

## München (Garching)

Lehrstuhl für Experimentalphysik und Astro-Teilchenphysik  
am Physik-Department E 15  
der Technischen Universität

James-Franck-Straße, 85748 Garching  
Tel.: (089) 289-12511, Fax: (089) 289-12680  
E-Mail: [franz.vfeilitzsch@ph.tum.de](mailto:franz.vfeilitzsch@ph.tum.de)  
Internet: <http://www.e15.physik.tu-muenchen.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 Bestimmung des niederenergetischen Anteils des solaren Neutrinoflusses ist von entscheidender Bedeutung für die Festlegung der Parameter der Neutrinooszillationen, insbesondere nachdem auch durch die Publikation der SNO-Ergebnisse für den hochenergetischen  $^8\text{B}$ -Neutrinofluß die Existenz von Neutrinooszillationen als vorrangige Erklärung des in den verschiedenen Sonnen-Neutrino-Experimenten gemessenen Neutrinoflußdefizits angesehen wird.

Das Experiment CRESST wurde in Halle A des Gran-Sasso-Untergrundlabors neu aufgebaut. Es wurden neue Detektoren auf der Basis von  $\text{CaWO}_4$ -Einkristallen entwickelt, die eine gleichzeitige Messung von induzierten Phononen und Lichtemission ermöglichen und dadurch die Trennung von Kernrückstoß-Ereignissen und ionisierender Untergrundstrahlung wesentlich verbessern. Ziel dieses Experiments wird es sein, einen signifikanten Teil des von Theorien der Supersymmetrie vorhergesagten Parameterbereichs für Kandidaten der Dunklen Materie zu erfassen.

## 1 Personal und Ausstattung

### 1.1 Personalstand

#### *Lehrstuhlinhaber:*

Prof. Dr. Franz von Feilitzsch

#### *Professoren und Privatdozenten:*

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

#### *Wissenschaftliche Mitarbeiter:*

Dr. Marianne Göger-Neff [-12509], Dr. Tanja Hagner [-12525], Dr. Gunther Korschinek [-14257], Dr. Walter Potzel [-12508], Dr. Johann Schnagl [-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:*

Alexander Rüdig [-12525], Stefan Waller [-12516], Christian Hollerith [-12525], Tim Rom [-12525].

#### *Sekretariat:*

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

#### *Technisches Personal:*

Harald Hess [-12494]

#### *Werkstatt:*

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

### 1.2 Personelle Veränderungen

#### *Ausgeschieden:*

Dr. Tanja Hagner (31.03.01), Dr. Johann Schnagl (30.06.01).

## 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 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 in 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 in einem EU-Cryo-Netzwerk; Mitglied des Rates Deutscher Sternwarten; Mitglied des Gutachterausschusses Helmholtz-Preis; Mitglied der ApPEC, Frankreich.

## 4 Wissenschaftliche Arbeiten

### 4.1 Spektroskopie solarer Neutrinos – GNO, BOREXINO

Teilprojektleiter: F. v. Feilitzsch.

Gruppenmitglieder: M. Göger-Neff, C. Grieb, T. Hagner, G. Korschinek, T. Lachenmaier, J. Lanfranchi, C. Lendvai, L. Niedermeier, W. Potzel, A. Wingler.

#### *Einleitung*

Das bisher beobachtete Defizit an solaren Neutrinos ist sehr wahrscheinlich eine Konsequenz von Neutrinomassen und Flavormischung. Dabei werden die im Innern der Sonne erzeugten Elektroneneutrinos  $\nu_e$  auf dem Weg zur Erde entweder resonant noch in der Sonne in Neutrinos eines anderen Flavours konvertiert oder sie oszillieren periodisch im Vakuum zwischen verschiedenen Flavourzuständen. Durch die bisher publizierten Daten verschiedener Experimente wird eine Form der materieinduzierten Oszillationen, die sog. Large Mixing Angle Solution (LMA), bevorzugt. Allerdings ist eine genaue Bestimmung der Oszillationsparameter (Mischungswinkel und Massendifferenzen) bisher nicht möglich. Man erwartet, daß die genaue Bestimmung des niederenergetischen Neutrinoflusses im GNO-Experiment und insbesondere die Messung der von BOREXINO zum ersten Mal in Echtzeit beobachtbaren  ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos einen wesentlichen Beitrag zur Bestimmung dieser Parameter leisten werden.

#### *Kryodetektoren für das solare Neutrino-Experiment GNO*

Im Gallium-Neutrino-Experiment GNO (Gallium Neutrino Observatory, vormals GALLEX), das in den Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Italien) aufgebaut ist, werden solare Neutrinos über die Reaktion  ${}^{71}\text{Ga}(\nu, e){}^{71}\text{Ge}$  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.

Werden die bisher publizierten Daten von GALLEX und GNO kombiniert, so ergibt sich für den beobachteten Neutrinofluß:  $\Phi_{\nu_e} = (73.9 \pm 4.7(\text{stat}) \pm 4.0(\text{syst})) \text{ SNU}$ . Der statistische Fehler bei GNO alleine entspricht gegenwärtig  $\pm 7.2 \text{ SNU}$  und der systematische Fehler  $\pm 3.2 \text{ SNU}$ .

Um bei der Messung des Zerfalls von  $^{71}\text{Ge}$  in  $^{71}\text{Ga}$  sowohl die statistischen als auch die systematischen Fehler des Experiments 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 muß.

Als erster Schritt wurde ein  $4\pi$ -Detektor mit hoher Nachweiswahrscheinlichkeit ( $\sim 98\%$ ) entwickelt und getestet. Das Zeitfenster zwischen Extraktion und Messung ist aufgrund der kleinen Halbwertszeit von  $^{71}\text{Ge}$  ( $T_{1/2} = 11.43 \text{ d}$ ) sehr kurz. Es wurde deshalb ein Detektor-konzept entwickelt, das es ermöglicht, die Herstellung bzw. den Test des Übergangsthermometers des Kryodetektors und die chemische Deposition des  $^{71}\text{Ge}$  durch CVD (chemical vapour deposition) auf das Detektorsubstrat getrennt voneinander durchzuführen. Anschließend an die CVD wird das Übergangsthermometer mit dem Substrat durch einen speziellen Tieftemperaturkleber gekoppelt und in die  $4\pi$ -Geometrie integriert. Dieses Konzept hat sich sehr gut bewährt. Das Energiespektrum einer  $^{55}\text{Fe}$ -Eichquelle zeigt, daß der Klebeprozess die Energieauflösung (187 eV bei 6 keV) in keiner Weise negativ beeinflusst. Weiterhin ist die Energieschwelle des Detektors mit  $\sim 100 \text{ eV}$  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 (Energie deposition von 160 eV) mit eingeschlossen werden kann.

Zur Vorbereitung eines Prototyp-Experiments am Gran-Sasso-Untergundlabor (3600 m Wasseräquivalent) wurde im Untergundlabor (15 m Wasseräquivalent) des „Beschleunigerlaboratoriums / Maier-Leibnitz-Laboratoriums“ in Garching ein neuer Entmischungskryostat aufgebaut und getestet. Dieser Kryostat ist mit einem Myon-Veto ausgestattet, das aus plattenförmigen Plastiksintillatoren und einer untergrundarmen Bleiabschirmung besteht.

Es wurden erste Langzeitmessungen von ca. 6 Wochen Dauer sowie mehrere Temperaturzyklen zwischen Raumtemperatur und  $\sim 20 \text{ mK}$  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 Optimierung von Materialien bzgl. äußerst geringer radioaktiver Verunreinigungen.

### *Borexino*

Das BOREXINO-Experiment wird derzeit in der Halle C des italienischen Gran-Sasso-Untergundlabors (LNGS) aufgebaut. Der Nachweis der Neutrinos erfolgt über Neutrino-Elektron-Streuung in 300 t ultrareinem Flüssigszintillator. 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 Nachweeffizienz zu erhöhen, wird der äußere Tank mit einer reflektierenden weißen Folie (Tyvek) ausgekleidet.

#### *Arbeiten an der CTF und Borexino*

Die Installation des äußeren Wassertanks und der Stahlkugel sind abgeschlossen. Im Inneren der Stahlkugel wird mit Hilfe von Luftfiltern ein Reinraum der Klasse 100 betrieben. Alle Kabel sind von den PMTs bis zur Elektronik verlegt. Die PMTs, die aus speziell radioaktivitätsarmem Glas gefertigt wurden, sind mit den Spannungsteilern zusammen eingekapselt und mit Mu-Metall-Abschirmung und Konzentratoren verschraubt worden. 1800 PMTs sind im Lauf des letzten Jahres in der Stahlkugel montiert worden, die restlichen 400 können erst nach der Installation des Szintillatorbehälters montiert werden.

Die Auswahl eines geeigneten Nylonfilms hat zu einer Verzögerung bei der Herstellung des Szintillatorbehälters und der Radon-Konvektionssperre für Borexino geführt. Das Material muß mechanischen, optischen und chemischen Anforderungen genügen und darüber hinaus eine geringe Konzentration an radioaktiven Verunreinigungen enthalten. Insbesondere die Radonemanation aus der nur 0.125 mm dicken Nylonfolie stellte bei den meisten getesteten Materialien ein Problem dar. Die beiden Nylonballons wurden komplett im Reinraum gefertigt und sollen im Mai 2002 in den Borexino-Detektor eingebaut werden.

Die Elektronik für den Borexino-Detektor ist bereits komplett vor Ort installiert. Im Lauf des letzten Jahres wurden die Datenausleseprogramme geschrieben und verschiedene Tests des gesamten Systems erfolgreich durchgeführt.

Das äußere Myonveto wird unter der Verantwortung der Münchener Gruppe aufgebaut: Die Verkapselung der im Reinstwasser betriebenen Photomultiplier wurde in München geplant und durchgeführt. Alle verkapselten Multiplier wurden unter Wasser bei 2 bar auf ihre Funktionsfähigkeit getestet. Die Kabel für die Spannungsversorgung und Signalübertragung sowie Glasfasern zur Zeit-Eichung der Photomultiplier mittels einer steuerbaren LED wurden verlegt. Die Haltevorrichtungen für die Photomultiplier sowie die Befestigung der Tyvek-Folie wurden ebenfalls in diesem Jahr installiert. Die endgültige Installation der Photomultiplier und der Tyvek-Folie ist erst nach Abschluß der Arbeiten im Inneren der Stahlkugel möglich und ist für Sommer 2002 geplant.

Die Lieferung des Flüssigszintillators für BOREXINO begann im Oktober 2001. Jede Lieferung wird in der CTF auf ihre Reinheit getestet. Erste Messungen im November und Dezember 2001 zeigten einen hinreichend niedrigen  $^{14}\text{C}$ -Gehalt des Szintillators. Auch die verschiedenen Szintillator-Reinigungssysteme, die für Borexino aufgebaut wurden (Säulenreinigung, Destillation, Wasserextraktion), werden zunächst in CTF-Messungen auf ihre Effizienz geprüft. Mit diesen Tests soll auch ein eventuell möglicher Eintrag von radioaktiven Verunreinigungen (z. B. durch Lecks) ausgeschlossen werden.

## 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, A. Rüdiger, J. Schnagl, M. Stark, 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. Das Ziel von CRESST ist es, WIMPs direkt, d. h. durch elastische Streuung an Targetkernen nachzuweisen. Die dabei zu erwartenden Zählraten sind mit weniger als 0.1 Ereignissen/kg/keV/Tag sehr niedrig, was extrem hohe Anforderungen an die Abschirmung des Experimentes gegen externe Radioaktivität und die Auswahl der verwendeten Materialien stellt.

#### *Detektorentwicklung*

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.

Im vergangenen Jahr 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. Die Licht-Wärme-Detektoren wurden von Prototyp-Versionen mit nur 6 Gramm Targetmasse auf 300 Gramm Targetmasse gesteigert. Außerdem war das letzte Jahr durch den Umzug des gesamten Aufbaus innerhalb des Gran-Sasso-Labors gekennzeichnet. Dies wurde durch die Vorbereitungen für die 'Long-Baseline'-Neutrinoexperimente erforderlich. CRESST konnte daher seit März 2001 im Gran-Sasso-Labor keine Daten mehr nehmen.

#### *Die neuen Detektoren von CRESST: Licht-Phonon-Messung und Eichung*

Der Umzug wurde im April 2001 begonnen und durch die Fertigstellung des neuen Aufbaus – nun in Halle A des Gran-Sasso-Labors – im Dezember 2001 beendet. Während dieser Zeit wurden in München gemeinsam vom MPI für Physik und der TU München die Licht-Wärme-Detektoren optimiert. Die Schwierigkeit dieser 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. Die effektive Lichtsammlung wird nun durch eine hoch reflektierende mehrlagige Polymer-Folie um den Halter erreicht. Dadurch und durch weitere Verbesserungen der Lichtsammlung können heute 1.4 % der in einem 300 Gramm schweren  $\text{CaWO}_4$ -Kristall absorbierten Primärenergie, z. B. durch eine Gamma-Absorption, im separaten Lichtdetektor in Form von Licht nachgewiesen werden. Das ist sogar mehr als zuvor im ersten prinzipiellen Test der Methode mit einem Kristall von nur 6 Gramm, wo etwa 0.8 % der Energie in Form von Licht nachgewiesen werden konnten.

Die Sensitivität der Lichtdetektoren, d. h. deren Energieschwelle ist ein weiterer entscheidender Parameter. Durch eine verbesserte Geometrie und eine optimierte thermische Kopplung der Thermometer an das Kältebad können mit Lichtdetektoren von einigen  $\text{cm}^2$  Fläche mittlerweile Energieschwellen im Bereich zwischen 20 eV und 50 eV erreicht werden. Zusammen mit der gesteigerten Lichtsammlung sollte es daher möglich sein, in großen 300 Gramm schweren Kristallen eine Energieschwelle in der Lichtmessung von 5 keV Primärenergie zu realisieren, was für die direkte Suche nach Dunkler Materie ausreichend ist. Bisher konnten die Detektoren am Gran Sasso nicht getestet werden. Sobald der neue Aufbau in Betrieb geht, sollten sehr bald erste Ergebnisse zur Verfügung stehen.

Zur Eichung der Detektoren, insbesondere der Energieskala für Kernrückstöße wird am gemeinsamen Beschleuniger-Labor der LMU und TU in Garching ein Streuexperiment vorbereitet. Die Idee besteht darin, Neutronen bekannter Energie am Tieftemperatur-Detektor zu streuen und durch die Messung des Streuwinkels die deponierte Kernrückstoßenergie zu bestimmen. Mit einem gepulsten Neutronenstrahl kann durch die Time-of-Flight-Methode die Neutronenenergie gemessen werden. In Zusammenarbeit mit Kollegen des französischen Experiments EDELWEISS – ebenfalls ausgelegt für die direkte Suche nach Dunkler Materie mit Tieftemperatur-Kalorimetern – wurde eine Quelle monoenergetischer Neutronen mit 11 MeV Energie aufgebaut sowie ein Array von Neutronendetektoren zur Winkel- und Time-of-Flight-Messung installiert und getestet. Im Laufe des nächsten Jahres wird der Kryostat zum Betrieb der Detektoren installiert. Anschließend werden erste Messungen durchgeführt.

#### *Erweiterung der CRESST-Experimentiereinrichtungen*

Um mit CRESST die angestrebten 10 kg Detektormasse betreiben zu können, muß die Zahl der SQUID-Auslesekanäle von derzeit 4 auf 66 gesteigert werden. Die Finanzierung, Vorbereitung und letztendlich die Installation der SQUIDs wird von den Kollaborationspartnern der University of Oxford durchgeführt. Nach Fertigstellung aller Vorbereitungen zur Installation, kann der Einbau am Gran-Sasso-Labor ab Herbst diesen Jahres stattfinden.

Durch die gesteigerte Sensitivität im Bezug auf kleinere Ereignisraten und damit kleinere WIMP-Wirkungsquerschnitte wird in naher Zukunft der Untergrund an Neutronen eine große Rolle spielen. Entsprechende Analysen, Monte Carlo- und Design-Studien für die Abschirmungen werden seit letztem Jahr von der Gruppe der TU München gemeinsam mit den französischen Kollegen durchgeführt. Es wird eine Abschirmung gegen Neutronen erforderlich sein. Die Neutronen werden durch Spaltung und ( $\alpha$ -n)-Reaktionen im Gestein, welches das Labor umgibt, erzeugt. Die Abschirmung kann durch die Moderation der Neutronen herab zu niedrigen Energien erreicht werden. Ist die Energie niedrig genug, können keine Rückstoßenergien im relevanten Bereich mehr erzeugt werden und die Neutronen tragen nicht mehr zum Untergrund bei. Es ist geplant, den jetzigen Aufbau von CRESST in den nächsten Monaten mit 50 cm Polyethylen zu umgeben.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß CRESST mit den rein thermischen Detektoren die Erreichbarkeit des erforderlichen Untergrundlevels gezeigt hat. Ferner ist der Status der Entwicklungen der Wärme-Licht-Detektoren sehr zufriedenstellend und es kann erwartet werden, daß damit in nächster Zukunft erste Ergebnisse erzielt werden können. Der Umzug des Aufbaus am Gran-Sasso-Labor ist abgeschlossen und neue Messungen können beginnen. Die Vorbereitungen zur Steigerung auf 66 SQUID-Kanäle, der Voraussetzung 10 kg Targetmasse zu betreiben sind nahezu abgeschlossen und die erforderlichen Neutronenabschirmungen werden vorbereitet und im Laufe des nächsten Jahres installiert. In naher Zukunft wird CRESST versuchen, mit einigen wenigen Detektoren die DAMA Evidenz zu testen und ab Mitte nächsten Jahres beginnen, sukzessive Detektor-Module zu installieren, um letztendlich auf die angestrebten 10 kg Targetmasse zu kommen.

Darüberhinaus gibt es regelmäßige Treffen der CRESST-Kollaboration mit der französischen EDELWEISS-Kollaboration zur 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 Tunneln*

Supraleitende Aluminium-Tunneln (Al-STD) wurden als hochauflösende Detektoren für die 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.

Mit Hilfe einer Al-STD wurde bei einer Röntgenenergie von 5.9 keV eine Energieauflösung von 12 eV (FWHM) gemessen. Das ist die beste jemals mit einer Tunneln bei dieser Röntgenenergie erreichte Auflösung, was vor allem auf die Einführung einer metallischen Pufferschicht unterhalb der Tunneln zurückzuführen ist. Die Pufferschicht ist von der Tunneln durch eine dünne Polymerschicht mit geringem Röntgenabsorptionskoeffizienten elektrisch isoliert. Die bei Röntgenabsorption in der Pufferschicht und im Substrat erzeugten Phononen thermalisieren sehr schnell in der Pufferschicht. Dadurch wird die Energie der emittierten Phononen, die die Tunneln erreichen, auf Werte unterhalb von  $2\Delta_{Al}$  konvertiert, wobei  $\Delta_{Al}$  für die Energielücke von Al steht. Folglich wird die Anzahl der Phononen, die Cooper-Paare in den supraleitenden Al-Elektroden der Tunneln aufbrechen können, drastisch reduziert, was zu einer wesentlichen Verringerung des Untergrunds im Meßsignal führt.

Die Linearität der Al-STD wurde im Energiebereich zwischen 1.74 keV und 6.49 keV überprüft, wobei nur kleine Linearitätsabweichungen beobachtet wurden. Die daraus abgeleiteten Rekombinationsraten reichen jedoch bei weitem nicht aus, um die Abweichung der Energieauflösung vom theoretischen Limit zu erklären. Durch Pulsformanalyse konnte unterschieden werden, ob die Energiedeposition in der oberen oder unteren Elektrode der Tunneln erfolgte oder auf beide Elektroden aufgeteilt wurde. Aus der Verteilung solcher Ereignisse mit aufgeteilter Energiedeposition konnte die Reichweite niederenergetischer Photoelektronen ermittelt werden.

Nachteile bei der Verwendung von Al-STD als Röntgendetektoren sind die niedrige Absorptionseffizienz der Al-Elektroden bei Röntgenenergien oberhalb von 1 keV, die Nichtlinearität zwischen Energiedeposition und Pulshöhe des Signals und die Tatsache, daß Absorption in den verschiedenen Elektroden zu Signalen unterschiedlicher Höhe führt. Diese Nachteile konnten jedoch durch einen elektrisch isoliert auf die Tunneln 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 Tunneln 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. Dadurch können durch Analyse der Pulsanstiegszeiten dieses Detektorsystems die Signale, die auf Röntgenabsorption im Pb-Absorber zurückzuführen sind, von Untergrundsignalen unterschieden werden, welche durch direkte Absorption in den Al-Elektroden und der Membran generiert werden. Dies erlaubt eine Säuberung des Spektrums von Untergründereignissen und Detektorartefakten.

Durch Auslesen eines Bleiabsorbers mit einer auf einer Membran aufgetragenen Al-STD konnte wiederum eine hohe Energieauflösung von 10.8 eV (FWHM) bei einer Röntgenenergie von 5.9 keV erreicht werden. Ein wesentlicher Nachteil dieses Detektorkonzepts besteht in der Degenerierung des Bleiabsorbers, wahrscheinlich durch Whiskerbildung während des thermischen Zyklierens. Diese Degenerierung konnte durch die Deposition einer SiO<sub>2</sub>-Schicht auf dem Absorber vermieden werden, was jedoch zu einer etwas verschlechterten Energieauflösung von etwa 20 eV (FWHM) bei 5.9 keV führt. Zudem ist die Linearität des Detektorsystems noch nicht ausreichend untersucht. Zur Klärung dieser Fragestellung ist eine Detektorkalibrierung am Synchrotron BESSY II vorgesehen.

## 5 Diplomarbeiten, Dissertationen

### 5.1 Diplomarbeiten

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

Lendvai, Christian: Photomultiplier-Einkapselung für das Myon-Veto des BOREXINO-Experiments und Messung myoninduzierter Neutronen in der CTF II

Rüdiger, Alexander: Analyse des elektronischen Rauschens von supraleitenden Tunneldioden

Rom, Tim: Magnetisches Förderband für kohärenten Atomtransport über makroskopische Distanzen

Stark, Michael: Licht- und Phononnachweis in Tieftemperaturdetektoren zur Suche nach Dunkler Materie

### 5.2 Dissertationen

Göger-Neff, Marianne: Development of a Liquid Scintillator and of Data Analysis Methods for BOREXINO

## 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. et al., Borexino-Collaboration: Science and Technology of Borexino: a real time detector for low energy solar neutrinos. *Astroparticle Phys.* **16** (2001), 205

Altmann, M. et al., CRESST-Collaboration: Results and Plans of the CRESST Dark Matter Search. In: Proc. X International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies, Conference on Calorimetry in High Energies. Rome, Italy, July 23–28, 2001

- Angloher, G., P. Hettl, M. Huber, J. Jochum, F. von Feilitzsch, R.L. Mößbauer: Energy Resolution of 12 eV at 5.9 keV from Aluminum Superconducting Tunnel Junction Detectors. *J. Appl. Phys.* **89** (2) (2001), 1425
- Angloher, G., M. Huber, J. Jochum, F. von Feilitzsch, R.L. Mößbauer, G. Safran: Effects of Quasiparticle Recombination and Photoelectron Escape in Aluminum Tunnel Junction Detectors. *J. Low Temp. Phys.* **123** (3/4) (2001), 165
- Angloher, G., M. Bruckmayer, C. Bucci, M. Bühler, S. Cooper, C. Cozzini, P. DiStefano, F. von Feilitzsch, T. Frank, D. Hauff, Th. Jagemann, J. Jochum, V. Jörgens, R. Keeling, H. Kraus, M. Loid, J. Marchese, O. Meier, U. Nagel, F. Pröbst, Y. Ramachers, A. Rulofs, J. Schnagl, W. Seidel, I. Sergeev, M. Sisti, M. Stark, S. Uchaikin, L. Stodolsky, H. Wulandari, L. Zerle: Limits on WIMP Dark Matter using Sapphire Cryogenic Detectors. *Astroparticle Phys.*, accepted
- Angloher, G., M. Huber, J. Jochum, A. Rüdig, F. von Feilitzsch, R.L. Mößbauer: Energy Resolution  $\Delta E = 12$  eV at  $E = 5.9$  keV for a Lead Absorber coupled to a single Al-STJ via Phonons only. In: *Low Temperature Detectors, LTD9. Proc. Conf., Univ. Wisconsin, Madison, USA, July 23–27, 2001*
- Arpesella, C. et al., Borexino-Collaboration: Measurement of extremely low radioactivity levels in Borexino. *Astroparticle Phys.*, subm. (hep-ex/0109031)
- Bilenky, S.M., T. Lachenmaier, W. Potzel, F. von Feilitzsch: Implications of the SNO and the Homestake results for the Borexino experiment. *Phys. Lett. B*, accepted (hep-ph/0109200)
- Bucci, C. et al., CRESST-Collaboration: Update of the Proposal to the LNGS for a second Phase of the CRESST Dark Matter Search. MPI-PHE-2001-02, Feb. 2001
- Cozzini, C. et al., CRESST-Collaboration: Results and Plans of CRESST Dark Matter Search. In: *Low Temperature Detectors, LTD9. Proc. Conf., Univ. Wisconsin, Madison, USA, July 23–27, 2001*
- Göger-Neff, M. et al., Borexino-Collaboration: Low background scintillator tests in the CTF for Borexino. In: *Proc. XIth International School Particles and Cosmology. Baksan Valley, Russia, April 18–24, 2001*
- Göger-Neff, M. et al., Borexino-Collaboration: Status des solaren Neutrinoexperimente Borexino. *Verhandl. DPG Teilchenphysik, Bonn, 26.–29. März 2001*
- Höhne, J., U. Hess, M. Bühler, F. v. Feilitzsch, J. Jochum, R. v. Hentig, T. Hertrich, C. Hollerith, M. Huber, J. Nicolosi, K. Phelan, D. Redfern, B. Simmnacher, R. Weiland, D. Wernicke: Cryogenic Detector Systems for Material Analysis. In: *Low Temperature Detectors, LTD9. Proc. Conf., Univ. Wisconsin, Madison, USA, July 23–27, 2001*
- Huber, M., G. Angloher, F. von Feilitzsch, T. Jagemann, J. Jochum, T. Lachenmaier, J.-C. Lanfranchi, W. Potzel, A. Rüdig, J. Schnagl, M. Stark, H. Wulandari: Linearity Investigations and Pulse Shape Analysis of high Resolution STJ X-Ray Detectors. In: *Low Temperature Detectors, LTD9. Proc. Conf., Univ. Wisconsin, Madison, USA, July 23–27, 2001*
- Jochum, J., B. Chambon, D. Drain, F. von Feilitzsch, J. Gascon, M. Huber, T. Jagemann, M. DeJesus, T. Lachenmaier, J.-C. Lanfranchi, O. Martineau, W. Potzel, A. Rüdig, J. Schnagl, E. Simon, M. Stark, M. Stern, H. Wulandari: Neutron Scattering Facility for the Calibration of the Response to Nuclear Recoils. In: *Low Temperature Detectors, LTD9. Proc. Conf., Univ. Wisconsin, Madison, USA, July 23–27, 2001*
- Lachenmaier, T., F. von Feilitzsch, J.C. Lanfranchi, W. Potzel: Development of cryogenic detectors for the solar neutrino experiment GNO. In: *Proc. XIth International School Particles and Cosmology. Baksan Valley, Russia, April 18–24, 2001*

- Lanfranchi, J.C., F. von Feilitzsch, M. Huber, T. Jagemann, J. Jochum, T. Lachenmaier, W. Potzel, A. Rüdig, J. Schnagl, M. Stark, H. Wulundari: Development of cryogenic detectors for GNO. In: Low Temperature Detectors, LTD9. Proc. Conf., Univ. Wisconsin, Madison, USA, July 23–27, 2001
- Lanfranchi, J.C., T. Lachenmaier, F. von Feilitzsch: Entwicklung von Kryodetektoren für GNO. Verhandl. DPG Festkörperphysik, Hamburg, 26.–30. März 2001
- Lisitskii, M., E. Esposito, L. Frunzio, D. Perez de Lara, C. Nappi, R. Christiano, L. Li, D.E. Prober, G. Angloher, M. Huber, M. Salvato, G. Carbone: Aluminum Superconducting Tunnel Junctions as X-ray Detector: Technological Aspects and Phonon Decoupling from the Substrate. In: Low Temperature Detectors, LTD9. Proc. Conf., Univ. Wisconsin, Madison, USA, July 23–27, 2001
- Pröbst, F. et al., CRESST-Collaboration: Results and Plans of the CRESST Dark Matter Search. In: Proc. Conf. Topics of Astro-Particle and Underground Physics, TAUP 01. Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italy, Sep. 8–12, 2001
- Shutt, T. et al., Borexino-Collaboration: Status of the Borexino experiment. In: Proc. Conf. Topics of Astro-Particle and Underground Physics, TAUP 01. Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italy, Sep. 8–12, 2001
- Stark, M., F. von Feilitzsch, M. Huber, T. Jagemann, J. Jochum, T. Lachenmaier, J.-C. Lanfranchi, W. Potzel, A. Rüdig, J. Schnagl, H. Wulandari: Scintillation Light and Phonon Measurement based on Ir/Au-Thermometers. In: Low Temperature Detectors, LTD9. Proc. Conf., Univ. Wisconsin, Madison, USA, July 23–27, 2001

Franz von Feilitzsch

