

GEORG-SIMON-OHM-PREIS

# Dünne Filme für Dunkle Materie

Supraleitende Detektoren sollen Teilchen der Dunklen Materie nachweisen.

Karoline Schäffner

Die Frage nach der Dunklen Materie ist eines der größten Rätsel der Physik. Das CRESST-Experiment versucht mit Hilfe von Tieftemperaturdetektoren, Teilchen der Dunklen Materie nachzuweisen. Dafür wurde eine Methode entwickelt, mit der sich dünne supra-leitende Filme, welche in den Teilchendetektoren als Thermometer eingesetzt werden, orts aufgelöst charakterisieren lassen.

Nach heutigen Erkenntnissen entstand das Universum vor rund 13,7 Milliarden Jahren mit dem Urknall. Seit diesem Zeitpunkt dehnt sich der Kosmos aus und kühlt ab. 300 000 Jahre nach dem Urknall entkoppelten sich elektromagnetische Strahlung und Materie, sodass das Universum transparent wurde. Erst als die Temperatur unter 3000 K gesunken war, konnten sich stabile Atome bilden. Schließlich formten sich vor etwa zehn Milliarden Jahren Sterne und Galaxien.

Anhand der bislang zusammengetragenen astronomischen Messdaten, insbesondere zur Bewegung von Sternen und Galaxien und zur kosmischen Hintergrundstrahlung, lässt sich heute eine Aussage über die Menge der im Weltall vorhandenen Materie machen [1]. Insbesondere gibt es deutliche Hinweise darauf, dass es mehr Materie gibt, als nur die für uns sichtbare baryonische. Die fehlende Materie wird als Dunkle Materie bezeichnet, da sie nicht der elektromagnetischen Wechselwirkung unterliegt, d. h. kein Licht emittiert oder absorbiert. Die Suche nach ihr ist heute eine der interessantesten und drängendsten Fragen in Astroteilchenphysik und Kosmologie.

In welcher Form die Dunkle Materie vorliegt, ist bis heute unklar. Ein favorisierter Kandidat dafür sind so genannte WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) [2]. WIMP steht hierbei für ein hypothetisches, schwach wechselwirkendes und massereiches Teilchen, welches aber nicht durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben wird. Treffen WIMPs auf herkömmliche Materie, so können sie an Atomkernen des jeweiligen Targets elastisch streuen, ähnlich dem Aufeinanderprallen zweier Billardkugeln. Dabei werden jedoch nur sehr kleine Energien im Bereich von wenigen 10 keV übertragen. Nachdem die erwartete Wechselwirkungsrate von WIMPs mit gewöhnlicher Materie vermutlich sehr klein ist (sehr viel weniger als ein Ereignis pro Tag und Kilogramm Detektormasse), gilt es, das Untergrundrauschen so gering wie möglich



Ein Blick auf das Herzstück des CRESST-Experiments. Zu sehen ist das „Karussell“, in dem die Detektor-Module montiert sind.

zu halten. Deshalb werden zum direkten Nachweis der Dunklen Materie sehr empfindliche und gut abgeschirmte Detektoren benötigt.

Ziel des deutsch-britisch-italienischen Experiments CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers) ist es, WIMPs mit Hilfe von Tieftemperaturdetektoren direkt durch deren Streuung an den Kernen eines Targetkristalls nachzuweisen. Das Experiment ist im Untergrundlabor Gran Sasso in Italien aufgebaut. Ein CRESST-Detektor besteht aus einem Absorber und einem Thermometer. Streut ein WIMP an einem Atomkern des Absorbers, so deponiert es Energie in Form von Gitterschwingungen. Diese Pho-

## KOMPAKT

- Das CRESST-Experiment versucht, sog. WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) nachzuweisen, indem die von einem WIMP in einem Detektorkristall deponierte Energie gemessen wird.
- Eine induktive kontaktlose Messmethode ermöglicht es, die Sprungtemperatur der als Thermometer eingesetzten dünnen Wolfram-Schichten orts aufgelöst zu messen.
- Die Methode beruht darauf, dass sich beim Abkühlen unter die Sprungtemperatur die magnetische Permeabilität der Schicht ändert und damit auch die Induktivität einer Testspule.

Dipl.-Ing. (FH) Karoline Schäffner, Max-Planck-Institut für Physik, Föhringer Ring 6, 80805 München – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Georg-Simon-Ohm-Preises 2008 auf der 72. Jahrestagung der DPG in Berlin.

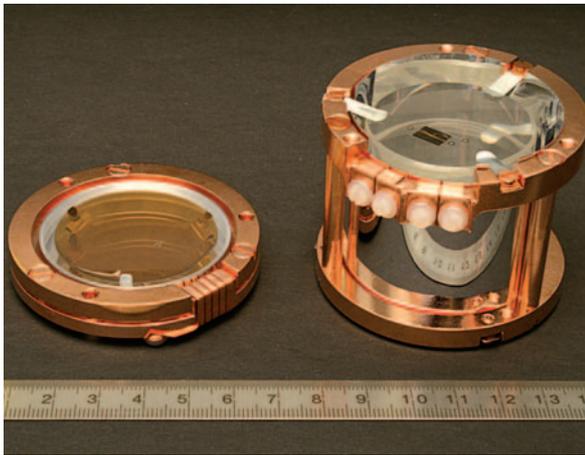


Abb. 1 Kalziumwolframat-Absorberkristall mit Wolframfilm als Thermometer in seiner Halterung (links) und Lichtdetektor zum Nachweis des Szintillationslichtes (rechts).

nenen gelangen zum Thermometer und werden dort als Temperaturerhöhung registriert, d. h. umgekehrt lässt sich von der Temperaturänderung im Thermometer auf eine Teilchenwechselwirkung schließen. Als Absorber werden bei CRESST bis zu 33 Kalziumwolframat-Kristalle ( $\text{CaWO}_4$ ) mit einer Masse von je 300 Gramm verwendet.

Das Messprinzip hört sich zunächst sehr einfach an, die Schwierigkeit besteht aber darin, dass nicht nur die hypothetischen WIMPs im Absorber wechselwirken können, sondern auch jedes andere Teilchen. Dazu zählen hauptsächlich die Komponenten der kosmischen Strahlung, Zerfallsprodukte aus den natürlichen radioaktiven Zerfallsreihen sowie freie Neutronen.

Neben der passiven Abschirmung müssen zur weiteren Unterdrückung von Störsignalen die noch verbleibenden, wechselwirkenden Teilchen voneinander unterschieden werden. Dazu nutzt CRESST die Szintillationseigenschaften der Kalziumwolframat-Absorberkristalle, denn bei Teilchenstößen in diesen Kristallen werden nicht nur Phononen, sondern auch Photonen, also Licht erzeugt. Ein zweiter Tieftemperaturdetektor, welcher für den Nachweis von Photonen optimiert worden ist, detektiert dieses Szintillationslicht. Die Menge an Szintillationslicht hängt von der Art des wechselwirkenden Teilchens ab. So lassen sich die wechselwirkenden Teilchen anhand des Verhältnisses von Temperatur- und Lichtsignal identifizieren und unterscheiden (Abb. 1) [3]. Die Lichtdetektoren erlauben es, selbst nur wenige Photonen nachzuweisen. Ein weiterer und wesentlicher Vorteil dieser Teilchendetektoren ist ihre niedrige Energieschwelle.

## Supraleitend wie im Film

Supraleitende Phasenübergangsthermometer lesen die Absorber der Detektoren aus. Als Thermometermaterial lässt sich Wolfram verwenden, welches als dünner Metallfilm direkt auf den Absorber aufgebracht wird. Die Wolframfilme dieser sehr empfindlichen Thermo-

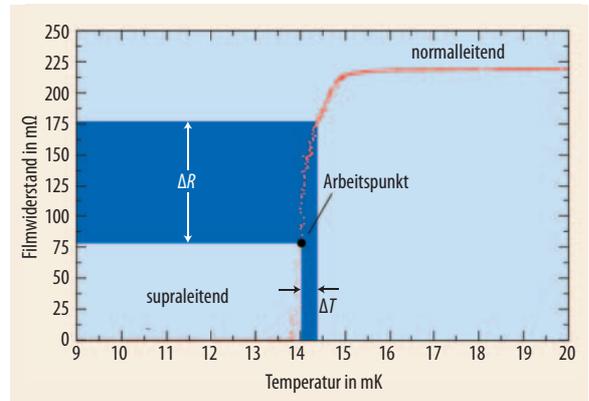


Abb. 2 Der temperaturabhängige Widerstand (rot) eines Wolframfilms zeigt, wie eine kleine Temperaturänderung  $\Delta T$  zu einem merklichen Anstieg des Widerstandes  $\Delta R$  führt, wenn das Thermometer am Phasenübergang zur Supraleitung betrieben wird.

meter werden in speziellen Aufdampfungen erzeugt und durch lithographische Prozesse in die gewünschte Struktur gebracht. Die Sprungtemperatur  $T_c$  von einkristallinem Wolfram liegt bei 15 mK [4]. Bei dünnen Filmen kann die Sprungtemperatur jedoch variieren, und der Übergang besitzt eine endliche Breite in Bezug auf die Temperatur.

Wird das Thermometer am Phasenübergang zwischen normal- und supraleitendem Zustand betrieben, führt eine kleine Änderung der Temperatur  $\Delta T$ , hervorgerufen durch eine Teilchenwechselwirkung im Absorberkristall, zu einer großen Änderung  $\Delta R$  des elektrischen Filmwiderstandes (Abb. 2). Diese Widerstandsänderung ist mit geeigneter Ausleselektronik messbar.

Die Ausprägung der Supraleitung in den Wolframfilmen ist essenziell für den Betrieb der Detektoren. Nach Schwierigkeiten bei der reproduzierbaren Herstellung supraleitender Wolframfilme war eine neue Methode erwünscht, um diese Filme besser charakterisieren zu können.

Gewöhnlich werden zunächst die noch unstrukturierten Wolframfilme (Durchmesser 30 mm; Dicke 200 nm) auf Supraleitfähigkeit überprüft. Dazu wird der Wolframfilm an zwei Punkten elektrisch kontaktiert, und bei einem Strom von wenigen Mikro-Ampere wird die Widerstandsänderung des Wolframfilms beim Abkühlen in einem  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ -Entmischungskryostaten aufgezeichnet. Mit solchen Anlagen lassen sich Temperaturen bis circa 6 mK erreichen. Diese resistive Messmethode bestimmt die Übergangstemperatur aber integral über den gesamten Film. Das heißt, sobald der erste durchgehende supraleitende Pfad im Film existiert, fällt der Filmwiderstand auf Null ab, obwohl es im Film noch Bereiche geben kann, die normalleitend sind. Somit lässt sich keine Aussage über die Verteilung der supraleitenden Bereiche im Film treffen. Die Supraleitung wird unter Umständen nur von einem kleinen Bereich im Film getragen.

## Induktiv vermessen

Zur Untersuchung möglicher Inhomogenitäten in der Verteilung der Sprungtemperatur  $T_c$  über den Film eignet sich eine neue Methode zur lokalen Messung der Sprungtemperatur [5]. Diese beruht auf einem induktiven und damit berührungslosen Messprinzip. Dazu wird eine geometrisch kleine Spule (Durchmesser 1,8 mm) über einem Wolframfilm platziert und mit Wechselstrom gespeist. Die Induktivität der kurzen Zylinderspule hängt von mehreren Faktoren ab, unter anderem von der relativen Permeabilität  $\mu_r$  des die Spule umgebenden Materials. Wolfram ist unter Normalbedingungen paramagnetisch ( $\mu_r > 1$ ). Für Temperaturen  $T < T_c$  befindet sich Wolfram in der supraleitenden Phase und verhält sich nach dem Meißner-Ochsenfeld-Effekt wie ein perfekter Diamagnet ( $\mu_r < 1$ ) [6].

Befindet sich Wolfram im Feld einer Spule, so ändert sich beim Übergang zwischen Normal- und Supraleitung aufgrund der Änderung der Permeabilität des Wolframfilms auch die Induktivität der Spule. Daher ist es möglich, die Sprungtemperatur zu bestimmen, indem man die Änderung der Spuleninduktivität als Funktion der Temperatur misst.

Im Experiment wurde zunächst eine kleine, handgewickelte Zylinderspule über einem massiven Wolfram-Einkristall platziert und der gesamte Experimentaufbau abgekühlt. Zur Messung der kleinen Induktivitätsänderungen der Spule wird ein SQUID-Magnetometer (Superconducting Quantum Interference Device) und ein Lock-in-Verstärker verwendet. SQUIDs sind geeignete Instrumente zur Messung kleiner magnetischer Feldänderungen. Die Spule zur  $T_c$ -Bestimmung befindet sich dabei in einer Parallelschaltung mit einer so genannten SQUID-Einkoppelspule. Wird der Wolframfilm supraleitend, ändert sich die Induktivität der Mess-Spule und damit deren Wechselstromimpedanz. Dies führt zu einer Änderung des Verzweungsverhältnisses der Ströme im Parallelkreis und somit zu einer Änderung des durch die Einkoppelspule im SQUID erzeugten magnetischen Flusses. Wird der

magnetische Fluss, der den SQUID durchsetzt, kleiner, dann verändert sich damit auch die Ausgangsspannung des SQUIDs. Das Ausgangssignal wird mit einer nachgeschalteten Ausleseelektronik und einem PC ausgewertet.

Abb. 3 zeigt die qualitative Änderung der Induktivität der Spule über die Temperatur des Wolfram-Einkristalls. Die Sprungtemperatur dieses Wolfram-Festkörpers liegt gemäß der Messung bei etwa 11,5 mK. Diese Messung zeigt, dass in Abhängigkeit von der geometrischen Größe der Spule die induktive Methode zur lokalen Messung von  $T_c$  funktioniert. Es ist anzumerken, dass die induktive Methode eine nur rein qualitative Aussage über den Verlauf der Permeabilitätsänderung des Wolframs geben kann und keine Absolut-Messung ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden anschließend Wolframfilme an verschiedenen Stellen vermessen. Abb. 4 zeigt eine Messung der lokalen Sprungtemperatur eines Wolframfilms. Trotz der geringen Dicke der Wolframfilme (200 nm) ist es möglich, die Sprungtemperatur mit dieser Methode zu bestimmen. Die durchgeführten Messungen zeigen eine nachweisbare Ortsabhängigkeit der Sprungtemperatur in den untersuchten Filmen. Zur weiteren Optimierung dieser induktiven Messung wurden planare Spulen mit Hilfe photolithographischer Techniken hergestellt. Die ersten Messungen zeigen deutliche Verbesserungen in Bezug auf die Signalstärke, die Reproduzierbarkeit und den Einsatzbereich dieser Methode.

## Eine Frage der Positionierung

Bis zu diesem Zeitpunkt wurde die Spule jeweils über einer ausgewählten Stelle des Films platziert und dann in einem Entmischungskryostaten abgekühlt. Um jedoch fundierte Aussagen über die Ursachen für mögliche Variationen von  $T_c$  über den Film machen zu können, benötigt man sequenzielle Messungen über den gesamten Film. Dies ist mit der oben beschriebenen Vorgehensweise sehr zeit- und arbeitsintensiv.

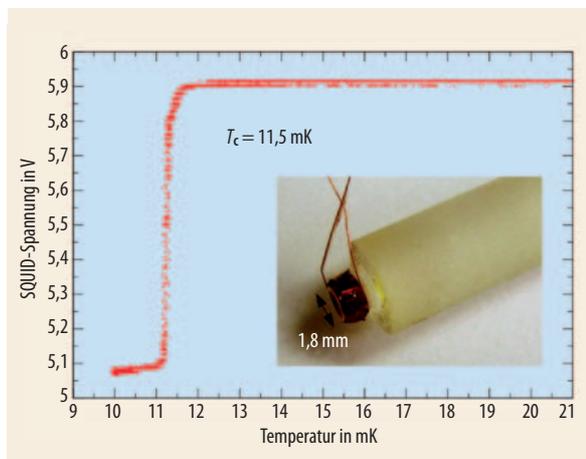


Abb. 3 Mit einer kleinen Spule lässt sich die Permeabilität eines Wolfram-Einkristalls abhängig von der Temperatur messen und damit seine Sprungtemperatur bestimmen.

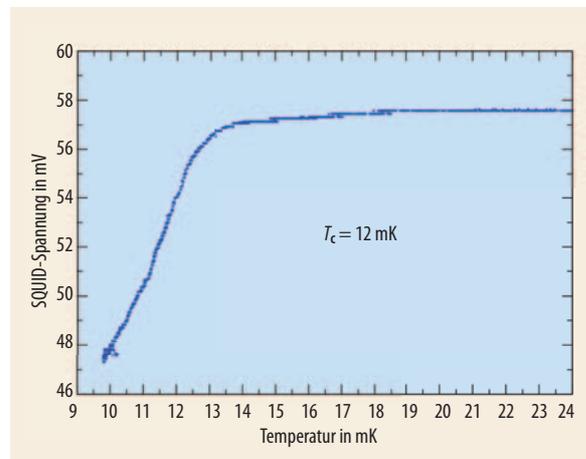


Abb. 4 Die in Abhängigkeit von der Temperatur gemessene Permeabilität zeigt, dass es möglich ist, die lokale Sprungtemperatur eines dünnen Wolframfilms zu bestimmen.

Zur vereinfachten und effizienteren Erstellung einer Kartografie der  $T_c$ -Verteilung bietet sich ein Positioniersystem an. Dieses sollte sich bei Temperaturen um 10 mK betreiben lassen, möglichst keine mechanischen Vibrationen erzeugen, und klein genug sein, um im Kryostaten montiert werden zu können. Zum Einsatz kommt ein Piezo-Positioniersystem (attocube systems), bei dem zwei lineare Piezo-Positionierer um  $90^\circ$  versetzt aufeinander montiert sind. Dies ist nötig, um Messpunkte in der XY-Ebene des Films anfahren zu können. Das Positioniersystem besitzt einen Gesamtverfahrweg von 15 mm und lässt sich in Schritten im Bereich von einigen hundert Nanometern bewegen. Die Spule (Durchmesser 2 mm) zum Abscannen des Wolframfilms ist direkt auf den Piezo-Positionierer montiert. Die Spule soll in Schritten im Bereich von etwa  $100\ \mu\text{m}$  über den Film bewegt werden und so die  $T_c$ -Verteilung kartografieren. Dieses System zur Untersuchung der Ortsabhängigkeit der Sprungtemperatur supraleitender Wolframfilme befindet sich derzeit im Aufbau.

\*

Bedanken möchte ich mich ganz herzlich bei Franz Pröbst, Wolfgang Seidel und Dieter Hauff sowie bei allen Mitgliedern der CRESST-Gruppe, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Herzlichen Dank für die sehr schöne und gewinnbringende Zeit am MPI.

## Literatur

- [1] L. Bergström und A. Goobar, *Cosmology and Particle Astrophysics*, 2. Aufl., Springer, Berlin (2006)
- [2] G. Jungmann, M. Kamionkowski und K. Griest, *Phys. Rep.* **267**, 195 (1996)
- [3] G. Angloher et al., *Astroparticle Physics* **23**, 325 (2005)
- [4] W. Buckel und R. Kleiner, *Supraleitung*, Wiley-VCH, Weinheim (2004)
- [5] K. Schäffner, Diplomarbeit, Fachhochschule München (2007)
- [6] W. Meißner und R. Ochsenfeld, *Naturwissenschaften* **21** (44), 787 (1933)

## DIE AUTORIN

### Karoline Schäffner

studierte Physikalische Technik an der Hochschule München (ehemals Fachhochschule) und der University of Queensland, Australien. Ein Praktikum am Max-Planck-Institut für Physik

in der Arbeitsgruppe CRESST und die darauffolgende Diplomarbeit weckten ihr Interesse für das wissenschaftliche und experimentelle Arbeiten in diesem Bereich. Derzeit besucht sie ergänzende Vorlesungen an der TU München, um anschließend vielleicht ihre Promotion im Rahmen des CRESST-Experiments beginnen zu können.



J. Röhl