

München (Garching)

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

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

0 Allgemeines

In dem hier vorgelegten ersten Bericht werden vor allem die Arbeiten und die Entwicklung des SFB 375: ASTRO-TEILCHENPHYSIK dargestellt, soweit sie den Lehrstuhl betreffen. Der SFB wird in wesentlichem Maße vom Lehrstuhl getragen, der Lehrstuhlinhaber ist Initiator und Sprecher des SFB.

Der Sonderforschungsbereich wurde im Januar 1995 eingerichtet. Mit Ablauf des Jahres 2000 wurde die 2. Förderperiode abgeschlossen.

Innerhalb des SFB 375 sind Arbeiten zur Astro-Teilchenphysik mit Schwerpunkten zur Suche nach der Natur der Dunklen Materie im Universum und deren Einfluß auf die Entwicklung des Universums sowie auf die Astrophysik innerhalb der am SFB beteiligten Institute koordiniert. Darüberhinaus besteht zwischen den im SFB beteiligten Instituten und den vielfältigen weiteren Einrichtungen im Münchener Raum, die sich mit Themen der Astrophysik sowie der Kern- und Teilchenphysik befassen, ein reger wissenschaftlicher und persönlicher Austausch.

Der SFB stellt inzwischen innerhalb des ausgezeichneten Umfeldes in München und Garching zu diesen Arbeitsgebieten eine Institution dar, die diesen Austausch entscheidend begünstigt und damit sowohl für die wissenschaftliche Arbeit als auch für die Lehre an beiden Münchener Hochschulen besonders fruchtbar ist.

Ein C4- und ein C3-Ordinariat für Theoretische Arbeiten im Bereich der Elementarteilchenphysik und der Kosmologie konnten neu besetzt und damit neue leistungsfähige Arbeitsgruppen eingerichtet werden.

Die internationale Anerkennung der innerhalb des SFB organisierten Arbeiten bestätigt sich auch darin, daß die INTERNATIONAL NEUTRINO COMMISSION aus einer Vielzahl von Bewerbungen um die Durchführung der „20th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics“ im Jahr 2002 München als Austragungsort ausgewählt hat.

Im Teilbereich A sind die experimentellen Arbeiten zur Untersuchung der Schwachen Wechselwirkung, der Spektroskopie solarer Neutrinos sowie der Suche nach dem direkten Nachweis Dunkler Materie zusammengefaßt. Innerhalb des Teilbereiches B erfolgen die theore-

tischen Arbeiten zur Elementarteilchenphysik sowie zur Kosmologie. Weitere theoretische Arbeiten zur Strukturbildung und Kosmologie sowie astrophysikalische Beobachtungen werden im Teilbereich C durchgeführt.

Die Projekte 1 und 3 des Teilbereichs A werden federführend vom Lehrstuhl bearbeitet.

Im Teilbereich A 1 wird die Spektroskopie solarer Neutrinos mit den Experimenten BOR-EXINO und GNO (Nachfolge von GALLEX) durchgeführt. Damit wird ein entscheidender Beitrag zur Bestimmung des niederenergetischen Anteils des solaren Neutrinoflusses geleistet werden. Dies ist Voraussetzung zur Festlegung der Neutrinooszillationsparameter, nachdem insbesondere mit den Galliumexperimenten GALLEX und SAGE die Existenz von Neutrinooszillationen als einzige Erklärung der Daten, gemessen in den verschiedenen Solaren Neutrino Experimenten, angesehen wird.

Die Suche nach Dunkler Materie mit dem Experiment CRESST im Teilprojekt A 3 basiert auf Tieftemperatur-Kalorimetern mit und ohne gleichzeitiger Messung von Szintillationslicht. In einer ersten Phase wurde ein großvolumiger Entmischungskryostat am Gran Sasso-Labor unter sehr radioaktivitätsarmen Bedingungen aufgebaut und in Betrieb genommen. Erste Messungen mit 260 g Saphir-Kristallen ergaben einen radioaktiven Untergrund, der etwa den Erwartungen für diesen Aufbau entsprach.

Eine neue Entwicklung von Detektoren, mit denen eine gleichzeitige Messung von induzierten Phononen und Lichtemission möglich ist, erlaubt eine effiziente Trennung von ionisierender Strahlung und Kernrückstoß-Ereignissen. Erste Experimente mit CaWO_4 -Kristallen ergaben hierzu sehr vielversprechende Ergebnisse. Es ist geplant, nach einer weiteren Testphase, mit der bereits wichtige neue Parameter-Bereiche im Massenbereich von 30–150 GeV getestet werden sollen, ein Experiment mit 10 kg CaWO_4 -Kristallen mit gleichzeitiger Messung des Szintillationslichts durchzuführen. Mit diesem Experiment wird es möglich sein, einen signifikanten Bereich der von Theorien der Supersymmetrie vorhergesagten 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], PD Dr. Lothar Oberauer.

Wissenschaftliche Mitarbeiter:

Dr. Caren Hagner, Dr. Tanja Hagner, Dr. Walter Potzel [-12508], Dr. Gunther Korschinek [-14257].

Doktoranden:

Dipl.-Phys. Marianne Göger-Neff [-12509], Dipl.-Phys. Christian Grieb [-12328/-12835], 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/-12835], Dipl.-Phys. Ludwig Niedermeier [12328/-12835], Dipl.-Phys. Johann Schnagl [-12525], Dipl.-Phys. Michael Stark [-12516], Dipl.-Phys. Alexander Winger [12328], Dipl.-Phys. Hesti Wulandari [-14416].

Diplomanden:

Alexander Rüdiger [-12525]

Sekretariat:

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

Technisches Personal:

Harald Hess [-12521]

Werkstatt

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

1.2 Personelle Veränderungen

Ausgeschieden:

Dr. Caren Hagner (31. 12. 00), PD Dr. Lothar Oberauer (31. 10. 00).

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, innerhalb dessen auf gegenseitige Zusammenhänge verwiesen wird und eine weitgehend vollständige Darstellung dieses neuen interdisziplinären Forschungsgebietes gewährleistet ist.

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 v. Feilitzsch:

Initiator und Sprecher des SFB 375 – Astro-Teilchenphysik, an dem zwei Max-Planck-Institute sowie die Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) beteiligt sind; Mitglied des Executive Committee des internationalen BOREXINO-Experiments am Gran Sasso-Untergundlabor in Italien; Leiter des TU-Forschungskollegiums des gemeinsam mit der LMU betriebenen Beschleunigerlabors (Maier-Leibnitz-Labor); Mitglied 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 – BOREXINO, GNO

Teilprojekt A 1

Teilprojektleiter: F. v. Feilitzsch, Stellvertreter: L. Oberauer.

Gruppenmitglieder: M. Göger-Neff, C. Grieb, C. Hagner, T. Hagner, R. v. Hentig, G. Korschinek, T. Lachenmaier, J. Lanfranchi, L. Niedermeier, W. Potzel, H. Seidl.

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 Elektronneutrinos ν_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. Allerdings ist eine genaue Bestimmung der Oszillationsparameter (Mischungswinkel und Massendifferenzen) bisher nicht möglich. Man erwartet, daß gerade die von BOREXINO zum ersten Mal in Echtzeit messbaren ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos eine wesentliche Rolle beim Verständnis dieses Problems spielen.

Die Kombination der Ergebnisse der bisherigen Experimente, die Neutrinos entweder über inversen β -Zerfall oder über Neutrino-Elektron-Streuung nachweisen, führt zu vier verschiedenen möglichen Lösungen mit unterschiedlichen Massendifferenzen und Mischungswinkeln:

- *Vakuumoszillationen* mit $\Delta m^2 \approx 10^{-10} \text{ eV}^2$ und $\sin^2(2\Theta) \approx 0.8$,
- *Materieinduzierte Oszillationen* mit $\Delta m^2 \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ eV}^2$ und $\sin^2(2\Theta) \approx 7 \cdot 10^{-3}$ (*Small Mixing Angle Solution, SMA*),
- *Materieinduzierte Oszillationen* mit $\Delta m^2 \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$ und $\sin^2(2\Theta) \approx 0.8$ (*Large Mixing Angle Solution, LMA*),
- *Materieinduzierte Oszillationen* mit einem Regenerationseffekt in der Erde mit $\Delta m^2 \approx 10^{-7} \text{ eV}^2$ und $\sin^2 \Theta \approx 0.9$ (*LOW*).

Betrachtet man das berechnete Spektrum der Neutrinos unmittelbar nach der Emission im Zentrum der Sonne und die energieabhängige Unterdrückung für den Fall materieinduzierter Oszillationen, so zeigt sich, daß die monoenergetische ${}^7\text{Be}$ -Linie im Falle der „Small Mixing Angle Solution“ fast vollständig unterdrückt ist, während sie im Fall der „Large Mixing Angle Solution“ nur etwa um die Hälfte unterdrückt wird. In Tab. 1 sind die in BOREXINO erwarteten Zählraten für die verschiedenen materieinduzierten Oszillations-szenarien zusammengestellt.

Im Falle von Vakuumoszillationen erwartet man bei BOREXINO eine starke saisonale Änderung des gemessenen Neutrinoflusses. Diese Variationen sind eine Konsequenz der Exzentrizität des Orbits der Erde um die Sonne und hängen sehr stark von dem genauen Wert der Neutrinomassen ab. Sie sind eindeutig von der trivialen Winter-Sommer Differenz, die etwa 7% beträgt, zu unterscheiden.

Neben der solaren Neutrinospektroskopie seien die wichtigsten weiteren wissenschaftlichen Vorhaben von BOREXINO genannt:

- Suche nach einem magnetischen Moment des Neutrinos mit einer künstlichen Neutrinoquelle.
- Messung der globalen Radioaktivität der Erde über terrestrische $\bar{\nu}_e$ -Messung.

Recoil Energy Window (MeV)	Neutrino Source	SSM (d^{-1})	LMA (d^{-1})	SMA (d^{-1})	LOW (d^{-1})
0.25–0.80	p-p	0.22	0.15	0.08	0.13
	^7Be	43.3	24.4	9.20	22.8
	p-e-p	2.0	0.95	0.39	1.03
	^{13}N	4.0	2.27	0.87	2.13
	^{15}O	5.5	2.86	1.12	2.86
	^{17}F	0.07	0.03	0.01	0.03
	^8B	0.08	0.03	0.04	0.04
		55.2	30.7	11.7	29.0
0.80–1.50	p-e-p	1.43	0.68	0.28	0.73
	^{13}N	0.13	0.07	0.03	0.07
	^{15}O	1.80	0.86	0.35	0.92
	^{17}F	0.02	0.01	0.00	0.01
	^8B	0.10	0.04	0.05	0.05
		3.48	1.66	0.71	1.78
1.50–5.50	^8B	0.454	0.174	0.217	0.232

Tabelle 1: In BOREXINO erwartete Ereignisraten der verschiedenen solaren Neutrinozweige für verschiedene Oszillationsszenarien: das Standardsonnenmodell (SSM), Large Mixing Angle Solution (LMA), Small Mixing Angle Solution (SMA), und die LOW-Lösung (Tag-Nacht-Effekt). Im Falle von Vakuumoszillationen schwankt die Messrate im Jahresverlauf sehr stark (vgl. Text) und ist daher in dieser Tabelle nicht angegeben.

- ‘Long-distance’ Reaktorneutrinospektroskopie als Test für Neutrinooszillationen mit großem Mischungswinkel.
- Suche nach solaren Elektron-Antineutrinos.
- Nachweis von Supernovaneutrinos und -antineutrinos aller Flavours über Neutrino-Elektron-Streuung und Anregung von ^{12}C .

Das BOREXINO-Experiment wird in der Halle C des italienischen Gran-Sasso-Untergrundlabors (LNGS) aufgebaut. Der Nachweis der Neutrinos erfolgt über Neutrino-Elektron-Streuung in 300 t ultrareinem Szintillator. 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 Detektoreffizienz und damit die Energieauflösung. Der Szintillator befindet sich im Inneren einer dünnen Nylonkugel (8,5 m Durchmesser, 0,1 mm Dicke) und wird zur Abschirmung gegen externe Gammastrahlung von einer transparenten Flüssigkeit umgeben. 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 im Einzelnen

Die Arbeiten zum Teilprojekt A1 während der letzten Förderperiode umfassen Arbeiten zum Wiederaufbau des CTF-Detektors, Vorbereitungs- und Aufbauarbeiten für den BOREXINO-Detektor, insbesondere das Liquid-Handling-System, die Lichtkonzentratoren und den äußeren Myonen-Detektor betreffend, sowie die Weiterentwicklung und Durchführung von Reinheits-Untersuchungen verschiedener Detektorkomponenten mittels Neutronen-Aktivierungs-Analyse und Gamma-Spektroskopie. Die Szintillatorreinigung mit Me-

thoden der Säulenchromatographie wurde sehr erfolgreich im Zusammenhang mit der Neutronenaktivierung getestet. Außerdem wurden Programme zur Simulation von Szintillationsereignissen und Myonen sowie zur Ortsrekonstruktion und zur Teilchenidentifikation entwickelt und an den CTF-Daten getestet.

Arbeiten an der CTF und BOREXINO

Zum Test der Reinigungsmethode mit einer Silika-Gel-Säule wurde von der Münchener Gruppe zusammen mit Dr. F. Hartmann (INFN Milano) 1996 am Gran Sasso eine neue Liquid-Handling-Anlage für die CTF gebaut, mit der der Szintillator Phenyl-o-Xylylethan (PXE) über eine Säule gereinigt und in die CTF gefüllt werden konnte.

Im Laufe der Jahre 1997 und 1998 wurden mehrere Reinigungsschritte mit der Silika-Gel-Säule an jeweils 5 t Szintillator durchgeführt und die abnehmende Konzentration von Verunreinigungen im Szintillator mit Neutronen-Aktivierungs-Analyse gemessen. Insgesamt wurde bei den metallischen Verunreinigungen im Szintillator ein Reinigungsfaktor von mehreren Größenordnungen erzielt. Die Messung einer Konzentration von $< 10^{-17}$ g/g ^{238}U im Szintillator bedeutete auch einen Durchbruch der in München entwickelten Ultra-Spuren-Analyse (vgl. übernächster Abschnitt). Die Ergebnisse sind in den Tabellen 2 und 3 zusammengestellt.

Im August 1997 wurde wegen zahlreicher Ausfälle von Photovervielfachern der CTF-Detektor geleert und die Photovervielfacher wurden ausgebaut. Im Laufe des Jahres 1998 wurden von der Mailänder und der Münchener Gruppe verbesserte Photovervielfacher-Verkapselungs-Designs entwickelt, die 1999 in die CTF eingebaut wurden. Um den durch Radon, das aus der Tankwand und den Photovervielfachern emaniert, verursachten Untergrund zu minimieren, wurde eine zusätzliche Nylonhülle als Radonbarriere zwischen Inner Vessel und Photovervielfachern eingebaut. Die Installation der Radon-Barriere in der CTF ist zugleich ein Test des für BOREXINO geplanten Designs. 16 zusätzliche am Boden eingebaute Photovervielfacher dienen zur Myonenidentifikation und stellen gleichzeitig einen Test des in München für den äußeren Detektor entwickelten Designs dar.

Das Münchener Liquid-Handling-System für BOREXINO und die CTF wurden 1999 überholt und erweitert. Dabei wurde großer Wert auf höchstmögliche Sauberkeit gelegt. Die verwendeten Materialien und Techniken entsprechen dem Standard der Halbleiterindustrie. Soweit möglich, wurden sämtliche Schweißarbeiten im Reinraum ausgeführt. Das Liquid-Handling-System befindet sich in einem eigenen Gebäude (BBE), um es vor Verschmutzung zu bewahren.

Der externe Wassertank für BOREXINO ist Ende 1998 fertiggestellt worden. 1999 ist im Inneren des Tanks die Stahlkugel errichtet worden, die als Halterung für die Photovervielfacher dient und zugleich den inneren Teil des Detektors von dem äußeren Myonveto trennt. An den Tank angrenzend wurde ein Gebäude errichtet, das die Elektronik des Detektors und einen Reinraum für die Vorbereitung der weiteren Einbauarbeiten (Photovervielfacher, Kabel, Nylonbehälter) aufnehmen soll. Zur Zwischenlagerung und Reinigung des Szintillators, bevor der BOREXINO-Detektor gefüllt wird, wurden vier Lagertanks mit jeweils 100 t Fassungsvermögen aufgestellt.

Lichtkonzentratoren für Borexino

Das Design der Lichtkonzentratoren, die die Lichtsammeleffizienz der Photovervielfacher erhöhen sollen, wurde in München entwickelt. Hauptaugenmerk wurde dabei auf geringe Gamma-Aktivität (insbesondere Thorium) und auf Korrosionsbeständigkeit gegenüber den im Buffer verwendeten Flüssigkeiten gerichtet. Es werden hochglanzeloxierte Aluminiumspiegel verwendet, die computergesteuert gedrückt und dann poliert werden. Die Finanzierung der Konzentratoren wurde aus BMBF- und Landesmitteln bestritten.

Ultra-Spurenanalyse von Detektorkomponenten für BOREXINO

Zur Untersuchung der in der CTF getesteten Flüssigszintillatoren werden Neutronenaktivierungsanalysen (NAA) als komplementäres Instrument zur Bestimmung von langle-

bigen instabilen Spurenelementen eingesetzt. Während in der CTF über die korrelierten β - α -Zerfälle ^{214}Bi - ^{214}Po und ^{212}Bi - ^{212}Po die Konzentrationen von ^{226}Rn bzw. ^{224}Ra bestimmt werden können, lässt sich mit der Neutronen-Aktivierungs-Analyse die Konzentration der Mutterisotope ^{238}U bzw. ^{232}Th direkt bestimmen. Darüber hinaus können mit der Neutronen-Aktivierungs-Analyse eine Reihe weiterer langlebiger β -instabiler Isotope nachgewiesen werden, die zum Untergrund in BOREXINO beitragen wie Lanthan, Lutetium, Indium, Cadmium und Rubidium. Einzig beim Nachweis von Kalium ist die erforderliche Sensitivität von 10^{-14} g/g aufgrund zu hoher Blindwerte nicht erreichbar.

Element	Kritische Konzentration (g/g)	gemessene Konz. in PC (90% cl)	gemessene Konz. in PXE (90% cl)
U	$2.3 \cdot 10^{-17}$	$2.0 \cdot 10^{-16}$	$1.0 \cdot 10^{-17}$
Th	$5.8 \cdot 10^{-16}$	$2.0 \cdot 10^{-15}$	$2.0 \cdot 10^{-16}$
Cd	$2.8 \cdot 10^{-9}$	$1.1 \cdot 10^{-12}$	$8.3 \cdot 10^{-15}$
In	$2.4 \cdot 10^{-12}$	$1.7 \cdot 10^{-12}$	$1.2 \cdot 10^{-13}$
K	$7.8 \cdot 10^{-15}$	$4.0 \cdot 10^{-12}$	$2.0 \cdot 10^{-12}$
La	$1.2 \cdot 10^{-12}$	$1.6 \cdot 10^{-14}$	$4.3 \cdot 10^{-16}$
Lu	$3.7 \cdot 10^{-15}$	$8.0 \cdot 10^{-16}$	$3.8 \cdot 10^{-16}$
Rb	$3.2 \cdot 10^{-14}$	$2.7 \cdot 10^{-12}$	$1.1 \cdot 10^{-13}$

Tabelle 2: Liste für den Untergrund in BOREXINO bedeutender primordialer Radionuklide. Angegeben sind mit NAA gemessene Obergrenzen für die Konzentration nach der Reinigung des Szintillators. Die zum Vergleich angegebene Kritische Konzentration bedeutet ein Untergrundergebnis pro Tag in 100t Szintillator im Energiefenster von 250 keV bis 800 keV.

Um eine höchstmögliche Sensitivität für die untersuchten Elemente zu erreichen, wurden die Parameter der Analyse hinsichtlich Probenmasse, Probenmatrix, Neutronenfluß und Bestrahlungsdauer optimiert. Zur Abtrennung interferierender Aktivität wurden radiochemische Verfahren zur elementspezifischen Separation entwickelt. Sie erlauben es, die aktivierten Nuklide in verschiedene Elementgruppen zu trennen und Aktivität, die durch andere Spurenelementverunreinigungen der Matrix entsteht, von den Indikatorradionukliden der langlebigen instabilen Isotope zu trennen. Eine weitere Verbesserung der Nachweisgrenze ließ sich im Fall von Uran durch die Verwertung einer charakteristischen Signatur beim Zerfall des Indikatorradionuklids ^{239}Np erzielen. Die Messung einer verzögerten β - e^- - γ -Koinzidenz erlaubt es, das Signal-Untergrund-Verhältnis um einen Faktor 10^4 gegenüber der herkömmlichen γ -Spektroskopie zu verbessern.

Der Schwerpunkt der Arbeit der vergangenen Jahre lag auf einer Verbesserung der Effizienzen bei der Separation interferierender Nuklide. Dies wurde durch den Einsatz von Ionentauschersäulen und durch die Optimierung der Säureextraktion erreicht. Inzwischen kann man bei allen interessierenden Elementen Effizienzen von über 90% erreichen, wie in einer Reihe von Tracerexperimenten bestätigt werden konnte.

Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Verbesserung der aktiven und passiven Abschirmung der für die Gammaspektroskopie verwendeten Ge-Detektoren. In Garching wurde ein Untergrundlabor mit einer Überdeckung von 15 m Wasseräquivalent neu errichtet, in dem ein 150%-Reinst-Ge-Detektor, zwei semiplanare Ge-Detektoren und ein 40%-Ge-Detektor betrieben werden. Für die Bleiabschirmung der Detektoren wurde hochreines Blei verwendet. Außerdem wurden drei Detektoren mit einem aktiven Myon-Veto ausgestattet (Szintillator-Platten). Insgesamt konnte damit der Untergrund um mehr als eine Größenordnung reduziert werden. Der Einsatz der aktiven Myonvetosysteme hat sich besonders für die Koinzidenzmessungen bewährt, da Myonen einen signifikanten Anteil der korrelierten Untergrundsereignisse verursachen.

Element	Konzentration in g/g	
	vor Reinigung	nach Reinigung
Uran	$3.2 \cdot 10^{-14}$	$< 1 \cdot 10^{-17}$
Thorium	$2.7 \cdot 10^{-14}$	$< 2 \cdot 10^{-16}$
Kalium	$5.0 \cdot 10^{-10}$	$< 6.1 \cdot 10^{-12}$
Lanthan	$2.0 \cdot 10^{-13}$	$< 4.3 \cdot 10^{-16}$
Cadmium	$< 6 \cdot 10^{-12}$	$< 8.3 \cdot 10^{-15}$
Indium	$< 5 \cdot 10^{-12}$	$< 1.2 \cdot 10^{-13}$
Lutetium	$< 1.6 \cdot 10^{-15}$	$< 3.8 \cdot 10^{-16}$
Rubidium	$< 7 \cdot 10^{-12}$	$< 1.1 \cdot 10^{-13}$

Tabelle 3: Verunreinigungen in einem auf PXE basierenden Szintillator, der in der Liquid-Handling-Anlage der CTF (Module-0) am Gran Sasso mehrere Male die Silika-Gel-Säule durchlaufen hat.

Dank der so verbesserten Nachweisgrenzen bei der Neutronen-Aktivierungs-Analyse konnte gezeigt werden, daß der auf PXE basierende Szintillator aus der CTF nach mehreren Säulenreinigungsprozessen kombiniert mit Wassereextraktion eine Urankonzentration $< 10^{-17}$ g/g aufwies. Die Methode der Säulenreinigung mit Silika-Gel hat sich somit als sehr effizient erwiesen, da auf der 5-t-Skala bei sämtlichen metallischen Verunreinigungen ein Reinigungsfaktor von mehreren Größenordnungen erzielt werden konnte (vgl. Tab. 3).

Design des Myonvetos für BOREXINO

In den vergangenen Jahren wurde in München der äußere Myonen-Detektor geplant und seine Effizienz mit Simulationen berechnet. Die dafür erforderlichen Parameter wurden in Laborexperimenten bestimmt.

Aus der Messung myoninduzierter Signale in der CTF ergibt sich für BOREXINO eine erforderliche Unterdrückung von 10^{-4} . Neben den beim Durchgang von Myonen durch den Detektor direkt verursachten Signalen trägt die myoninduzierte Erzeugung von Radionukliden im Szintillator zum Untergrund in BOREXINO bei (vgl. Tab. 4). Während die kurzlebigen Isotope ($t_{1/2} < 1$ s) durch eine mit einem Myonveto-Signal verbundene Totzeit diskriminiert werden können, ist dies bei den längerlebigen Isotopen ${}^7\text{Be}$, ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{10}\text{C}$ und ${}^{11}\text{C}$ nicht möglich. Daher war es wichtig den Wirkungsquerschnitt, mit dem diese Nuklide im Szintillator erzeugt werden, genau zu bestimmen.

In einem Experiment am CERN-SPS-Myonen-Strahl (NA54) wurden die Wirkungsquerschnitte für die Erzeugung radioaktiver Elemente im Szintillator bei zwei relevanten Myonen-Energien gemessen. Aus den Messungen ergibt sich eine Produktionsrate für ${}^{11}\text{C}$ von etwa 16/Tag in 100 t Szintillator und für ${}^7\text{Be}$ von etwa 4/Tag. Allerdings liegt die Energie des β^+ -Emitters ${}^{11}\text{C}$ sicher oberhalb des Neutrinofensters von 250–800 keV, so daß dieses Isotop nur zum Untergrund für die Detektion der pep- und ${}^8\text{B}$ -Neutrinos beiträgt. Beim ${}^7\text{Be}$ -Zerfall wird nur in 10 % der Fälle ein Gamma mit 478 keV emittiert, so daß der effektive Beitrag zum Untergrund im Neutrinofenster 0.4 Ereignisse pro Tag beträgt.

Für die Verkapselung der unter Wasser betriebenen Photovervielfacher wurde eine neues Design entwickelt. 16 Photovervielfacher dieses Designs wurden zum Test in die CTF eingebaut, um dort über die Registration von Cherenkovlicht myoneninduzierte Signale zu diskriminieren.

Datenanalyse für BOREXINO und die CTF

In München wurden Programme zur Ortsrekonstruktion und zur Teilchenidentifikation entwickelt und an den CTF-Daten getestet. Der Ort eines Ereignisses ergibt sich aus den unterschiedlichen Ansprechzeiten der Photovervielfacher. Die Münchener Rekonstruktion arbeitet über einen Vergleich der gemessenen Ansprechzeiten mit aus Simulationen berechneten Werten. Die gute Übereinstimmung zwischen Monte-Carlo-Simulationen und in der

	Isotope	$t_{1/2}$	E_{max}
β^-	^{12}B	0.02 s	13.4 MeV (β^-)
	^{11}Be	13.80 s	11.5 MeV (β^-)
	^{11}Li	0.01 s	20.8 MeV (β^-)
	^9Li	0.18 s	13.6 MeV (β^-)
	^8Li	0.84 s	16.0 MeV (β^-)
	^8He	0.12 s	10.6 MeV (β^-)
	^6He	0.81 s	3.5 MeV (β^-)
β^+ , EC	^{11}C	20.38 min	0.99 MeV (β^+)
	^{10}C	19.30 s	1.9 MeV (β^+) (+0.72 MeV γ)
	^9C	0.13 s	16.0 MeV (β^+)
	^8B	0.77 s	13.7 MeV (β^+)
	^7Be	53.3 Tage	0.478 MeV (EC, γ)

Tabelle 4: Radioaktive Isotope, die von Myonen und den von ihnen erzeugten Sekundärteilchen in Flüssigszintillator (^{12}C -Target) produziert werden. ^7Be , ^{11}C , ^{10}C und ^{11}Be stellen für die solare Neutrino-Spektroskopie einen bedeutenden Untergrund dar; ^8He , ^9Li und ^{11}Li , die über eine β -Neutron-Kaskade zerfallen, sind wichtig für die Anti-Neutrino-Spektroskopie.

CTF gemessenen Größen zeigt, daß die optischen Eigenschaften des Detektors verstanden sind. Die Analyse von in der CTF I durchgeführten Messungen mit einer ^{222}Rn -Quelle ergibt eine Ortsauflösung bei 750 keV (^{214}Po) von etwa 12 cm (1σ).

Die Teilchenidentifikation erfolgt über die gemessene Pulsform aufgrund der unterschiedlichen Emissionszeiten des Szintillators bei Anregung durch Elektronen oder schwere Teilchen. Das in München für die CTF II entwickelte Programm benutzt ein Neuronales Netz, das an simulierten oder aber den durch eine zeitliche Koinzidenz leicht zu identifizierenden korrelierten β - α -Zerfalls-Daten von ^{214}Bi - ^{214}Po ($t_{1/2} = 164 \mu\text{s}$) trainiert werden kann. Simulationen ergaben für den Energiebereich von 0.2–1.5 MeV eine Alpha-Diskriminations-Effizienz von etwa 97 % bei einem Verlust von etwa 3 % der Beta-Ereignisse.

Kryodetektoren für das solare Neutrino-Experiment GNO

Das Gallium-Neutrino-Experiment GNO (Gallium Neutrino Observatory, vormals GALLEX), das in den Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Italien) aufgebaut ist, weist solare Neutrinos über die Reaktion $^{71}\text{Ga}(\nu, e)^{71}\text{Ge}$ nach. 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 ^7Be -Neutrinos (27 %), die ^8B -Neutrinos (12 %) und die CNO-Neutrinos (8 %). Das Target besteht aus 101 Tonnen GaCl_3 , das in Wasser und Salzsäure aufgelöst ist und 30.3 Tonnen natürliches Gallium enthält. Das entspricht ungefähr 10^{29} ^{71}Ga -Atomen im gesamten Target. Die durch die solaren Neutrinos erzeugten ^{71}Ge -Atome werden etwa alle vier Wochen aus dem Galliumtank extrahiert und als German-Gas (GeH_4) in Proportionalzählrohre mit niedriger Untergrundaktivität eingebracht.

Um bei der Messung des Zerfalls von ^{71}Ge in ^{71}Ga sowohl die statistischen als auch die systematischen Fehler des Experiments zu reduzieren, könnten die gegenwärtig verwendeten miniaturisierten Proportionalzählrohre durch hoch-auflösende Kryodetektoren ersetzt werden. Die chemische Extraktionsmethode, die in einem monatlichen Zyklus einige wenige ^{71}Ge -Atome aus 101 Tonnen GaCl_3 -Lösung gewinnt, stellt ein hocheffizientes (ungefähr 95 %) und gut etabliertes Verfahren dar, das nicht geändert werden darf. Ein 4π -Detektor mit hoher Nachweiswahrscheinlichkeit ($\sim 98\%$) wurde entwickelt und getestet, der die weniger effizienten Proportionalzählrohre (Nachweiswahrscheinlichkeit: 65 % bis 75 %) ersetzen könnte.

Zuvor müssen jedoch noch einige Modifikationen durchgeführt werden, um den Zielsetzungen des experimentellen Ablaufes bei GNO gerecht zu werden. Das Zeitfenster zwischen Extraktion und Messung ist aufgrund der kleinen Halbwertszeit von ^{71}Ge ($T_{1/2} = 11.43$ d) sehr kurz. Es wurden deshalb erste Schritte unternommen, um ein Detektorkonzept zu entwickeln, das es ermöglicht, unabhängig voneinander die chemische Deposition durch CVD (chemical vapour deposition) und den Einbau (z. B. durch Kleben) in die eigentliche Nachweisapparatur durchzuführen. Erste Messungen zeigten vielversprechende Ergebnisse und sollen während der nächsten Monate intensiv fortgesetzt werden.

Ein weiterer entscheidender Punkt hinsichtlich einer Implementierung des Kryodetektorkonzepts bei GNO ist die Depositionseffizienz des Germaniums aus dem German-Gas auf den Kryodetektor. Große Anstrengungen wurden unternommen, um die Effizienz des CVD-Prozesses zu erhöhen: durch lokal sehr eng begrenztes Heizen, Verwendung einer miniaturisierten Depositionskammer, Reduzierung des Volumens während des Prozeßablaufs und weiterer Maßnahmen wurde die Effizienz der Ge-Deposition zunächst von $\sim 1\%$ auf $\sim 70\%$ und in einem weiteren Schritt auf $\sim 91\%$ erhöht. Die Effizienz wurde durch mehrere unabhängige Methoden bestimmt, von denen sich die Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) als die genaueste herausstellte. Da die gegenwärtige Effizienz des CVD-Prozesses bereits im Bereich der chemischen Extraktionseffizienz bei GNO liegt, können nun weitere Schritte hinsichtlich eines Prototyp-Experiments im Gran-Sasso-Laboratorium unternommen werden.

Um die Machbarkeit eines „Kryo-GNO“ zu zeigen und ein Prototyp-Experiment am Gran-Sasso-Untergundlabor (3600 m Wasseräquivalent) vorzubereiten, wurde im Untergundlabor (15 m Wasseräquivalent) des „Beschleunigerlaboratoriums / Maier-Leibnitz-Laboratoriums“ in Garching ein neuer Entmischungskryostat aufgebaut. Dieser Kryostat ist mit einem Myon-Veto ausgestattet, das aus plattenförmigen Plastikszintillatoren und einer untergrundarmen Bleiabschirmung besteht und erste Langzeitmessungen ermöglicht.

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

Teilprojekt A 3

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

Gruppenmitglieder: G. Angloher, F. von Feilitzsch, M. Huber, T. Jagemann, J. Jochum, A. Rüdiger, J. Schnagl, M. Stark, H. Wulandari.

Einleitung

Das Ziel von CRESST ist der direkte Nachweis der Teilchenkandidaten der Dunklen Materie und die Untersuchung der Natur der Teilchen. Eine Vielzahl von astrophysikalischen Beobachtungen favorisiert ein Universum, das von kalter Dunkler Materie dominiert ist. Schwach wechselwirkende massive Teilchen (WIMPs) sind Kandidaten für diese Dunkle Materie. Das leichteste supersymmetrische Teilchen, das sogenannte Neutralino, ist gegenwärtig der aus theoretischer Sicht favorisierte Kandidat. Wir glauben, daß es wichtig ist, unabhängig von theoretischen Modellen experimentell einen möglichst großen Bereich an Massen und Wirkungsquerschnitten abzudecken. Die erste Phase des CRESST-Experiments, basierend auf Saphir-Kalorimetern niedriger Energieschwelle, wird besonders empfindlich sein für WIMPs mit kleinen Massen im Bereich von 2–10 GeV. Dieser Massenbereich ist anderen Experimenten wegen ihrer hohen Schwelle nicht zugänglich. Da bestimmte Teilchen, wie z. B. Photinos, nur von Kernen mit Spin gestreut werden, sollten dabei auch Targetmaterialien mit Kernspin eingesetzt werden. Die zweite Phase von CRESST, basierend auf CaWO_4 -Kristallen mit der gleichzeitigen Messung von Szintillationslicht und Phononen und der daraus resultierenden sehr effektiven Untergrundunterdrückung, wird sehr sensitiv im mittleren und hohen WIMP-Massenbereich sein.

WIMPs können mit normaler Materie durch elastische Streuung an Atomkernen wechselwirken. Auf dieser Möglichkeit basieren alle Experimente zum direkten Nachweis von WIMPs. Konventionelle Nachweismethoden nutzen die vom Rückstokkern erzeugte Ionisation oder Szintillation. Da für Ionisation oder Szintillation eine relativ hohe Energie nötig ist, sinkt die Effizienz dieser Nachweismethoden sehr stark für langsame Rückstokkerne. Tieftemperatur-Detektoren dagegen nutzen die Anregungen mit viel geringerer Energie, wie z. B. Phononen, und während konventionelle Detektoren an ihre Grenzen gestoßen sind, kann mit Tieftemperatur-Detektoren die Sensitivität noch sehr weit gesteigert werden. Außerdem können Tieftemperatur-Detektoren mit dem Nachweis von Ladungen oder Licht kombiniert werden. Mit der resultierenden Möglichkeit, den Untergrund zu diskriminieren, kann die Sensitivität bei der Suche nach den seltenen durch WIMPs induzierten Kernrückstößen um Größenordnungen gesteigert werden.

Ein Kalorimeter besteht aus einem Kristall als Absorber, in dem WIMPs oder andere Teilchen Energie deponieren, einem Thermometer und einer schwachen thermischen Kopplung an ein Kältebad. Die im Absorber deponierte Energie wird über den Temperaturanstieg gemessen, den sie im Thermometer hervorruft. Dieser Temperaturanstieg ist bei tiefen Betriebstemperaturen höher, da die Wärmekapazitäten mit sinkender Temperatur stark abnehmen. Der kritische Teil des Kalorimeters ist das Thermometer. CRESST hat supraleitende Phasenübergangstermometer entwickelt, die aus einem aufgedampften Streifen supraleitenden Metalls bestehen. Die Thermometer werden im Übergangsbereich vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand betrieben, wo eine kleine Temperaturänderung eine relativ große Widerstandsänderung hervorruft, die mit einem SQUID gemessen wird.

In seiner ersten Stufe wird CRESST mit vier Saphir-Kalorimetern von insgesamt etwa 1 kg Targetmasse sehr sensitiv im niedrigen Massenbereich von WIMPs suchen. Das Ziel der zweiten Phase von CRESST ist, Detektoren mit einer Absorbermasse von insgesamt 10 kg zu installieren und dabei die simultane Messung von Szintillationslicht und Phononen zur Untergrundunterdrückung zu nutzen. Diese neuen Detektoren, bestehend aus CaWO_4 -Kristallen mit je 300 g Masse, werden insbesondere im mittleren und höheren WIMP-Massebereich sensitiv sein. Mit den neuen Detektoren sollte CRESST in der Lage sein, die positive Evidenz für die Existenz von WIMPs, wie sie vom Experiment DAMA berichtet wird, nach etwa nur einem Monat Meßzeit überprüfen zu können. Langfristig wird CRESST damit einen substantziellen Anteil des von SUSY-Modellen erwarteten Parameterbereichs für Neutralinos als Dunkle Materie überprüfen können. Im Gegensatz zu anderen Experimenten, die in Zukunft ebenfalls weit in diesen Parameterbereich vorstoßen werden, kann bei CRESST eine Vielzahl von Targetmaterialien verwendet werden. Die Evidenz für ein eventuell beobachtetes positives WIMP-Signal kann damit erheblich bekräftigt und die Eigenschaften des WIMPs untersucht werden.

Arbeiten im Einzelnen

Das Ziel von CRESST in den vorangegangenen Förderperioden war es, an der Weiterentwicklung der Detektoren in München zu arbeiten, die Experimentiereinrichtungen am Gran-Sasso-Labor zu vervollständigen und vier 262-g-Saphir-Detektoren mit einer Energieauflösung von 200 eV bei 1 keV und einer Energieschwelle von 500 eV unter untergrundsarmen Bedingungen zu betreiben. Um dieses Ziel zu erreichen, mußten während der letzten Förderperiode im Wesentlichen zwei Aufgaben erfüllt werden:

- Die Entwicklung von massiven, untergrundsarmen Detektoren mit sehr niedriger Energieschwelle,
- Der Aufbau eines untergrundsarmen und großvolumigen Kryostaten.

Gleichzeitig wurden in München die neuen auf CaWO_4 -basierenden Detektoren entwickelt. Mit der sehr empfindlichen Lichtmessung, gleichzeitig zur Messung der Phononen, kann der radioaktive Untergrund sehr effektiv unterdrückt werden. Dies gibt CRESST im Bereich

mittlerer und hoher WIMP-Massen ein großes Potential für sehr sensitive Suche nach Teilchen der Dunklen Materie.

Detektorentwicklung

Die von der CRESST-Kollaboration entwickelten Detektoren bestehen aus dielektrischen Kristallen, die als Target dienen, auf die kleine dünne supraleitende Filme aufgebracht sind, die als Thermometer dienen. Der Detektor wird bei der Temperatur des Übergangs des Films vom normalleitenden in den supraleitenden Zustand betrieben, wo eine kleine Temperaturänderung zu einer relativ hohen Änderung des elektrischen Widerstandes des Films führt. Die durch eine Wechselwirkung eines Teilchens hervorgerufene Temperaturänderung ist in der Regel wesentlich kleiner als die Temperaturbreite des Übergangs zur Supraleitung, weshalb zwischen Temperatur- und Widerstandsänderung ein annähernd linearer Zusammenhang besteht. Der Widerstand des Filmes ($\sim 0.1 \Omega$) wird in einem SQUID-Auslesekreis gemessen.

In erster Annäherung thermalisieren die durch eine Wechselwirkung erzeugten hochfrequenten Phononen nicht im Kristall, sondern werden zuvor direkt im supraleitenden Film absorbiert. Deshalb hängt die Energieauflösung nur bedingt von der Größe des Kristalles ab und es ist möglich, große Detektoren zu realisieren. Die hohe Sensitivität der Detektoren erlaubt außerdem mit einem zweiten, getrennten Detektor des gleichen Typs, das Licht nachzuweisen, das von einem szintillierenden Targetkristall emittiert wird.

Die zur Zeit im Gran-Sasso-Labor verwendeten Detektoren bestehen aus 262 g schweren Saphir-Kristallen und Wolfram-Thermometern. Diese Detektoren haben die beste Energieauflösung pro Detektormasse aller bisher realisierten Tieftemperatur-Detektoren. Die Energieauflösung beträgt 133 eV Halbwertsbreite bei 1.5 keV.

Die Detektoren werden in einen Kupferhalter montiert. Der $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ große Kristall wird gehalten und von Saphir-Kugeln thermisch isoliert. Einige der Kugeln sind mit Plastikfedern vorgespannt. Der thermische Kontakt zwischen den Haltern und den Detektoren wird mit 20- μm -Gold-Bond-Drähten hergestellt. Die elektrische Verbindung zum Thermometer besteht aus supraleitenden Bond-Drähten. Um radioaktive Kontamination durch Lötungen zu vermeiden, sind alle sonstigen Zuleitungen mit Kupferschrauben auf die jeweiligen Kontaktpads geschraubt. Sehr schmale Gold-Filme auf beiden Seiten des Thermometers dienen als elektrische Heizer, um mit kurzen Pulsen die Langzeitstabilität der Energieeichung zu überwachen.

Unter Ausnutzung des Proximity-Effekts läßt sich die Sprungtemperatur von supraleitendem Iridium durch Aufbringen einer normalleitenden Goldschicht absenken. Durch Variation der Schichtdicken ist eine gezielte Einstellung der Sprungtemperatur möglich. In der letzten Förderperiode ist es uns gelungen, die Sprungtemperatur eines Iridium/Gold-Schichtpakets gezielt und reproduzierbar zwischen 25 mK und 110 mK einzustellen.

Die Iridium/Gold-Thermometer wurden erfolgreich auf die Materialien Saphir, Silizium, Siliziumoxid, Siliziumnitrid und Germanium aufgebracht, die damit als Absorbermaterialien für zukünftige Experimente zur Verfügung stehen. Wegen der geringen Substrattemperaturen, die zur Herstellung der Iridium/Gold-Thermometer erforderlich sind, sollte der Übergang auf andere Absorbermaterialien unproblematisch sein.

Die Verwendbarkeit anderer Absorbermaterialien ist einer der Vorteile von Tieftemperatur-Kalorimeter. Auch für die gleichzeitige Messung von Szintillationslicht und Phononen wurde schon eine Vielzahl anderer Kristalle wie PbWO_4 , BGO, etc. eingesetzt. Im Falle eines positiven WIMP-Signals können durch die Variation des Targets Rückschlüsse auf die Natur des WIMPs gezogen werden.

Die neuen Detektoren von CRESST: Licht-Phonon Messung

Passive Techniken zur Untergrund-Unterdrückung – Messung in einem Untergrundlabor, effektive Abschirmung gegenüber der Radioaktivität im umgebenden Gestein und die ausschließliche Verwendung von Materialien möglichst frei von Radioaktivität in der Umge-

bung der Detektoren – sind bei der Suche nach WIMP-Kandidaten der Dunklen Materie eine unbedingte Notwendigkeit. Jedoch wird immer ein gewisser Level an Untergrund von Beta- und Gamma-Emittern im Material der Detektoren und deren Umgebung unvermeidlich sein. Diese Restaktivitäten produzieren im Detektor überwiegend Elektronrückstöße, im Gegensatz zu Kernrückstößen, wie sie von WIMPs und auch von Neutronen erzeugt werden. Deshalb kann die Sensitivität eines Experiments dramatisch verbessert werden, wenn neben passiven Maßnahmen die Detektoren in der Lage sind, zwischen Kern- und Elektronrückstößen zu unterscheiden.

In einem szintillierenden Kristall werden durch eine Teilchenwechselwirkung Phononen und Szintillationslicht erzeugt. Bei gleicher Energie ist dabei die Lichtausbeute bei Kernrückstößen deutlich geringer als bei Elektronrückstößen. Daher kann durch eine simultane Messung von Szintillationslicht und Phononen zwischen beiden unterschieden werden. Damit kann der überwiegende Anteil des Untergrundes diskriminiert werden. Dies ist das Prinzip der neuen von CRESST entwickelten Detektoren. Dabei werden CaWO_4 -Szintillations-Kristalle als Absorber verwendet. Mit einem auf dessen Oberfläche aufgetragenen Phasenübergangsthermometer werden die durch eine Wechselwirkung erzeugten Phononen gemessen. Ein in unmittelbarer Nähe plaziertes, kleineres Tieftemperatur-Kalorimeter dient als Detektor des emittierten Szintillationslichtes.

Trägt man die Signalhöhen der Licht-Messung gegen die koinzident gemessene Signalthöhe der Phonon-Messung gegeneinander auf – als das Ergebnis der Bestrahlung eines Testdetektors mit Gamma- und Betastrahlung sowie Neutronen –, so kann man deutlich zwei 'Bänder' unterscheiden. Das untere Band, bei geringer Lichtausbeute, ist durch die von den Neutronen induzierten Kernrückstöße erzeugt, das obere Band, bei hoher Lichtausbeute, durch die von Betas und Gammas induzierten Elektronrückstöße. Nachdem durch die Messung mit Neutronen der Akzeptanzbereich von Kernrückstößen festgelegt wurde, konnte durch die Messung nur mit Gammas und Betas die Effizienz der Unterdrückung von Gamma- und Beta-Untergrund von besser als 99.7 % bei Energien oberhalb von 15 keV bestimmt werden.

Anders als bei der analogen Methode von simultaner Ladungs- und Phonon-Messung leidet diese Methode nicht unter reduzierter Effizienz bei Ereignissen nahe der Oberfläche. Bei der Ladungsmessung können für solche Ereignisse Ladungsträger verloren gehen, was zur Verwechslung von an der Oberfläche absorbiert Strahlung, insbesondere Betastrahlung, mit Kernrückstößen führen kann.

Zur Zeit wird ein CaWO_4 -Phonon-Licht-Detektor mit einer Masse von 300 g in München entwickelt. Nachdem der prinzipielle Beweis der Realisierbarkeit der Licht-Phonon-Messung mit einem nur 6 g schweren Prototyp erbracht wurde, ist es kürzlich gelungen zu zeigen, daß auch aus einem Kristall mit 300 g Masse genügend Licht für die Detektion gesammelt werden kann. Es ist geplant, einen solchen 300-g-Prototyp im Gran Sasso-Labor zu installieren und zusammen mit zwei 262-g-Saphir-Kalorimetern zu betreiben.

Auf eine der runden Oberflächen der zylindrischen CaWO_4 -Kristalle (Durchmesser 4 cm und Höhe 4 cm) wird ein Wolfram oder Ir/Au-Phasenübergangs-Thermometer aufgebracht. Dieses Kalorimeter wird zusammen mit einem Lichtdetektor in ein Gehäuse aus hoch reflektierendem gesintertem Teflon 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 auf eine der Oberflächen Silizium zur besseren Lichtabsorption aufgebracht. Die von der Lichtabsorption verursachte Temperaturerhöhung wird mit einem Wolfram- oder Ir/Au-Phasenübergangsthermometer gemessen.

Die intrinsische radioaktive Verunreinigung von CaWO_4 -Kristallen wurde bereits durch Gamma-Spektroskopie mit Germanium-Detektoren im Gran-Sasso-Labor gemessen. Innerhalb der Nachweisgrenzen konnte dabei keine Verunreinigung festgestellt werden. Die Nachweisgrenzen entsprechen 20 Ereignissen / (kg keV Tag) für die Thorium-Kette und 1.6 Ereignissen / (kg keV Tag) für die Uran-Kette im für die WIMP-Suche relevanten Energiebereich. Die hohe Gamma-Absorptions-Effizienz von CaWO_4 macht eine weitere Verbesserung dieser Limits mit Gamma-Emissions-Spektroskopie sehr schwierig.

Aufbau der Experimentiereinrichtungen für das CRESST Experiment und erste Messungen am Gran-Sasso-Labor

Der zentrale Teil des CRESST Experiments ist der Kryostat im Gran-Sasso-Untergroundlabor in Italien. Der Kryostat muß die kryotechnischen Anforderungen gleichzeitig zu denen eines geringen Untergrundes erfüllen. Die ersten derartigen Kryostaten waren konventionelle Entmischungskryostaten, bei denen einige der Materialien auf Radioaktivität untersucht wurden. Allerdings können in einem Kryostaten einige nicht kontaminationsfreie Materialien wie Stahl nicht vollständig vermieden werden. Deshalb wurde bei CRESST ein spezielles Design gewählt. Dabei befindet sich das Experiment in einer „ColdBox“ in einiger Entfernung zum Kryostaten. Bis zu 100 kg Detektormaterial können in der ColdBox aufgenommen werden. Die ColdBox ist aus sehr reinem, an Radioaktivität armen Kupfer hergestellt. Für die Vakuumdichtungen wird hochreines Blei verwendet. Die ColdBox ist mit 14 cm hochreinem Kupfer und 20 cm Blei gegen Umgebungsradioaktivität abgeschirmt. Durch die Kombination der externen Abschirmung mit zwei internen Bleiabschirmungen wird jede direkte Sichtline von außen zum Experiment vermieden. Die Kühlleistung wird durch einen 1.5 m langen Kaltfinger vom Kryostat durch die Abschirmung zum Experiment geführt. Auch der Kaltfinger mit allen zugehörigen thermischen Abschirmungen ist aus hochreinem Kupfer hergestellt.

Um eine Aktivierung durch kosmische Strahlung zu vermeiden, wurde das Kupfer nach der elektrolytischen Produktion in mit mindestens 10 m Wasseräquivalent abgeschirmten Räumen gelagert und nur für die Zeit der jeweiligen Herstellungsschritte an die Oberfläche gebracht. Die Zeit, die das Kupfer der kosmischen Strahlung ausgesetzt war, konnte so auf insgesamt 10 Wochen minimiert werden. Um eine Verunreinigung der Oberflächen zu vermeiden, können alle Montagearbeiten am und um den Kryostaten in einem Reinraum durchgeführt werden. Die ColdBox und die Abschirmung befinden sich in einer gasdichten Box, die mit Stickstoff geflutet wird, um so eine Kontamination durch Radon aus der Luft zu verhindern. Die Zugänge zum Kryostaten für flüssige Kühlmittel und elektrische Zuleitungen befinden sich außerhalb des Reinraums, der somit im Normalbetrieb nicht betreten werden muß. Um Reinraum und Zugänge zum Kryostaten befindet sich ein Faraday'scher Käfig. Der Aufbau befindet sich in Halle B des Gran-Sasso-Untergroundlabors.

Die Installation wurde im Jahre 1998 fertiggestellt, nachdem die zuvor für Testzwecke verwendete ColdBox aus „normalem“ Kupfer durch eine ColdBox aus hochreinem Kupfer ersetzt wurde.

Im Laufe des Jahres 1999 wurde eine Serie von ersten Messungen mit vier 262-g-Saphir-Detektoren unter untergrundarmen Bedingungen durchgeführt. Die dabei gemessene Rate war etwa 10 Ereignisse / (kg keV Tag) oberhalb 30 keV und erst oberhalb 100 keV weniger als 1 Ereignis / (kg keV Tag). Dies war viel höher als erwartet und nicht durch Radioaktivität verursacht. Koinzidenzen zwischen den Detektoren fehlten völlig, obwohl sich die Detektoren ohne gegenseitige Abschirmung gegenüber stehen. Daher konnte es sich nicht um Gammastrahlung oder Beta-Emitter an den Kristalloberflächen handeln. Auch Beta-Emitter innerhalb des Kristalls konnten aufgrund der spektralen Form fast sicher ausgeschlossen werden. Ferner wich die Rate über längere Zeit deutlich von einer Poissonverteilung ab, was nicht durch Radioaktivität verursacht werden kann.

Auch Vibrationen konnten als Ursache des Untergrundes ausgeschlossen werden. Bekannte Quellen für Vibrationen, wie die Nadelventile für den '1K-Pot' des Entmischungskryostaten, wurden beseitigt. Außerdem wurden die Detektoren durch eine gefederte Aufhängung mit niedriger Resonanzfrequenz gegen Vibrationen von außen isoliert. Diese Maßnahmen haben die Stabilität der Messungen gegen externe Störungen deutlich verbessert; die Untergrundsignale blieben davon jedoch unberührt.

Die Möglichkeit, die Untergrundsignale könnten durch elektromagnetische Interferenz verursacht werden, wurde ebenfalls untersucht. Änderungen des Auslesekreises mit dem Ziel, die Phasenübergangsthermometer gegen Stör-Ströme und dadurch hervorgerufene Energiedeposition abzuschirmen, verbesserten zwar die Stabilität der Messungen, blieben aber erfolglos bei der Reduzierung des Untergrundes.

In einer weiteren Messung wurde ein 262-g-Saphir-Detektor mit zwei Thermometern verwendet. Die Signale der beiden Thermometer waren koinzident und hatten jeweils gleiche Pulshöhe. Die Signale zeigten nach wie vor die gleiche Signalform wie die durch Teilchenwechselwirkung verursachte Signale. Wie auch bei früheren Messungen waren die Signale zwischen verschiedenen Detektoren nicht koinzident. Dies zeigt deutlich, daß die Signale von Energiedepositionen verursacht werden, die im Kristall hochfrequente Phononen erzeugen. Die Koinzidenzen innerhalb eines Kristalls schließen elektrische Interferenz eindeutig aus.

Nach Ausschluß von Radioaktivität, Vibrationen und elektronischen Interferenzen kamen nur noch zeitlich zufällige Relaxationsprozesse in der Struktur der Halterung der Kristalle in Frage. Die Saphir-Kugeln wurden durch Plastik-Stempel ersetzt. Dadurch wurde die Auflagefläche vergrößert und der Druck auf den Absorberkristall reduziert. Diese Maßnahmen hatten eine deutliche Reduzierung des Untergrundes zur Folge. Die Untergrundrate liegt jetzt im erwarteten Bereich von wenigen Ereignissen / (kg keV Tag). Oberhalb 15 keV sogar unterhalb 1 Ereignis / (kg keV Tag). Damit ist der Untergrund schon weit genug reduziert, um im mittleren und hohen WIMP-Massenbereich die angestrebten Messungen durchführen zu können. Der Untergrundlevel kann noch weiter reduziert werden. Bei den verbleibenden Ereignissen handelt es sich um Photonen aus Uran-Zerfällen, wie aus dem Spektrum klar ersehen werden kann. Die Uran-Verunreinigungen stammen aus dem Kontakt mit der für das Elektropolieren verwendeten Lösung. Neue oder auch von innen abgeschirmte Halter werden auch diesen Untergrund beseitigen.

Hochauflösende Röntgen-Detektoren mit supraleitenden Tunnelnennern

Supraleitende Aluminium-Tunnelnennern (Al-STD) wurden für die Anwendung in der hochauflösenden Röntgen-Spektroskopie entwickelt. Al-STD bestehen aus zwei supraleitenden Al-Schichten, die durch eine dünne dielektrische Tunnelbarriere getrennt sind. Bei Energieabsorption werden Cooper-Paare aufgebrochen, die zu einem meßbaren Strom über die Tunnelbarriere führen. Die Energieabsorption sowohl in der oberen als auch in der unteren Schicht führen zu einem Stromsignal. 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 Tunnelnennern bei dieser Röntgenenergie erreichte Auflösung, was vor allem auf die Einführung einer metallischen Pufferschicht unterhalb der Tunnelnennern zurückzuführen ist. Die Pufferschicht ist von der Tunnelnennern 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 Tunnelnennern erreichen, auf Werte unterhalb von $2\Delta_{Al}$ konvertiert, wobei Δ_{Al} für die Energielücke von Al steht. Folglich wird die Anzahl der Phononen, die Cooper-Paare in den supraleitenden Al-Elektroden der Tunnelnennern aufbrechen können, drastisch reduziert, was zu einer wesentlichen Verringerung des Untergrundes 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 Tunnelnennern 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, 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 Tunnelodiode aufgebracht Absorber in Form eines Bleifilms ausgeglichen werden.

Der Bleifilm hat eine Dicke von etwa $1.3 \mu\text{m}$ und ist von der Tunnelodiode durch eine auf dem Al natürlich gewachsene Al_xO_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 ist nötig, um eine Beeinflussung der Gap-Struktur des supraleitenden Al zu vermeiden, die zu einer Reduktion des Signalstroms führen könnte. Tunnelodiode und Absorber sind somit nur phononisch aneinander gekoppelt. Durch die Aufbringung des Detektors auf eine 300 nm dicke Si_3N_4 -Membran konnte eine Verringerung der Signalhöhe aufgrund von Phononenverlusten in das Substrat vermieden werden.

Durch Auslesen eines Bleiabsorbers mit einer auf einer Membran aufgebracht Al-STD konnte wiederum eine hohe Energieauflösung von 12 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 Zyklirens. Diese Degenerierung konnte durch die Deposition einer SiO_2 -Schicht auf dem Absorber vermieden werden, was jedoch zu einer etwas verschlechterten Energieauflösung von etwa 20 eV (FWHM) bei 5.9 keV führt.

5 Diplomarbeiten, Dissertationen

5.1 Diplomarbeiten

Grieb, Christian: Untersuchungen zur Szintillatorreinigung mit Kieselgel, Studien zum Untergrund und Vakuum-Neutrinooszillationen in BOREXINO

Lanfranchi, Jean-Côme: Entwicklung von Kryodetektoren mit supraleitenden Folienabsorbern für das Solare Neutrinoexperiment GNO

5.2 Dissertationen

Hagner, Tanja: Untersuchung myoninduzierter Untergründereignisse für das Solare Neutrino Experiment BOREXINO

Schnagl, Johann: Untersuchungen zur Unterscheidbarkeit ionisierender und nicht ionisierender Strahlung in Tieftemperaturkalorimetern

Erben, Thomas: Weak Shear Analysis and Cosmic Structures

Angloher, Godehard: Supraleitende Tunnelioden als Detektoren für Röntgenstrahlung

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.

Neben dem großen Vorteil, der sich daraus für die verschiedenen Gruppen ergab, stellte der SFB auch insbesondere für diejenigen Mitarbeiter, die nicht unmittelbar von den Arbeiten anderer Gruppen profitieren konnten, ein Forum dar, das den weiter gespannten wissenschaftlichen Rahmen näherbrachte. Dieser Austausch wurde durch regelmäßige gemeinsame Seminare und insbesondere durch die Veranstaltung von „Tagen des SFB“ gefördert, bei denen jeweils eine Gruppe als Gastgeber ihr Institut und ihre neueren Arbeiten vorstellte. Dabei wurde besonderer Wert darauf gelegt, daß neben einem hohen wissenschaftlichen Anspruch die Darstellung auch geeignet war, Nicht-Fachleuten einen guten Überblick zu gewähren. Die „Tage des SFB“ stellten damit neben einem anspruchsvollen wissenschaftlichen Arbeitstreffen auch eine Gelegenheit zur gegenseitigen persönlichen Kontaktpflege dar, innerhalb derer neue Ideen und Initiativen entstehen konnten.

Jeweils einmal im Jahr konnte ein – in der Regel einwöchiges – Arbeitstreffen auf Schloß Ringberg, gefördert durch die Max-Planck-Gesellschaft, veranstaltet werden. Zu diesen

Treffen waren neben den Mitarbeitern des SFB auch regelmäßig Gäste geladen, die über besonders interessante und für die Arbeiten im SFB wichtige Entwicklungen berichten konnten. Auch diese Veranstaltungen förderten wesentlich den inneren Zusammenhalt der Mitarbeiter und die Verflechtung der wissenschaftlichen Aktivitäten.

Viele der Forschungsarbeiten innerhalb des SFB erfolgen in internationalen Kooperationen, so daß eine hervorragende Voraussetzung auch für Kontakte der Mitarbeiter im internationalen Rahmen gegeben ist. Andererseits erfahren die Arbeiten am SFB dadurch auch nach außen eine besonders effiziente Darstellung. Der SFB stellt inzwischen zweifellos eine Institution dar, die im nationalen, aber auch im internationalen Rahmen Bedeutung hat.

7 Veröffentlichungen

Wegen der Vollständigkeit sind auch ältere und eingereichte Publikationen aufgenommen:

Altmann, M. et al.: Phys. Lett. **B 490** (2000), 16

Angloher, G.: Untersuchungen zur Reinheit von Komponenten des BOREXINO Detektors. Diplomarbeit, Technische Universität München, 1997

Angloher, G. et al.: Neutron Activation Analysis of Ultrapure Liquids in a 500ml Silicon Single Crystal Irradiation Flask. In: Methods and Applications of Radioanalytical Chemistry Marc IV. Proc. Conf., Hawaii. J. Radioanal. Nucl. Chem. **234** (1) (1998), 37–42

Angloher, G. et al.: J. Appl. Phys. **89** (2001), 1425

Angloher, G. et al.: J. Low Temp. Phys., accepted

Angloher, G., J. Jochum et al.: In: 8th Int. Workshop on Low Temperature Detectors. Proc., Dalfsen, Netherland, August 16–20, 1999. Nucl. Instr. Meth. **A 444** (2000), 214

BOREXINO-Collaboration: Physics Beyond Solar Neutrinos. Addendum to Borexino Proposal, F. Calaprice (ed.) (1999)

BOREXINO-Collaboration, G. Alimonti et al.: Light Propagation in a Large Volume Liquid Scintillator. Nucl. Instrum. Meth. **A 440** (2000), 360–371

BOREXINO-Collaboration, G. Alimonti et al.: Ultra Low Background Measurements in a Large Volume Underground Detector. J. Astroparticle Phys. **8** (1998), 141

Bravin, M., M. Bruckmayer, C. Bucci, S. Cooper, S. Giordano, F. v. Feilitzsch, J. Höhne, J. Jochum, V. Jörgens, R. Keeling, H. Kraus, M. Loidl, J. Lush, J. Macallister, J. Marchese, O. Meier, P. Meunier, U. Nagel, T. Nüssle, F. Pröbst, Y. Ramachers, M. Sarsa, J. Schnagl, W. Seidel, I. Sergeev, M. Sisti, L. Stodolsky, S. Uchaikin, L. Zerle: The CRESST Dark Matter Search. Astroparticle Phys. **12** (1999), No. 1–2, 107–114

Goldbrunner, T.: Messung niedrigster Aktivitäten für das solare Neutrinoexperiment BOREXINO. Doktorarbeit, Technische Universität München, 1997

Goldbrunner, T. et al.: Neutron activation Analysis of Detector Components for the Solar Neutrino Experiment BOREXINO. J. Radioanal. Nucl. Chem. **216** (2) (1997), 293–297

Goldbrunner, T. et al.: Spectroscopy of Solar Neutrinos with BOREXINO. In: High Energy Physics HEP97. Proc., Jerusalem, Israel, August 19–26 1997

Goldbrunner, T. et al.: Ultrasensitive Determination of U, Th, K in Liquid Organic Scintillators. In: Methods and Applications of Radioanalytical Chemistry Marc IV. Proc. Conf., Hawaii. J. Radioanal. Nucl. Chem. **234** (1) (1998), 43–50

Grieb, C.: Diplomarbeit, Technische Universität München, 2000

Hagner, C.: Low Energy Neutrino Astronomy – Solar Neutrino. In: Physics at Cosmic Accelerators. Proc., Burg Liebenzell, Germany, April 1–5 1998

- Hagner, T., R. v. Hentig, B. Heisinger, L. Oberauer, S. Schönert, F. v. Feilitzsch, E. Nolte: Muon induced Production of Radioactive Isotopes in Scintillation Detectors. *J. Astroparticle Phys.* (2000), akzeptiert
- Lachenmaier, T.: Proceedings of the XIth International School: Particles and Cosmology, Baksan Valley, Russia, April 18-24, 2001, in print
- Neff, M.: Untersuchungen zum Untergrund durch Radioaktivität und kosmische Strahlung in dem solaren Neutrinoexperiment BOREXINO. Diplomarbeit, Technische Universität München, 1996
- Oberauer, L.: Neutrino Masses. In: Topics in Astroparticle and Underground Physics TAUP 97. Proc., Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italy, September 7–11 1997
- Oberauer, L.: BOREXINO. In: Neutrino Astrophysics. Proc. SFB Workshop at Ringberg Castle, October 20–24 1997
- Oberauer, L.: Status of Astrophysical Neutrino Experiments and Prospects. In: Gross Properties of Nuclei and Nuclear Excitations. Proc. Int. Workshop XXVI. Hirschegg, Austria, January 11–17 1998
- Oberauer, L.: Neues aus der Astro-Teilchen-Physik. In: Hadronen und Kerne. Plenarvortrag, DPG-Frühjahrstagung Bochum, März 1998
- Oberauer, L.: Future Solar Neutrino Experiments. In: Ringberg Euroconference: New Trends in Neutrino Physics. Proc., Ringberg Castle, Tegernsee, May 24–29 1998
- Oberauer, L.: Status of the BOREXINO Solar Neutrino Experiment. In: Neutrino98. Proc., Takayama, Japan, June 4–9 1998. *Nucl. Phys. (Proc. Suppl.)* **B 77** (1999), 48–54
- Oberauer, L., S. Schönert: Status Report on the Muon Identification System Internal Report (1998)
- Raghavan, R.S., S. Schönert: Antineutrinos in Borexino from the Earth and the Sun: New relevance for Geophysics, Neutrino Physics and Astrophysics. *Bell Labs Tech. Memo.* 11172-970829-20 (1997)
- Raghavan, R.S., S. Schönert et al.: Measuring the Global Radioactivity in the Earth by Multidetector Antineutrino Spectroscopy. *Phys. Rev., Lett.* **80** (1998) (3), 635–638
- Riedel, T.: Spektroskopische Untersuchungen der Reinheit verwendeter Materialien im Sonnenneutrinoexperiment BOREXINO. Diplomarbeit, Technische Universität München, 1999
- Schnagl, J., M. Altmann, F. v. Feilitzsch, T. Lachenmaier, J.-C. Lanfranchi, M. L. Sarsa, S. Wänninger. *Nucl. Instr. Meth.* **A 444** (2000), 96
- Schnagl, J., G. Angloher, F. v. Feilitzsch, M. Huber, J. Jochum, J.-C. Lanfranchi, M. L. Sarsa, S. Wänninger. *Nucl. Instr. Meth.* **A 444** (2000), 245
- Schönert, S.: Probing the Solar MSW Large Mixing Angle Solution with Terrestrial Antineutrinos from European Nuclear Reactors with BOREXINO. In: Topics in Astroparticle and Underground Physics TAUP97. Proc., Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italy, September 7–11 1997
- Schönert, S.: In: XXXIIIrd Rencontres de Moriond. Proc., Les Arcs, France, March 14–21 1998
- Seidl, H.: Developments for the Muon Vetoes for Borexino and the CTF II. Diplomarbeit, Technische Universität München, 2000
- v. Feilitzsch, F. for the BOREXINO-Collaboration: Solar Neutrino Spectroscopy with BOREXINO and Recent Results from the CTF Experiment. In: 4th International Solar Neutrino Conference. Proc., Heidelberg, April 1997
- v. Feilitzsch, F.: The BOREXINO Solar Neutrino Experiment. In: Neutrinos in Astro, Particle and Nuclear Physics. Int. School of Nuclear Physics, 19th Course. Erice, Italy, 16–24 September 1997

- v. Hentig, R.: Spurenanalyse primordialer Radionuklide für das solare Neutrinoexperiment BOREXINO. Doktorarbeit, Technische Universität München, 1999
- v. Hentig, R. et al.: Determination of Naturally Occurring Radionuclides in Ultrapure Organic Liquids. *Fres. J. Anal. Chem.* **360** (6) (1998), 664
- v. Hentig, R. et al.: Records in Ultra Low Radioactivity Measurements with Neutron Activation Analysis. In: *Advanced Technology and Particle Physics. Proc. Int. Conf., Como, Italy, October 5–8 1998.* *Nucl. Phys. (Proc. Suppl.)* **B 78** (1999), 115–119
- v. Hentig, R. et al.: Determination of Radioactive Trace Elements in Ultra Low Background Detectors by Means of Neutron Activation Analysis. *Czech. J. Phys.*, **49** Suppl. S1 (1999), 277–286
- v. Hentig, R. for the BOREXINO-Collaboration: Determination of Background Sources in BOREXINO. In: *Particles and Cosmology. Proc. 9th Int. School, Baksan, 1997*
- Wänninger, S., M. Altmann, G. Angloher, P. Hettl, J. Hoehne, J. Jochum, F. Pröbst, M. L. Sarsa, J. Schnagl, W. Seidel, F. v. Feilitzsch, R. L. Mössbauer: *Nucl. Instr. Meth.* **A 439** (2000), 662

Franz von Feilitzsch

