

TIEFTEMPERATURPHYSIK

# Sie messen, was sie heiß macht

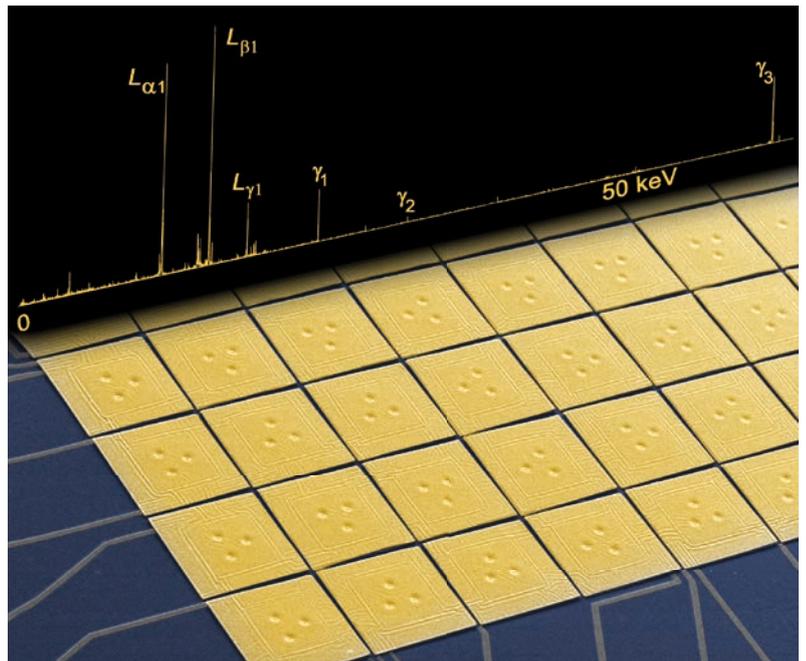
Magnetische Mikrokalorimeter etablieren sich als neue Schlüsseltechnologie.

Andreas Fleischmann, Loredana Gastaldo, Sebastian Kempf und Christian Enss

Das extrem hohe Auflösungsvermögen magnetischer Kalorimeter sowie ihre universelle Anwendbarkeit für Strahlung und Materie machen sie zu einzigartigen Werkzeugen in unterschiedlichsten Präzisionsexperimenten. Auf zahlreichen Gebieten, die von der Neutrinophysik über die Röntgenspektroskopie bis zur nuklearen Forensik reichen, gelang es bereits, ihr vielversprechendes Potenzial unter Beweis zu stellen.

Die Entwicklung bolometrischer und kalorimetrischer Tieftemperaturdetektoren ist seit jeher durch ein breites Spektrum an Anwendungen in der Grundlagenforschung motiviert: die Vermessung der kosmischen Hintergrundstrahlung, der direkte Nachweis Dunkler Materie, die Messung des Sonnenneutrinospektrums, die Röntgenastronomie und viele andere. Die daraus resultierende Detektortechnologie hat inzwischen in vielen Gebieten Einzug gehalten. Sie erobert zudem immer weitere Anwendungsfelder wie die Atom- und Schwerionenphysik, die nukleare Forensik, die Materialanalyse oder die Radiometrologie. Ohne Übertreibung kann man sagen, dass die Ära der kryogenen Mikrokalorimeter begonnen hat. Für bestimmte Experimente stellen sie heute eine Schlüsseltechnologie dar, da sie diverse Messungen überhaupt erst ermöglichen.

Mikrokalorimeter für die hochauflösende Röntgenspektroskopie schließen heute auf beeindruckende Weise die große Lücke zwischen Kristallspektrometern, die zwar ein exzellentes Auflösungsvermögen besitzen, aber auf einen kleinen Wellenlängenbereich eingeschränkt sind, und breitbandigen Ionisationsdetektoren, deren Auflösungsvermögen deutlich schlechter ist. Die derzeit führenden Mikrokalorimeter verwenden Temperatursensoren auf der Basis von supraleitenden Phasenübergangssensoren (TES), hochdotierten Halbleiter-Thermistoren (NTD) und metallischen Paramagneten (MMC) [1]. Die maßgeblich am Kirchhoff-Institut für Physik der Universität Heidelberg vorangetriebenen magnetischen Kalorimeter (MMC) zeichnen sich gegenüber TES- und NTD-basierten Detektoren insbesondere durch die einzigartige Kombination aus hoher Energieauflösung, kurzer Signalanstiegszeit und exzellenter Linearität aus. Des Weiteren stellt die zuverlässige Modellierbarkeit der Sensoreigenschaften und die damit verbundene Möglichkeit der analytischen Optimierung einen entscheidenden Vorteil dar, um



Koloriertes REM-Bild eines zweidimensionalen magnetischen Kalorimeter-Arrays für harte Röntgenstrahlung. Die einzelnen Pixel haben laterale Abmessungen

von 0,5 mm × 0,5 mm. Im Hintergrund ist das Ergebnis einer Messung mit einer <sup>241</sup>Am-Quelle zu sehen.

Detektoren für verschiedenste Teilchensorten und Energiebereiche zu entwickeln. Um die notwendigen Betriebstemperaturen von unter 50 mK zu erreichen, kommen trockene <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He-Verdünnungskryostate zum Einsatz, die sich ohne kryogene Flüssigkeiten vollautomatisiert quasi als Ein-Knopf-System betreiben lassen.

Das Funktionsprinzip magnetischer Kalorimeter beruht auf dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik (Abb. 1): Durch einen Energieeintrag in den Absorber erhöht sich die Detektortemperatur, die ein empfindliches Thermometer messen kann. Die thermische

## KOMPAKT

- Magnetische Mikrokalorimeter messen Strahlung und Teilchen mit extrem hohem Auflösungsvermögen.
- Die Anwendungsmöglichkeiten sind sehr vielfältig und reichen von der Röntgenspektroskopie über nukleare Forensik bis zur Neutrinophysik.
- Verschiedene neue Experimente haben die Anwendbarkeit dieser Detektortechnologie erfolgreich demonstriert.

Dr. Andreas Fleischmann, Jun.-Prof. Dr. Loredana Gastaldo, Dr. Sebastian Kempf und Prof. Dr. Christian Enss, Kirchhoff-Institut für Physik, Im Neuenheimer Feld 227, 69120 Heidelberg

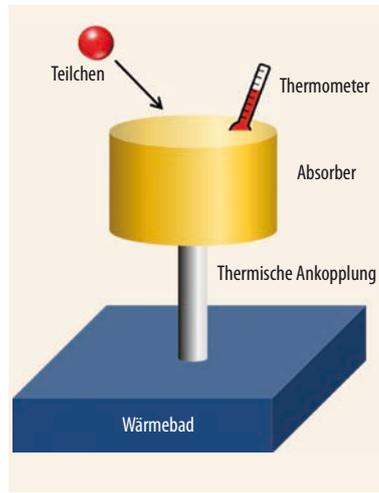


Abb. 1 Ein Kalorimeter besteht aus einem Absorber, der thermisch an ein Wärmebad gekoppelt ist.

Kopplung an ein Wärmebad ermöglicht die Thermalisierung des Detektors. Als Thermometer dient ein metallischer Paramagnet, z. B. eine Legierung aus Gold mit einigen hundert ppm Erbium, die in einem schwachen äußeren Magnetfeld eine temperaturabhängige Magnetisierung gemäß dem Curie-Gesetz zeigt. Die Anstiegszeit  $\tau_0$  des Detektorsignals ist durch die Relaxationszeit der magnetischen Momente bestimmt, wobei die Relaxation über Leitungselektronen erfolgt. Sie nimmt bei den typischen Betriebstemperaturen von unter 50 mK Werte unter 100 ns an (Abb. 2a). Die Abfallszeit  $\tau_1$  des Detektorsignals ist über die thermische Kopplung zum Wärmebad in weiten Bereichen einstellbar. Sie liegt meist bei etwa einer Millisekunde.

Thermodynamisch lässt sich ein magnetisches Kalorimeter als kanonisches Ensemble mit zwei Subsystemen (Absorber und Sensor mit Wärmekapazitäten  $C_{\text{abs}}$  und  $C_{\text{sens}}$ ) modellieren. Thermodynamische Energiefluktuationen zwischen den Subsystemen und dem Wärmebad bestimmen die fundamentale Grenze der

Energieauflösung  $\Delta E_{\text{FWHM}}$ . Für ein optimiertes magnetisches Kalorimeter mit  $C_{\text{abs}} = C_{\text{sens}}$  folgt:

$$\Delta E_{\text{FWHM}} = 2,35 \sqrt{8 k_B C_{\text{abs}} T^2 \left( \frac{\tau_0}{\tau_1} \right)^{1/4}}. \quad (1)$$

Für einen Detektor, der bei 20 mK betrieben wird und einen Röntgenabsorber aus Gold von  $250 \times 250 \times 5 \mu\text{m}^3$  besitzt, liegt dieses Limit deutlich unter 1 eV.

Die vielfältigen Anwendungen stellen mitunter sehr unterschiedliche Anforderungen an die Detektoren. Abhängig vom speziellen Anwendungsfall sind Quanteneffizienz, Energieauflösung, Linearität und Zeitauflösung nicht unabhängig voneinander zu optimieren. Als ein Beispiel möchten wir die Leistungsfähigkeit von Detektoren diskutieren, die optimiert sind für weiche Röntgenstrahlung. Mit Hilfe eines planar aufgebauten magnetischen Kalorimeters (Infokasten) und einer externen  $^{55}\text{Fe}$ -Quelle lässt sich der spektrale Verlauf der  $K_{\alpha}$ -Linie von  $^{55}\text{Mn}$  so gut messen, dass die Feinaufspaltung der Linie zu erkennen ist (Abb. 2b). Basierend auf der bekannten natürlichen Linienform leitet sich für den Detektor eine Energieauflösung von  $\Delta E_{\text{FWHM}} = 1,58 \text{ eV}$  ab, was weltweit führend für energiedispersive Detektoren bei dieser Energie ist. Gleichzeitig weicht das Signal nur sehr gering von einer perfekt linearen Antwortfunktion ab. Bei 6 keV beträgt die Abweichung nur etwa 1,2 Prozent (Abb. 2c). So ermöglichen magnetische Kalorimeter Kombinationen aus Energieauflösung, Geschwindigkeit und Linearität, die kein anderes Detektorkonzept auch nur annähernd erreicht.

### Hochpräzise Röntgenspektren

Für kryogene Mikrokalorimeter ist die Untersuchung des strukturellen Aufbaus und der Streudynamik von

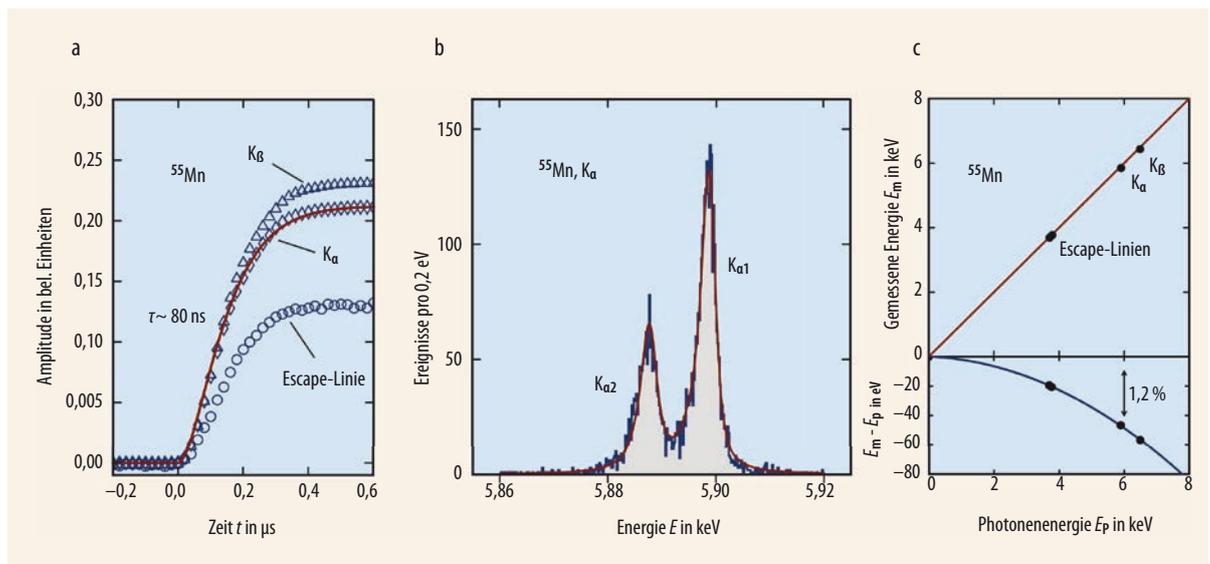


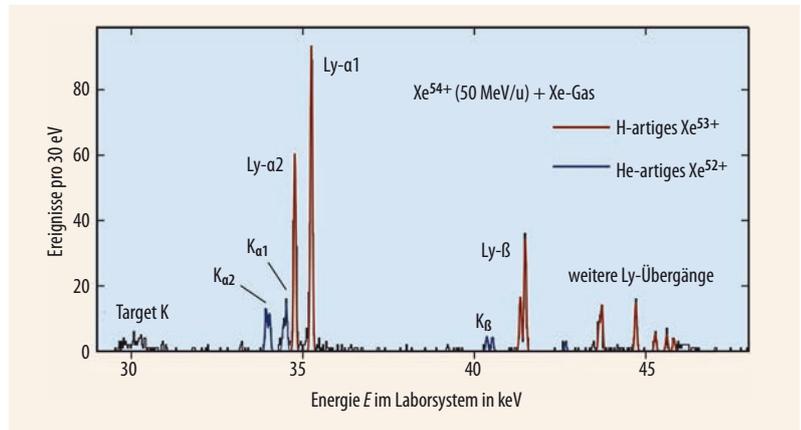
Abb. 2 Der Signalanstieg für drei Ereignisse mit verschiedenen Energien (blau, a): Im Vergleich dazu ist ein exponentieller Anstieg mit einer Zeitkonstante von 80 ns gezeigt (rot). Das gemessene Spektrum der  $K_{\alpha}$ -Linie (blau, b) stimmt gut

mit der natürlichen Linienform (grau hinterlegt) und der erwarteten Linienform für einen Detektor mit einer Energieauflösung von 1,58 eV (rot) überein. Gemessene Energie  $E_m$  (oben, c) und Abweichung vom linearen Verhalten  $E_m - E_p$

(unten) sind als Funktion der Energie für vier Linien (●) im Vergleich zu einem ideal linearen Detektor (rot) gezeigt. Der nichtlineare Anteil ist vollständig mit einer quadratischen Funktion zu beschreiben (blau).

hochgeladenen Ionen mit hoher Kernladungszahl  $Z$  [4] ein besonders interessantes Anwendungsfeld, da sie die Vorteile von Kristallspektrometern und Ionisationsdetektoren vereinen und damit neue Perspektiven für derartige Experimente eröffnen. Ziel dabei ist es, relativistische und quantenelektrodynamische Effekte bei starken Zentralfeldern mit hoher Präzision zu vermessen. Solche Experimente finden sowohl an Speicherringen wie dem Experimental Storage Ring (ESR) bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt statt als auch an Electron Beam Ion Trap-Anlagen.

Als ein Beispiel wollen wir eine Messung am ESR mit einem gespeicherten  $\text{Xe}^{54+}$ -Strahl diskutieren. An einer Stelle im Ring, dem internen Gas-Jet-Target, kann der Ionenstrahl mit neutralem Xenongas wechselwirken. Die dabei entstehenden Röntgenphotonen werden in den vollen Raumwinkel abgestrahlt und lassen sich durch ein kleines Röntgenfenster aus Diamant beobachten. Etwa zwei Meter entfernt von der Wechselwirkungszone außerhalb der Kammer war in dem Experiment ein magnetisches Kalorimeter positioniert, das sich am Ende des Auslegers eines Kryostaten hinter einem Röntgenfenster aus Beryllium befand. Der Röntgenabsorber des Kalorimeters, der für harte Röntgenstrahlung ausgelegt ist, besteht aus Gold mit den Abmessungen  $2 \times 0,5 \times 0,2 \text{ mm}^3$  und hat für Photonen im Bereich von 30 keV eine Quanteneffizienz von über 90 Prozent. Aufgrund der damit verbundenen großen Wärmekapazität des Absorbers besitzt das Kalorimeter unter optimalen Bedingungen eine energieunabhängige Energieauflösung von 30 eV. Trotz des kleinen Raumwinkels, den der Detektor aufgrund der großen Entfernung zur Wechselwirkungszone abdeckt, gelang es innerhalb von 48 Stunden, ein



aussagekräftiges Spektrum aufzunehmen (Abb. 3). Bei Energien um 35 keV zeigen sich Doppler-verschobene Ly- $\alpha$ 1- und Ly- $\alpha$ 2-Linien, die von wasserstoffartigen  $\text{Xe}^{53+}$ -Ionen des gespeicherten Strahls nach Rekombinationsprozessen emittiert werden. Zwischen 40 und 47 keV sind Linien von Übergängen höherer Ordnung sichtbar sowie die Feinaufspaltung der Ly- $\beta$ -Linie von 140 eV. Zudem wurden Übergänge von heliumartigem  $\text{Xe}^{52+}$  beobachtet (Abb. 3).

Für zukünftige Präzisionsexperimente wird aktuell ein neuer Detektor aufgebaut (Abb. auf Seite 27). Dabei handelt es sich um ein zweidimensionales Array mit 64 Pixeln, einer aktiven Gesamtfläche von  $16 \text{ mm}^2$  und einer Energieauflösung von etwa 5 eV. Für Photonen um 30 keV liegt die Quanteneffizienz bei über 80 Prozent. Mit diesem Detektor sollte es z. B. bald möglich sein, die Lamb-Verschiebung in hochgeladenen Ionen mit hoher Präzision zu messen und Quantenelektrodynamik in extremen Feldern auf bisher unerreichtem Niveau zu untersuchen.

Abb. 3 Ausschnitt aus dem Röntgenspektrum, das aus Streuprozessen von  $\text{Xe}^{54+}$ -Ionen mit Xenongas resultierte.

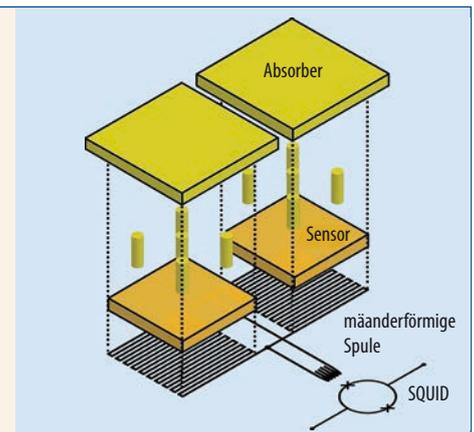
### MODERNE MAGNETISCHE KALORIMETER

Moderne magnetische Kalorimeter sind weit aus anspruchsvoller aufgebaut, als das einfache Grundprinzip (Abb. 1) erwarten lässt. Vom ersten Vorschlag 1993 [2] hat es daher mehr als 20 Jahre gedauert, dieses Messverfahren zu einer vielfältig einsetzbaren Detektortechnologie zu machen. Besonders herausfordernd war es, das Sensormaterial und die Detektorgeometrie zu modellieren und zu optimieren sowie maßgeschneiderte Herstellungsverfahren basierend auf der Mikrosystemtechnik zu entwickeln. Die heutigen magnetischen Kalorimeter sind vollständig mikrostrukturiert, wobei die Schichtdicken von wenigen Nanometern bis zu einigen hundert Mikrometern reichen und bis zu 20 aufeinander folgende Lagen verschiedenster Materialien besitzen.

Um eine gute Kopplung zwischen den magnetischen Momenten im Sensormaterial und der Detektionsspule zu erreichen, kommt meist eine planare Detektorgeometrie zum Einsatz (Abb.). Typischerweise werden zwei mit Sensoren abgedeckte Detektionsspulen parallel zur Einkoppelspule eines SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) ge-

schaltet, das als empfindlicher Fluss-zu-Spannungswandler dient. Der resultierende Schaltkreis stellt einen supraleitenden Flusstransformator dar. Aufgrund der Flussershaltung in geschlossenen supraleitenden Strukturen induziert eine Änderung der Sensormagnetisierung einen Abschirmstrom im Flusstransformator. Dieser fließt zu einem gewissen Teil durch die Einkoppelspule des SQUIDs und führt dort zu einer magnetischen Flussänderung, die im SQUID in ein messbares Spannungssignal übersetzt wird. Durch die parallele, gradiometrische Verschaltung zweier Detektionsspulen lassen sich zwei Temperatursensoren mit nur einem SQUID auslesen. Die Signale der beiden Sensoren sind anhand ihrer Polarität zu unterscheiden.

Diese Geometrie erlaubt es zudem, das für die Ausrichtung der magnetischen Momente im Sensor notwendige Magnetfeld durch einen Dauerstrom in den Detektionsspulen zu erzeugen. Die gradiometrische Verschaltung beider Spulen reduziert sehr effizient die Sensitivität auf magnetische Hintergrundfelder sowie Variationen der Chiptemperatur. Um



Explosionszeichnung eines magnetischen Kalorimeters mit zwei gradiometrisch verschalteten, mäandrierenden Detektionsspulen.

den Verlust athermischer Phononen ins Substrat zu minimieren, wird die Verbindung zwischen Sensor und Absorber nicht vollflächig ausgeführt, sondern auf wenige kleine zylinderförmige Strukturen reduziert.

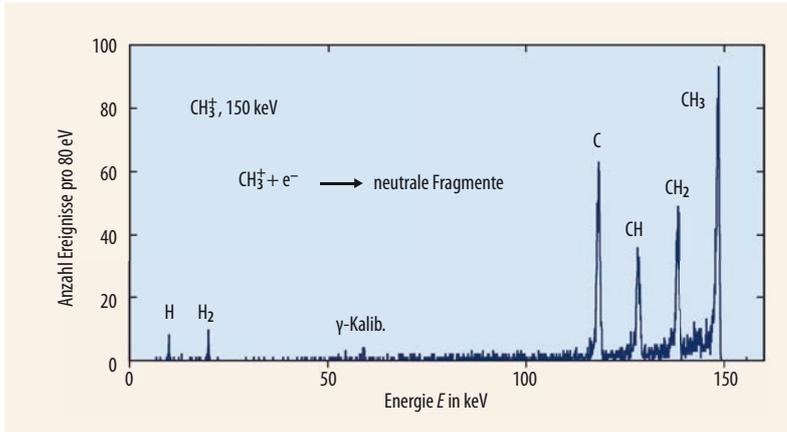


Abb. 4 Das Spektrum einer Messung, bei der  $\text{CH}_3^+$ -Ionen mit einer Energie von 150 keV mit Restgasteilchen in einem Ionenbeschleuniger reagiert haben, zeigt

die entstandenen neutralen Fragmente, die mittels eines magnetischen Kalorimeters nachgewiesen wurden [6].

### Chemie interstellarer Wolken unter der Lupe

Magnetische Kalorimeter eignen sich auch für Kollisionsexperimente in Speicherringen, um die Wechselwirkungsdynamik von Elektronen mit Molekülonen aufzuklären. Diese Anwendung hat allerdings ganz eigene Anforderungen. Durch die Wahl der experimentellen Bedingungen lassen sich verschiedenste Situationen präparieren und detaillierte Erkenntnisse über den Ablauf chemischer Prozesse gewinnen. Der kryogene Speicherring CSR am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg bietet hierfür eine weltweit einzigartige Umgebung. Seine Arbeitstemperatur von unter 10 K ermöglicht es, unterschiedlichste Molekülonen bei Energien bis 300 keV im Vibrations- und Rotationsgrundzustand zu speichern. Folglich ist es möglich, elementare chemische Reaktionen, wie sie etwa in kalten interstellaren Plasmen ablaufen, unter genau vorgegebenen Bedingungen zu untersuchen.

Um die Reaktionskinematik zu bestimmen, ist es erforderlich, die Energien und Impulse der Molekülfragmente zu messen, die bei den Prozessen auftreten. Aufgrund der niedrigen Speicherenergie eignen sich am

CSR die konventionell dafür verwendeten Halbleiterdetektoren allerdings nicht, da die Fragmente die Totschicht dieser Detektoren nicht durchdringen können. Ein Demonstrationsexperiment, in dem  $\text{CH}_3^+$ -Ionen mit Restgasteilchen in einem Ionenbeschleuniger reagiert haben, zeigte, dass sich magnetische Kalorimeter sehr gut für massenspektrometrische Anwendungen eignen (Abb. 4) [6]. Im Spektrum sind deutliche Linien bei Energien zu erkennen, die sich mit den erwarteten Verhältnissen der Massen möglicher Fragmente zur Masse des  $\text{CH}_3^+$ -Ions sehr gut decken. Die Messung zeigt außerdem, dass eine Massenauflösung von 1 u problemlos möglich ist.

Aufgrund dieser positiven Ergebnisse wird derzeit der orts- und energieauflösende Detektor MOCCA (Molecular Camera Array) mit 4096 Pixeln und einer sensitiven Fläche von  $44,8 \times 44,8 \text{ mm}^2$  aufgebaut (Abb. 5). Er soll es künftig erlauben, die Kinematik der im CSR auftretenden Reaktionen zu bestimmen. Dieser hochsegmentierte Detektor besteht aus 1024 einzelnen magnetischen Kalorimetern, an deren Temperatursensor je vier Teilchenabsorber unterschiedlich stark gekoppelt sind. Damit lassen sich Ereignisse, die in den verschiedenen Absorbern stattfinden, anhand der Signalanstiegszeiten unterscheiden. Zudem werden für alle Zeilen bzw. Spalten die summierten Temperatursignale aller enthaltenen Sensoren mit einem SQUID ausgelesen. Dieses neuartige Verfahren erlaubt es, alle 1024 MMCs mit nur 32 SQUID-Kanälen auszulesen. Die Fertigstellung und Installation des Detektors im CSR zusammen mit einem trockenen  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verdünnungskryostaten ist für 2017 geplant.

### Kernbrennstoffe im Visier

Ihr sehr gutes Auflösungsvermögen sowie ihre große Energiebandbreite führen dazu, dass sich magnetische Kalorimeter sehr gut dazu eignen, nuklearen Brennstoff zu überwachen. Aktuell erfolgt die dafür nötige Analyse der Isotopen-Zusammensetzung einer Brennstoff-Probe entweder mit destruktiven Methoden in Form von chemischer Separation mit anschließender Massenspektrometrie oder mit nicht-destruktiven Methoden auf Basis von Gammaskopie mittels Halbleiter-Detektoren. Die chemische Aufbereitung ist sehr präzise, aber auch sehr zeitraubend und kann mit der anschließenden Massenspektrometrie bis zu Monaten dauern. Die Gammaskopie ist weit weniger aufwändig und weniger kostenintensiv, dafür aber deutlich weniger präzise. Nichtsdestotrotz wird sie in der Regel bevorzugt.

Ein in der Praxis sehr wichtiger Fall, bei dem die Gammaskopie allerdings scheitert, ist die Bestimmung des  $^{242}\text{Pu}$ -Gehalts in Brennstoffen. Grund hierfür ist, dass die schwachen Gamma-Linien von  $^{242}\text{Pu}$  sehr nahe bei deutlich stärkeren Linien anderer Pu-Isotope liegen und die Auflösung konventioneller Halbleiterdetektoren nicht ausreicht, um diese Linien zu trennen. Aus diesem Grund kommen hierfür meist

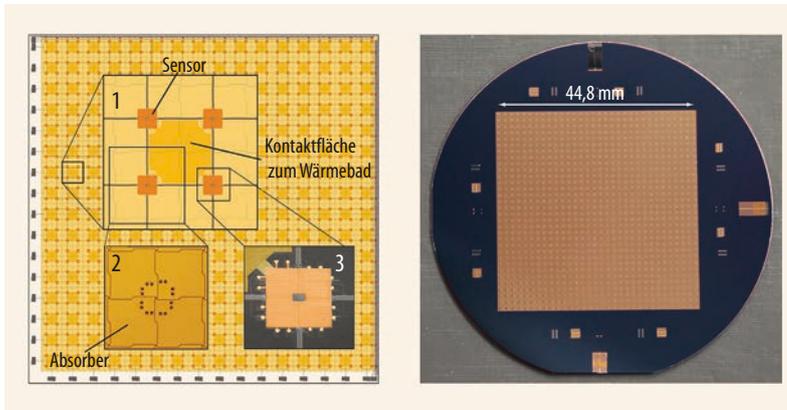


Abb. 5 Die teiltransparenten Absorber des MOCCA-Detektors erlauben einen Blick auf die darunterliegenden Strukturen (links): Die Ausschnittsvergrößerungen zeigen die Sensor- und Absor-

beranordnung (1) bzw. vier Absorber (2), die an einen Sensor gekoppelt sind. Das REM-Bild zeigt einen Temperatursensor ohne Absorber (3), das Foto (rechts) einen MOCCA-Prototyp mit 4096 Pixeln.

Korrelationstechniken zum Einsatz. Diese Methoden sind allerdings mit großen systematischen Fehlern behaftet, die gerade bei Brennstoffen mit hohem  $^{242}\text{Pu}$ -Gehalt zu großen Unsicherheiten führen. Berücksichtigt man, dass bei Brennstoffmengen von einigen Tonnen ein Messfehler von einem Prozent schnell im Bereich von Kilogramm liegen kann, ist sofort ersichtlich, dass verbesserte Methoden erforderlich sind. Auch in diesem Bereich bieten sich magnetische Kalorimeter an. Eine Plutoniumprobe wurde am Lawrence Livermore National Laboratory einmal mit einem Halbleiterdetektor und einmal mit einem magnetischen Kalorimeter gemessen [7]. Beim Vergleich der Gamma-Spektren ist deutlich zu erkennen, dass das Auflösungsvermögen des magnetischen Kalorimeters im Vergleich zum Ge-Halbleiterdetektor wesentlich höher ist und zudem ausreicht, die schwache  $^{242}\text{Pu}$ -Linie bei etwa 45 keV von der stärkeren  $^{240}\text{Pu}$ -Linie zu trennen (Abb. 6). Die dabei erhaltene Isotopenzusammensetzung stimmt zudem ausgezeichnet mit den Ergebnissen destruktiver Methoden überein.

### Flüchtige Teilchen auf der Waage

Experimente zur Untersuchung von Neutrinoeigenschaften waren stets eine treibende Motivation, um Tieftemperaturdetektoren zu entwickeln. Ziele waren es, den Sonnenneutrinofluss zu messen, die Neutrinomasse direkt zu bestimmen und nach dem neutrino-losen Doppelbeta-Zerfall zu suchen. Wir wollen hier Experimente zu den zwei letzten Themen diskutieren.

Der Vorschlag, die Neutrinomasse über die Kinematik des Elektroneneinfangs von  $^{163}\text{Ho}$  direkt zu messen, stammt bereits von 1982 [8]. Doch erst heute eröffnen moderne magnetische Kalorimeter dafür die Perspektive [9]. Beim Elektroneneinfangprozess in  $^{163}\text{Ho}$  wandelt sich im Kern ein Proton in ein Neutron

um, d. h. es bildet sich ein  $^{163}\text{Dy}$ -Kern unter Emission eines Neutrinos. Die für die Umwandlung verfügbare Energie  $Q_{\text{EC}} \approx 2,8 \text{ keV}$  teilen sich das Neutrino und das angeregte  $^{163}\text{Dy}^*$ -Tochteratom. Da Neutrinos eine endliche Ruhemasse  $m_0$  besitzen, ist die maximal mögliche Anregungsenergie  $E_{\text{max}}$  durch die Differenz  $E_{\text{max}} = Q_{\text{EC}} - m_0 c^2$  gegeben. Beim Übergang von  $^{163}\text{Dy}^*$  in den Grundzustand werden Röntgenphotonen und Auger-Elektronen emittiert. Die bei jedem Einfangprozess insgesamt freigesetzte Energie, ohne den vom Neutrino davongetragenen Anteil, lässt sich durch ein magnetisches Kalorimeter messen, in dessen Absorber die  $^{163}\text{Ho}$ -Atome vollständig eingebettet sind. Die Neutrinomasse kann dann über eine präzise Bestimmung des Verlaufs dieses Spektrums in der Nähe des Endpunkts ermittelt werden.

Die hohe Energieauflösung, die sehr kurze Signalanstiegszeit und die sehr gute Linearität machen magnetische Kalorimeter zu idealen Werkzeugen für dieses Experiment. Daher wurde 2011 die internationale Kollaboration ECHO (Electron Capture Holmium Experiment) ins Leben gerufen, die langfristig das Ziel hat, die Neutrinomasse mit Hilfe von magnetischen Kalorimetern direkt zu bestimmen.

Herstellung und Reinigung des künstlichen Isotops  $^{163}\text{Ho}$  sowie der Implantationsprozess stellen eine große Herausforderung dar, die inzwischen aber gelöst wurde. Das Elektroneneinfangspektrum von  $^{163}\text{Ho}$  zeigt, dass sich magnetische Kalorimeter prinzipiell eignen, um die Neutrinomasse zu bestimmen (Abb. 7). Das Ergebnis war so überzeugend, dass sich 2014 unmittelbar nach den ersten Ergebnissen von ECHO zwei weitere internationale Kollaborationen, HOLMES und NuMECS, gebildet haben, die das gleiche Ziel verfolgen. Ein Neutrinomassenexperiment mit ausreichender Statistik ist allerdings nur möglich, wenn viele tausend Detektoren parallel ausgelesen werden. Dafür entwickeln wir im Rahmen von ECHO derzeit

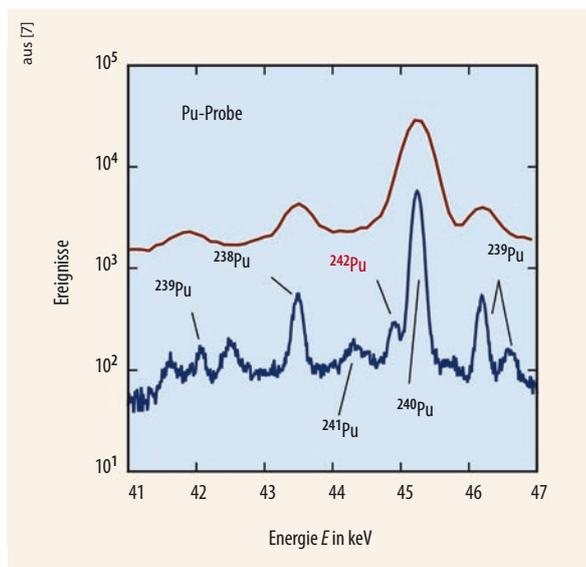


Abb. 6 Das magnetische Kalorimeter kann im Spektrum einer Plutoniumprobe (blau) deutlich mehr Strukturen auflösen als ein Ge-Halbleiterdetektor (rot).

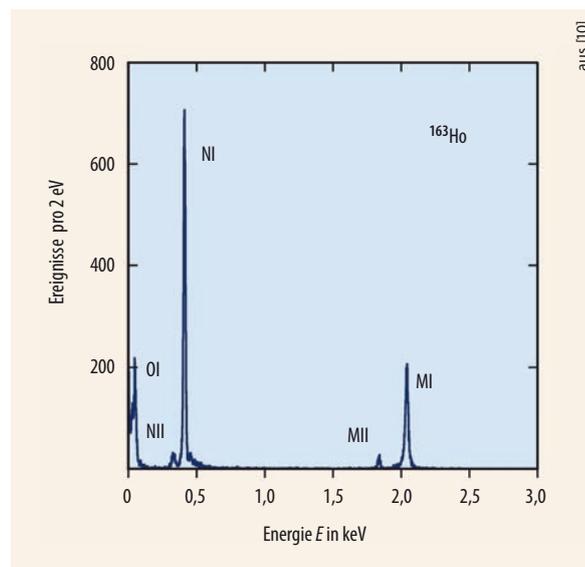
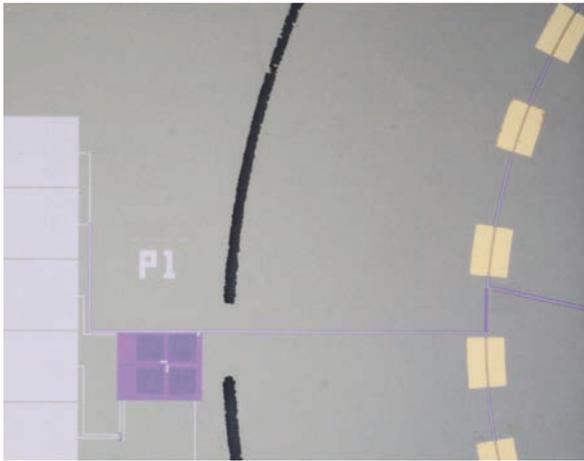


Abb. 7 Dieses Elektroneneinfangspektrum von  $^{163}\text{Ho}$  wurde mit Hilfe eines magnetischen Kalorimeters aufgenommen und zeigt dessen Eignung zur Messung der Neutrinomasse.



**Abb. 8** Im Ausschnitt eines Prototyp-Photonendetektors sind rechts gut die kreisförmig angeordneten paramagnetischen Sensoren zu erkennen und im zentralen Bereich zwei Schlitze, die durch einen Steg getrennt sind.

ein SQUID-basiertes Frequenzmultiplexverfahren, das wir kürzlich erstmals erfolgreich demonstrieren konnten. Darüber hinaus sind ein genaues theoretisches Verständnis des Spektrums sowie die Minimierung und Identifikation des radioaktiven Untergrunds unerlässlich. Auch daran wird intensiv gearbeitet.

Eine weitere Anwendung stellt die Suche nach dem neutrinolosen Doppelbeta-Zerfall dar, dessen Beobachtung Aufschluss über die mögliche Majorana-Natur der Neutrinos geben kann. Zahlreiche Experimente widmen sich weltweit dieser Frage bzw. befinden sich derzeit im Aufbau [11, 12]. Magnetische Kalorimeter kommen z. B. im AMoRE- und im LUMINEU-Experiment zum Einsatz.<sup>#)</sup> Diesen Experimenten liegt das Isotop <sup>100</sup>Mo zugrunde, das in einen szintillierenden Kristall (z. B. CaMoO<sub>4</sub> oder ZnMoO<sub>4</sub>) eingebaut ist. Die beim Doppelbeta-Zerfall emittierten Elektronen erzeugen in diesen Szintillatorkristallen sowohl Photonen als auch Phononen, für deren Nachweis magnetische Kalorimeter zuständig sind. Die gleichzeitige separate Beobachtung von Photonen und Phononen ist dabei entscheidend, um den radioaktiven Untergrund zu identifizieren – eine Voraussetzung für den Erfolg des Experiments.

In unserer Arbeitsgruppe haben wir dafür einen Photonendetektor entwickelt, der aus einem Si- oder Ge-Substrat besteht, auf dem im zentralen Bereich ein speziell gestaltetes magnetisches Kalorimeter aufgebracht ist. Dieses besteht aus 58 paramagnetischen Sensoren, die auf zwei Kreisen angeordnet sind und alle gemeinsam ausgelesen werden. Der zentrale Bereich ist durch drei Schlitze, die einen fast vollständigen Kreis bilden, vom Randbereich thermisch getrennt (Abb. 8). Drei verbleibende kleine Stege bilden nun die schwache thermische Kopplung zum Außenbereich, der als Wärmebad fungiert. Vorteil dieses Konzeptes ist es, dass trotz des makroskopischen Absorbers Anstiegszeiten von unter 10 μs möglich sind, was für die Identifikation von Pile-up-Ereignissen und damit für die Reduktion von Untergrundsignalen wichtig ist. Erste Experimente haben gezeigt, dass die

Signalanstiegszeit unter 5 μs liegt – verglichen mit NTD-Thermistoren eine Verbesserung um etwa einen Faktor 100 [13].

Alle hier dargestellten Anwendungen und Ergebnisse verdeutlichen eindrucksvoll, wie vielfältig und leistungsstark magnetische Mikrokalorimeter sind. Ohne Frage werden sich für diese Detektoren künftig viele weitere Anwendungsfelder erschließen.

\*

Wir danken allen Kolleginnen und Kollegen, die an den vielfältigen Experimenten beteiligt waren.

**Literatur**

- [1] C. Enss (Hrsg.), *Cryogenic Particle Detectors*, Topics in Applied Physics, Springer, Heidelberg (2005)
- [2] S. R. Bandler et al., *J. Low Temp. Phys.* **93**, 709 (1993)
- [3] A. Fleischmann et al., submitted to *Appl. Phys. Lett.*
- [4] M. Lestinsky, Y. Litvinov und Th. Stöhlker (Hrsg.), *CRYRING@ESR*, Springer, Heidelberg (2016)
- [5] D. Hengstler et al., *Physica Scripta* **T166**, 014054 (2015)
- [6] O. Novotny et al., *J. Appl. Phys.* **118**, 104503 (2015)
- [7] C. Bates et al., *J. Low Temp. Phys.*, DOI 10.1007/s10909-015-1348-0 (2016)
- [8] A. De Rujula und M. Lusignoli, *Phys. Lett. B* **118**, 429 (1982)
- [9] L. Gastaldo et al., *J. Low Temp. Phys.* **176**, 876 (2014)
- [10] C. Hassel et al., *J. Low Temp. Phys.* (2016), DOI 10.1007/s10909-016-1541-9
- [11] B. Schwingenheuer, *Ann. Phys.* **525**, 269 (2013)
- [12] W. Maneschg, *Nucl. Part. Phys. Proc.* **260**, 188 (2015)
- [13] D. Gray et al., *J. Low Temp. Phys.* (2016), DOI 10.1007/s10909-016-1535-73

**DIE AUTOREN**

**Andreas Fleischmann** (FV Tiefe Temperaturen) promovierte 2003 am Kirchhoff-Institut für Physik (KIP), nach einem einjährigen Forschungsaufenthalt an der Brown University in Providence (Rhode Island, USA). Für seine Dissertation erhielt er den Ruprechts-Karls-Preis der Uni Heidelberg. Seit 2003 leitet er eine Forschungsgruppe am KIP.



**Loredana Gastaldo** (FV Teilchenphysik) promovierte 2005 an der Uni Genua. Seitdem ist sie am KIP wissenschaftliche Mitarbeiterin und seit 2016 Juniorprofessorin an der Universität Heidelberg.

**Sebastian Kempf** (FV Tiefe Temperaturen) promovierte 2012 am KIP. Für seine Dissertation erhielt er den Ruprechts-Karls-Preis der Uni Heidelberg. Anschließend ging er an die PTB Berlin. Seit 2014 ist er Leiter einer Forschungsgruppe am KIP.



**Christian Enss** (FV Tiefe Temperaturen, Dynamik und Statistische Physik) promovierte 1991 in Heidelberg. Als Feodor Lynen-Stipendiat ging er an die Brown University und habilitierte sich anschließend an der Uni Heidelberg. Es folgten Lehrstuhlvertretungen an den Universitäten Bayreuth und Konstanz. Als Associate Professor ging er erneut an die Brown University. Seit 2004 ist er Professor am KIP. Er bekleidet Gastprofessuren an der Aalto University (Finnland) und der Brown University.



#) Advanced Molybdenum Rare Event Experiment und The Luminescent Underground Molybdenum Investigation for Neutrino mass and nature