu gestalten, daß auch mit möglichst großen Target-Kristallen eine Energieschwelle im keV-Bereich erzielt wird. In den letzten beiden Jahren konnten die Phononen- und insbesondere die Lichtmessung optimiert werden. Die Licht-Wärmedetektoren wurden von Prototyp-Versionen mit nur 6 Gramm Targetmasse auf 300 Gramm Targetmasse gesteigert. Auf eine der runden Oberflächen der zylindrischen  $\text{CaWO}_4$ -Kristalle (Durchmesser und Höhe je 4 cm) wird ein Wolfram- oder Ir/Au-Phasenübergangsthermometer aufgebracht. Dieses Kalorimeter wird zusammen mit einem Lichtdetektor in ein Gehäuse, das mit hoch-reflektierender Folie ausgekleidet ist, eingebaut. Der Lichtdetektor besteht aus einem zwischen  $2\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  und  $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$  großen Substrat mit etwa 0.5 mm Dicke aus Saphir oder Silizium. Im Falle von Saphir wird zur besseren Lichtabsorption Silizium auf eine der Oberflächen aufgebracht. Die von der Lichtabsorption verursachte Temperaturerhöhung wird wiederum mit einem Wolfram- oder Ir/Au-Phasenübergangsthermometer gemessen.

Die Energie des Lichtes, welches im Lichtdetektor nachgewiesen wird, konnte durch verbesserte Verspiegelung des Detektorhalters, eine optimierte Geometrie und durch Selektion der  $\text{CaWO}_4$ -Kristalle auf 1 % der primären im Kristall absorbierten Gamma-Energie gesteigert werden. Um die Sensitivität des Lichtdetektors weiter zu erhöhen, ist eine effizientere Sammlung der Phononen aus dem Substrat des Lichtdetektors erforderlich. Da die Sammeffizienz mit der Größe des Thermometer-Films steigt, große Thermometer wegen der höheren Wärmekapazität aber eine geringere Sensitivität besitzen, wurden kleine Thermometer mit zusätzlichen Aluminium-Filmen als Phononen-Kollektoren zur Sammlung der Phononen aufgebracht. Die absolute Energieschwelle, die so erreicht werden konnte, liegt bei 20–30 eV, was (bei 1 % Lichtausbeute) bezüglich des großen Absorbers einer Schwelle von wenigen keV entspricht.

Zur Steigerung der Sensitivität der Phononen-Messung im  $\text{CaWO}_4$ -Kristall sollte die Übergangstemperatur des Wolfram-Thermometers möglichst niedrig sein. Zunächst zeigten Wolfram-Filme auf  $\text{CaWO}_4$  eine relativ hohe Übergangstemperatur von  $T_c \approx 50\text{ mK}$ , was auf chemische Reaktionen von Wolfram mit  $\text{CaWO}_4$  zurückgeführt wurde. Durch eine Diffusionsbarriere aus  $\text{SiO}_2$  zwischen Kristall und Wolfram-Film konnte die Übergangstemperatur sehr stark reduziert werden. Da damit auch die Sensitivität des Phononen-Kanals bis auf eine Schwelle von wenigen keV verbessert werden konnte, können heute komplette Phononen-Licht-Detektormodule mit 300 g Detektormasse realisiert werden, die die notwendige Schwelle von ca. 20 keV erreichen.

*Vorbereitung des Ausbaus des SQUID-Auslesesystems*

Der Aufbau von CRESST verfügt zur Zeit über nur vier SQUID-Auslesekanäle, d. h. es können zwei Detektormodule (jedes benötigt zwei SQUID-Kanäle) gleichzeitig ausgelesen werden. Um die angestrebten 10 kg Detektormasse betreiben zu können, sind beim momentanen Stand der Kalorimeter-Entwicklung mit 300 g schweren Modulen 33 Module und damit 66 Auslesekanäle erforderlich. Ein solche Zahl von SQUIDs in einen Entmischungskryostaten einzubauen und eine entsprechende Vielzahl von Zuleitungen ohne zu große thermische Last auf das Tieftemperatur-Niveau zu führen ist technisch sehr schwierig. Die SQUIDs werden im Flüssig-Helium-Bad des Kryostaten montiert. Eine Kopie des entsprechenden Flansches wurde an der University of Oxford gefertigt und in einem dortigen Entmischungskryostaten montiert. Damit konnten der Einbau, der Test der SQUIDs und die Einflüsse der SQUIDs und aller Zuleitungen auf den Betrieb des Kryostaten in Oxford getestet werden. Mittlerweile sind alle 66 SQUIDs dort montiert. Auch die Ausleseelektronik wurde schon komplett nach Oxford geliefert. Sobald der Einbau am Gran Sasso erfolgen kann, wird der jetzige Flansch im CRESST-Kryostaten durch den Flansch mit den SQUIDs aus Oxford ersetzt. Dieser Umbau wird voraussichtlich Ende 2003 nach den ersten erfolgreichen Messungen mit  $\text{CaWO}_4$ -Detektoren am Gran Sasso stattfinden.

*Aufbau eines Streuexperiments zur Kalibrierung von Kernrückstößen*

Die Höhe des Lichtsignals ist für Kernrückstöße kleiner als für elektromagnetische Strahlung der gleichen Energie. Dieses sogenannte 'Quenching' ist die Grundlage der Untergrundunterdrückung. Der Licht-Quenchingfaktor in  $\text{CaWO}_4$  ist für Rückstöße an Wolfram möglicherweise größer als für Rückstöße an Sauerstoff oder Kalzium. Für die Suche nach WIMPs ist insbesondere der Wolfram-Rückstoß relevant, weshalb der entsprechende Licht-Quenchingfaktor bestimmt werden muß.

Auch für das Phononen-Signal kann es einen Quenchingfaktor verschieden von Eins geben. Da das von der Wechselwirkung erzeugte Licht für die Phononen-Messung verloren geht, könnte man erwarten, daß für eine elektromagnetische Wechselwirkung das Phononen-Signal kleiner ist als für einen Kernrückstoß, bei dem ja nicht so viel Licht erzeugt wird. Dann wäre in den gemessenen Spektren die Energieskala für elektromagnetische Strahlung und für Kernrückstöße unterschiedlich.

Um beide Quenchingfaktoren für die verschiedenen in der Suche nach WIMPs verwendeten Detektoren zu bestimmen, bauen die CRESST- und EDELWEISS-Kollaborationen ein Experiment zur Neutronenstreuung am Beschleuniger des Münchner Maier-Leibnitz-Labors auf. Die Grundidee dabei ist, in dem zu kalibrierenden Tieftemperatur-Detektor einen monoenergetischen Rückstoß bekannter Energie zu erzeugen. Dazu werden an dem Detektor Neutronen bekannter Energie unter vorgegebenem Winkel elastisch gestreut, womit kinematisch die Rückstoßenergie festgelegt ist. Der Neutronenstrahl wird gepulst, damit die Energie der Neutronen durch ihre Flugzeit bestimmt werden kann. Der Streuwinkel wird durch Neutronendetektoren bestimmt, die in den verschiedenen Richtungen zum Streuzentrum aufgebaut werden. Als Neutronendetektoren werden 50 Flüssigszintillator-Zellen verwendet, die durch Pulsformanalyse auch zwischen Gammas und Neutronen unterscheiden können.

Die Neutronen werden durch die Reaktion  $p(^{11}\text{B},n)^{11}\text{C}$  erzeugt. Dazu wird ein  $^{11}\text{B}$ -Strahl auf eine Gaszelle mit Wasserstoff gelenkt. Mit dieser Reaktion können Neutronen mit Energien bis zu 11 MeV erzeugt werden, genug um auch an die schweren W-Kernen eine meßbare Rückstoßenergie zu übertragen.

Der Aufbau der Neutronen-Erzeugung und Neutronen-Messung ist fertig installiert, und es wurde schon eine Reihe von Testmessungen durchgeführt, um die Funktionsweise aller Komponenten und die aufwendige Datenaufnahme zu testen. Die Datenaufnahme muß die Anforderungen einer hohen Pulsfrequenz des Beschleunigers ( $\sim 2$  MHz) und der langsamen Signale des Tieftemperatur-Detektors ( $\sim$ ms) miteinander vereinen. Mit diesem Aufbau sollen danach die Quenchingfaktoren der Saphir-,  $\text{CaWO}_4$ - und der von EDELWEISS verwendeten Ge-Detektoren bestimmt werden. Dazu ist der nächste Schritt die Installation eines Kryostaten zum Betrieb der Tieftemperatur-Detektoren im Strahlengang der Neutronen, nachdem die bisherigen Tests mit  $\text{CaWO}_4$ -Detektoren bei Raumtemperatur durchgeführt worden sind.

*Analyse des niederenergetischen Neutronenuntergrundes und Notwendigkeit einer weiteren Abschirmung*

Ist der elektromagnetische Untergrund durch Abschirmung, durch Sauberkeit und durch die Fähigkeit der Detektoren zu diskriminieren sehr stark reduziert worden, so werden Kernrückstöße, die durch Neutronen erzeugt werden, die Sensitivität der Experimente in den Untergrundlabors begrenzen. Da durch Neutronen induzierte Kernrückstöße nicht von durch WIMP-Streuung erzeugten Kernrückstößen unterschieden werden können, verbleiben sie als Untergrund für das Experiment. Schon im Bereich der heutigen Sensitivitäten von einigen  $10^{-6}$  pb für den Wirkungsquerschnitt für Streuungen zwischen WIMP und Proton, hat man mit Neutronenuntergrund zu rechnen. Da aber insbesondere für zukünftige Projekte, mit bis zu 1000 kg Detektormaterial und angestrebten Sensitivitäten bis in den Bereich von  $10^{-9}$  pb, der Neutronenuntergrund dominierend sein wird, haben die CRESST- und EDELWEISS-Kollaborationen im Jahr 2000 eine gemeinsame Arbeitsgruppe zum Thema Neutronenuntergrund gebildet. Neben der Entwicklung von Simulations-Software zur

quantitativen Abschätzung der Bedeutung der verschiedenen Neutronenquellen, werden in dieser Arbeitsgruppe auch Strategien zur Abschirmung des Neutronenuntergrundes entwickelt. Die hier vorgestellten Ergebnisse stellen den momentanen Status der Arbeit dieser Gruppe dar.

Im Gestein und im Beton an den Wänden der unterirdischen Experimentierhallen werden durch spontane Spaltung der Uran-Verunreinigungen und  $(\alpha, n)$ -Reaktionen Neutronen erzeugt. Die Energie dieser Neutronen beträgt bis zu etwa 9 MeV. In der Gamma-Abschirmung aus Blei werden durch radioaktive Verunreinigung ebenfalls Spalt- und  $(\alpha, n)$ -Neutronen erzeugt. Diese Quellen fassen wir unter dem Begriff 'niederenergetische Neutronen' zusammen.

Bei den sehr geringen Zählraten, um die es in diesen Experimenten geht, muß auch die Auswirkung der wenigen Myonen, die bis in die Untergrundlabors kommen, berücksichtigt werden. Die mittlere Energie der Myonen ist nach mehr als einem Kilometer Gestein sehr hoch und beträgt für das Gran Sasso-Labor 290 GeV. Durch tief-inelastische Streuung an Kernen erzeugen diese Myonen sehr hochenergetische Neutronen bis zu Energien von einigen 100 MeV oder sogar GeV. Da die Produktionsrate mit der Masse der Targetkerne ansteigt, sind für die Experimente insbesondere in der Bleiabschirmung erzeugte Neutronen von Bedeutung. Für sehr niedrige Zählraten spielen aber auch außerhalb des Experiments, im umgebenden Gestein durch Myonen erzeugte Neutronen eine Rolle. Alle von Myonen erzeugte Neutronen bezeichnen wir als 'hochenergetische Neutronen'.

Die Rate an Kernrückstößen, die in einem bestimmten Energieintervall in den Tieftemperatur-Detektoren durch Neutronen erzeugt wird, kann durch Monte-Carlo-Simulationen bestimmt werden, sofern die Ausgangsspektren der Neutronen in den jeweiligen Labors bekannt sind. Leider gibt es nur wenige Messungen des Neutronen-Spektrums im Gran Sasso-Labor. Auch ist die Bestimmung der Neutronenenergien recht aufwendig und basiert ebenfalls auf Monte-Carlo-Simulationen der in Szintillationszählern gemessenen Rückstöße. Oberhalb von 1 MeV beträgt demnach der Fluß etwa  $0.5 \cdot 10^{-6}$  Neutronen/cm<sup>2</sup>/sek, die Spektren sind aber je nach Messung unterschiedlich. Um ein Verständnis für die Neutronenspektren und die möglichen Variationsbreiten zu gewinnen, haben wir mit eigenen Simulationen und Berechnungen das Ausgangsspektrum abgeschätzt, basierend auf Daten der Gesteinszusammensetzung am Gran Sasso, sowie auf chemischen Analysen des verwendeten Betons am Institut für Baustoffkunde der TU München. Dazu wurden anhand der Uran- und Thoriumverunreinigungen die Raten von spontanen Spaltungen und, zusammen mit der Häufigkeit der relevanten Isotope (z. B. Mg, Ca), die Rate von  $(\alpha, n)$ -Reaktionen berechnet. Die dadurch erzeugten Neutronen wurden anschließend mit Monte-Carlo-Simulationen von ihrem Entstehungsort durch das Gestein und den Beton verfolgt, um so das Spektrum der Neutronen zu bestimmen, wie es in den Labors vorliegt.

CRESST verfügt zur Zeit nur über eine Gamma-Abschirmung (15 cm Kupfer und 20 cm Blei), jedoch keinerlei Moderator-Schirm. Ein Neutronenfluß, wie er aus den obengenannten Rechnungen hervorgeht, würde beispielsweise pro Jahr in 1 kg Detektormaterial im für die WIMP-Suche relevanten Energiebereich etwa 50 Rückstoßereignisse erzeugen. Diese Zählrate entspricht dem Sensitivitätsbereich der zur Zeit fortschrittlichsten Experimente zur direkten Suche nach WIMPs von einigen  $10^{-6}$  pb. Wahrscheinlich würde sie schon die Überprüfung der DAMA-Evidenz beeinflussen: von WIMPs in dem dort favorisierten Parameterbereich erwartet man im gleichen Zeit- und Energieintervall ca. 45 Ereignisse. CRESST will mit der nächsten Phase also in einen Sensitivitätsbereich vordringen, der bei dem aktuellen Aufbau durch den Neutronen-Untergrund dominiert ist; daher ist ein Moderator-Schild unabdingbar. Da die Energie der Neutronen sehr effektiv durch Stöße an Wasserstoff reduziert werden kann, eignen sich als Moderator besonders wasserstoffreiche Materialien wie Kohlenwasserstoffe, also Polyethylene oder Mineralöl, oder auch Wasser.

Auch der Einfluß der hochenergetischen Neutronen muß untersucht werden. Wir arbeiten zur Zeit an der Entwicklung bzw. Adaption von Software-Paketen, um diese Art der Neutronenproduktion zu simulieren und die erzeugten Rückstoßraten zu bestimmen. Da-

zu liegen noch keine Ergebnisse vor. Auf der Grundlage älterer Abschätzungen für das Spektrum und den Fluß der Neutronen, die im Gestein erzeugt werden, haben wir jedoch festgestellt, daß insbesondere die Neutronen aus der Abschirmung relevant werden können: in 1 kg  $\text{CaWO}_4$ -Detektoren werden dadurch im relevanten Energiebereich pro Jahr einige meßbare Rückstoßereignisse erzeugt. Damit wäre die Sensitivität auf etwa  $10^{-7}$  pb begrenzt (etwa eine Größenordnung besser als die heutigen Limits) und würde die Ziele der zweiten Phase von CRESSST von einigen  $10^{-8}$  pb gefährden.

Für die hochenergetischen Neutronen ist ein Moderator wenig effektiv; andererseits wird wie oben erwähnt, der wesentliche Teil in der Bleiabschirmung, also innerhalb des Moderators, erzeugt. Ein Myon-Veto ist also ein geeignetes Instrument zur Unterdrückung dieses Untergrundes und ermöglicht es, das Potential der angestrebten 10 kg  $\text{CaWO}_4$  voll auszuschöpfen. Zunächst war eine Flüssigszintillator-Abschirmung geplant, welche die Funktionen des Neutronen-Moderators (gegen niederenergetische Neutronen) und des Myon-Vetos (gegen hochenergetische Neutronen) kombinieren sollte. Während der Begutachtung dieser Pläne stellte sich jedoch heraus, daß nach einem Unfall mit Flüssigszintillator eine Genehmigung für diese Abschirmung am Gran Sasso-Labor auf absehbare Zeit nicht zu erwarten ist. Um keine Zeit zu verlieren, hat die CRESSST-Kollaboration beschlossen, ein konventionelles Design für die Abschirmung ('passives' Polyethylen als Neutronen-Moderator und Plastikszintillatorplatten als Myon-Veto) zu verwenden. Damit sind die Funktionen von Moderator und Myon-Veto wieder getrennt, weshalb auch die Beschaffung getrennt durchgeführt werden kann. Ende des Jahres 2002 wurde genügend Polyethylen gekauft und soll als Moderator noch im Jahre 2003 am Gran Sasso aufgebaut werden.

Im regelmäßigen Rhythmus finden Treffen der CRESSST-Kollaboration mit der französischen EDELWEISS-Kollaboration statt. Vorrangiges Ziel ist die Vorbereitung eines eventuellen gemeinsamen größeren europäischen Experiments zur direkten Suche nach Dunkler Materie mit Tieftemperatur-Detektoren als Nachfolger der beiden derzeitigen Experimente.

#### *Hochauflösende Röntgen-Detektoren mit supraleitenden Tunneldioden*

An unserem Institut werden supraleitende Aluminium-Tunneldioden (Al-STD) als Detektoren für die hochauflösende Röntgen-Spektroskopie entwickelt. Al-STD bestehen aus zwei supraleitenden Al-Schichten, die durch eine dünne dielektrische Tunnelbarriere getrennt sind. 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.

Im Einsatz als direkte Photonendetektoren (ohne zusätzlichen Absorber) erreichen Al-STD eine sehr gute Energieauflösung von 12 eV bei einer Röntgenenergie von 5.9 keV; kommerziell erhältliche, halbleiterbasierte Detektoren erreichen typischerweise Auflösungen nicht unter 100 eV in diesem Energiebereich. Al-STD bringen allerdings mehrere praktische Nachteile mit sich, die vorrangig auf die niedrige Absorptionseffizienz der Al-Elektroden bei Röntgenenergien oberhalb von 1 keV zurückzuführen sind. Die geringe Absorptionseffizienz führt in Verbindung mit der detektorspezifisch geringen Elektrodendicke (in der Größenordnung von  $\frac{1}{10}$   $\mu\text{m}$ ) zu einer Nachweiseffizienz für einzelne Photonen im niedrigen Prozentbereich. Da beide Elektroden zur Signalbildung beitragen können, hat die fast gleichmäßige Bestrahlung beider Elektroden die Ausbildung einer Dublettstruktur im Pulshöhenspektrum des Detektors zur Folge, was die praktische Einsetzbarkeit des Detektors stark einschränkt.

Diese Nachteile konnten jedoch durch einen elektrisch isoliert auf die Tunneldiode aufgetragenen Absorber in Form eines Bleifilms größtenteils ausgeglichen werden. Der Bleifilm hat eine Dicke von etwa 1.3  $\mu\text{m}$  und ist von der Tunneldiode durch eine auf dem Al natürlich gewachsene  $\text{Al}_x\text{O}_y$ -Schicht isoliert. Die Absorptionseffizienz beträgt etwa 50 % bei Röntgenenergien um 6 keV und ist größer als 99.9 % unterhalb von 1 keV. Die elektrische Isolation verhindert eine Beeinflussung der Gap-Struktur des supraleitenden Al durch das



supraleitende Pb, die zu einer Reduktion des Signalstroms führen könnte. Der Energietransport aus dem Absorber in die Al-STD findet ausschließlich durch Phononen statt, die bei der Rekombination der Quasiteilchen im Pb zu Cooperpaaren emittiert werden. Wegen des fehlenden elektrischen Kontakts zur STD stellt sich im Absorber vor dieser Rekombination eine Homogenisierung der Quasiteilchendichte ein, was eine Verringerung des Einflusses von Ortsabhängigkeiten in der Al-STD auf die Energieauflösung mit sich bringt. Durch die Aufbringung des Detektors auf eine 300 nm dicke  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Membran konnte eine Verringerung der Signalhöhe aufgrund von Phononenverlusten in das Substrat vermieden werden.

Die Lebensdauer der Quasiteilchen im Pb-Absorber vor der Rekombination und der Phononenemission führt zu einer gewissen Verzögerung des Energietransports in die STD und somit zu einer Verlängerung der Pulsanstiegszeit. Das hat jedoch den entscheidenden Vorteil, daß durch Analyse der Pulsanstiegszeiten dieses Detektorsystems die Signale, die auf Röntgenabsorption im Pb-Absorber zurückzuführen sind, von Untergrundsignalen, welche durch direkte Absorption in den Al-Elektroden und der Membran generiert werden, unterschieden werden können. Dies erlaubt eine Säuberung des Spektrums von Untergrundeignissen und Detektorartefakten. Durch Auslesen eines Bleiabsorbers mit einer auf einer Membran aufgetragenen Al-STD konnte wiederum eine gute Energieauflösung von 10.8 eV (FWHM) bei einer Röntgenenergie von 5.9 keV erreicht werden.

Als Nachteil dieses Detektorkonzepts hat sich die Oxidation des Bleiabsorbers an Luft herausgestellt. Diese bei Luftkontakt innerhalb weniger Stunden auftretende Degenerierung kann durch eine  $\text{SiO}_2$ -Schutzschicht auf dem Absorber vermieden oder zumindest auf einer Zeitskala von einigen Jahren verzögert werden. Allerdings hat die Schutzschicht eine leichte Verschlechterung der Energieauflösung auf etwa 20 eV (FWHM) bei 5.9 keV zur Folge. Eine Optimierung dieser Detektorkomponente ist für die Zukunft vorgesehen. Frühere Theorien, die eine Whiskerbildung im Pb während des Abkühlungsprozesses als Ursache der Absorberdegenerierung angenommen hatten, konnten durch experimentelle Untersuchungen verworfen werden.

Um die Linearität zwischen deponierter Röntgenenergie und resultierender Signalhöhe zu untersuchen, wurden in Kollaboration mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (Berlin) Messungen zur Charakterisierung unseres Detektorsystems am Elektronenspeicherring BESSY II durchgeführt. Die Meßergebnisse deuten auf eine leichte quadratische Abweichung von der Linearität im Prozentbereich hin, welche durch Verluste von Quasiteilchen-Rekombinationsphononen erklärt werden kann. Die quantitative Analyse dieser Ergebnisse ist noch nicht abgeschlossen.

Zudem wurde Ende des vergangenen Jahres ein Al-STD-basiertes Detektorsystem in ein kryogenes Spektrometer integriert, welches bei der Fa. Infineon AG zur Fehleranalyse von Si-Wafern an einem Elektronenmikroskop eingesetzt wird. Dieser erste Test verlief sehr zufriedenstellend und öffnet den Weg zu einem industriellen Einsatz dieses Detektorsystems.

## 5 Diplomarbeiten, Dissertationen

### 5.1 Diplomarbeiten

Hollerith, Christian: Energiedispersive Röntgenspektrometrie mit Tieftemperatur-Detektoren an Elektronenmikroskopen

Waller, Stefan: Monte-Carlo-Simulation der Energiedeposition hochenergetischer Neutronen in  $\text{CaWO}_4$

## 6 Kooperationen

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

- Alimonti, G. for the BOREXINO Collaboration: Measurements of extremely low radioactivity levels in BOREXINO. *Astropart. Phys.* **18** (2002), 1
- Alimonti, G. for the BOREXINO Collaboration: Science and Technology of BOREXINO: a real-time Detector for Low Energy Solar Neutrinos. *Astropart. Phys.* **16** (2002), 205
- Alimonti, G. for the BOREXINO Collaboration: Search for electron decay mode  $e \rightarrow \gamma\nu$  with prototype of BOREXINO detector. *Phys. Lett.* **B525** (2002), 29
- Angloher, G. et al.: Limits on WIMP Dark Matter using Sapphire Cryogenic Detectors. *Astropart. Phys.* **18** (2002), 43
- Angloher, G. et al.: Energy Resolution  $\Delta E=12$  eV at 5.9 keV for Lead Absorber Coupled to a Single Al-STJ via Phonons. In: Porter, F.S., McCammon, D., Galeazzi, M., Stahle, C.K. (eds.): *Low Temperature Detectors, LTD9*. *Am. Inst. Phys. Conf. Proc.* **605** (2002), 23
- Bilenky, S.M. et al.: Implications of the SNO and the Homestake results for the BOREXINO experiment. *Phys. Lett.* **B533** (2002), 191
- Frank, T. et al.: Development of 300 g scintillating Calorimeters. In: Porter, F.S., McCammon, D., Galeazzi, M., Stahle, C.K. (eds.): *Low Temperature Detectors, LTD9*. *Am. Inst. Phys. Conf. Proc.* **605** (2002), 353
- Jochum, J. et al.: Neutron Scattering Facility for the Calibration of the Response to Nuclear Recoils. In: Porter, F.S., McCammon, D., Galeazzi, M., Stahle, C.K. (eds.): *Low Temperature Detectors, LTD9*. *Am. Inst. Phys. Conf. Proc.* **605** (2002), 525
- Kirsten, T. et al. for the GNO Collaboration: Progress in GNO. *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **118** (2003), 33
- Lachenmaier, T. et al.: In: Porter, F.S., McCammon, D., Galeazzi, M., Stahle, C.K. (eds.): *Low Temperature Detectors, LTD9*. *Am. Inst. Phys. Conf. Proc.* **605** (2002), 465
- Lanfranchi, J.-C. et al.: Development of Highly Efficient Cryogenic Detectors for GNO. *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **118** (2003), 446
- Oberauer, L. et al.: Light Concentrators for the Solar Neutrino Experiment BOREXINO. To be published in *Nucl. Inst. Meth. A* (2003)
- Stark, M. et al.: Scintillation Light and Phonon Measurement Based on Ir/Au-Thermometers. In: Porter, F.S., McCammon, D., Galeazzi, M., Stahle, C.K. (eds.): *Low Temperature Detectors, LTD9*. *Am. Inst. Phys. Conf. Proc.* **605** (2002), 493
- Wulandari, H. et al.: Neutron Background for the CRESST Experiment. To be published in *Proc. IDM 2002, 4<sup>th</sup> Conf. Identification of Dark Matter*. York, UK, 2.-6. Sep. 2002

Franz von Feilitzsch