

## TEILCHENPHYSIK

# Neuer Schwung für Axionen

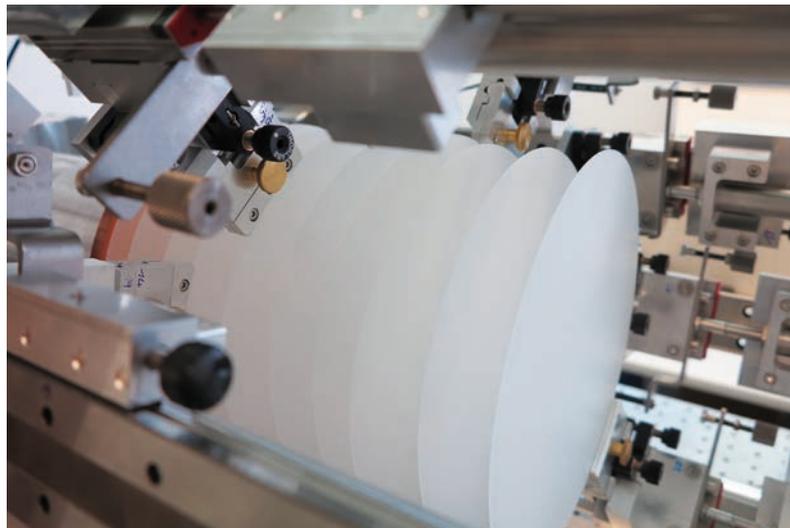
Die Suche nach den theoretisch schon lange vorhergesagten Teilchen nimmt derzeit wieder an Fahrt auf.

Béla Majorovits, Klaus Desch und Andreas Ringwald

Das Standardmodell der Teilchenphysik und gängige kosmologische Modelle lassen wichtige fundamentale Fragen offen: Warum verhalten sich Teilchen und Antiteilchen bei der starken Wechselwirkung absolut symmetrisch? Woraus besteht Dunkle Materie? Das Axion – als neues Teilchen in verschiedenen theoretischen Szenarien konstruiert – könnte beide Fragen beantworten. Jetzt bekommt die experimentelle Jagd nach dem Axion neuen Auftrieb.

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt erfolgreich die Welt der kleinsten Teilchen und die auf sie wirkenden Kräfte. Allerdings versagt es, wenn man die Welt auf kosmologischen Skalen betrachtet: Die Dunkle Materie macht 85 Prozent der Materie unseres Universums aus. Eine Vielzahl von Erweiterungen des Standardmodells sagt Kandidaten für die Dunkle Materie in Form neuartiger Elementarteilchen vorher. Zwei dieser Kandidaten stechen besonders heraus, weil ihre Existenz auch andere Fragen der Teilchenphysik beantwortet und ihr direkter experimenteller Nachweis in Reichweite sein könnte [1]. Bekannt ist das Neutralino aus den supersymmetrischen Erweiterungen des Standardmodells, die auch das Hierarchieproblem lösen könnten, also die Frage, warum sich Higgs- und Planck-Masse so sehr unterscheiden. Weniger bekannt ist das Axion. Seine Existenz wurde vorhergesagt, um das starke CP-Problem zu lösen (Infokasten), also die Frage zu klären, warum bisher für die starke Wechselwirkung keine gleichzeitige Verletzung der Ladungs- und Raumpiegelungssymmetrie nachzuweisen war – obwohl die theoretische Beschreibung dies erlaubt.

Das Standardmodell beschreibt Teilchen und Kräfte in quantisierten Feldern, die unser Universum durchziehen. Die Felder lassen sich anregen, und diese Anregungen breiten sich wie Wellen auf einer Oberfläche aus. Teilchen entsprechen den Elementaranregungen dieser Felder, während klassische Oszillationen die kohärenten Zustände vieler Teilchen sind. Die Quantenchromodynamik (QCD) erklärt die starke Wechselwirkung, die für die Kernkräfte verantwortlich ist, mit Hilfe so genannter Gluonfelder. Experimente haben die vorhergesagten Wechselwirkungen der Gluonen als Teilchanregungen des Feldes mit den Bausteinen der Materie, den Quarks, und mit sich selbst mit großer Genauigkeit bestätigt.



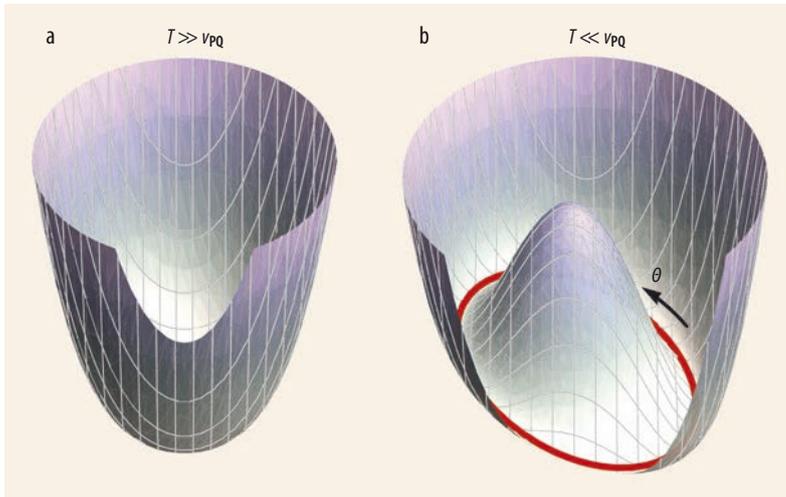
Der Testaufbau für das MADMAX-Experiment besitzt exakt positionierbare Saphir-Scheiben, an denen sich Axionen in einem B-Feld in Photonen umwandeln können.

Die QCD sagt auch voraus, dass Quantenfluktuationen des Gluonfeldes zu einer Verletzung der CP-Symmetrie in der starken Wechselwirkung führen. Aus dieser Symmetrieverletzung folgt, dass das Neutron ein elektrisches Dipolmoment (nEDM) besitzt. Trotz jahrzehntelanger Anstrengungen konnte aber bisher kein von Null verschiedenes nEDM gemessen werden. Der so genannte  $\theta$ -Parameter ist in der QCD ein Maß für den Grad der Asymmetrie der Wechselwirkung von Materie und Antimaterie. Er kann theoretisch einen beliebigen Wert zwischen  $-\pi$  und  $+\pi$  annehmen. Da das nEDM eines Elementarteilchens nicht CP-invariant ist, wenn es durch sein Antiteilchen ersetzt wird und zusätzlich alle Raumkoordinaten gespiegelt

## KOMPAKT

- Entgegen den Erwartungen lässt sich in der starken Wechselwirkung keine Asymmetrie zwischen dem Verhalten von Teilchen und Antiteilchen beobachten.
- Die Einführung eines Feldes, das an die Gluonfelder der starken Wechselwirkung koppelt, kann diesen experimentellen Befund erklären.
- Axionen – die Teilchanregungen dieses Feldes – könnten auch das Rätsel der Dunklen Materie lösen.
- Die aktuelle und die nächste Generation von Experimenten ermöglicht ein Überprüfen der Hypothese, dass die Dunkle Materie aus Axionen besteht.

Priv.-Doz. Dr. Béla Majorovits, Max-Planck-Institut für Physik, Föhringer Ring 6, 80805 München, Prof. Dr. Klaus Desch, Physikalisches Institut, Universität Bonn, Nußallee 12, 53115 Bonn, und Dr. Andreas Ringwald, DESY, Notkestr. 85, 22603 Hamburg



**Abb. 1** Das Potential des komplexen Peccei-Quinn-Skalarfeldes hat bei hohen Temperaturen ein absolutes Minimum bei verschwindenden Feldern (a). Bei niedrigen Temperaturen ist die Energie minimal entlang der Talsohle mit dem

Radius  $v_{PQ}$  (b, rot). Gluonfeldfluktuationen kippen dieses Tal, sodass es einen Punkt minimaler Energie gibt. Das Axion entspricht gerade der elementaren Anregung um dieses Minimum.

werden, folgt  $\theta$  aus Messungen des nEDM. Die experimentelle obere Schranke dafür verbietet größere  $\theta$ -Absolutwerte als etwa  $10^{-10}$ . Es ist ein Rätsel, warum dieser Wert so nahe bei Null liegt: Das ist das so genannte starke CP-Problem [2].

Helen Quinn und Roberto Peccei haben eine Lösung dieser Beobachtung vorgeschlagen [3]: Sie betrachteten den  $\theta$ -Parameter nicht als Naturkonstante, sondern als ein dynamisches Feld, das den Wert einnimmt, der am wenigsten Energie beansprucht. Das  $\theta$ -Feld ergibt sich dabei als Phase eines komplexen Skalarfeldes, dessen effektives Potential bei niedrigen Temperaturen ähnlich wie das Higgs-Feld die Form eines Sombros besitzt (Abb. 1). Die Talsohle kommt durch spontane Symmetriebrechung zustande. Der  $\theta$ -Parameter legt dann den – eigentlich beliebigen – Winkel entlang der Talsohle fest, den das Universum nach der Peccei-Quinn-Symmetriebrechung eingenommen hat.

Die Gluonfeldfluktuationen führen dazu, dass die Talsohle des Potentials geneigt ist und ein Minimum erhält, das umso ausgeprägter wird, je tiefer die Temperatur ist. Das  $\theta$ -Feld „rollt“ dann in Richtung des energetisch günstigsten Zustandes und fängt an, da-

rum zu oszillieren. Bemerkenswerterweise taucht das Potentialminimum genau für  $\theta = 0$  auf – im Grundzustand erhält die starke Wechselwirkung demnach die CP-Symmetrie, und die QCD leistet keinen Beitrag zum nEDM.

Frank Wilczek und Steven Weinberg bemerkten unabhängig voneinander, dass mit der Quantisierung dieses Feldes auch die Existenz eines neuen Elementarteilchens einhergeht [4]: Da durch dieses Teilchen das starke CP-Problem „reingewaschen“ werden konnte, taufte Frank Wilczek es nach einem Waschmittel – Axion.

### Ein Kandidat für Dunkle Materie

Sowohl die Masse als auch die Wechselwirkungen der Teilchenanregungen des Axionfeldes mit Teilchen des Standardmodells sind durch die Symmetriebrechungsskala  $v_{PQ}$  unterdrückt. Sie fallen also äußerst klein bzw. gering aus, falls letztere sehr viel größer als die Symmetriebrechungsskala der elektroschwachen Wechselwirkung im Standardmodell ist, die 246 GeV beträgt. Allerdings ist die Brechungsskala der Peccei-Quinn-Symmetrie bisher nicht bekannt. Im Teilchenbild ergeben die oben erwähnten Oszillationen des  $\theta$ -Feldes ein Kondensat nichtrelativistischer Axionen, die damit alle Anforderungen erfüllen, um als Kandidat für die Dunkle Materie zu gelten [2].

Kürzlich konnte die Vorhersage der Temperatur und damit der Energiedichte des Universums, bei der die Oszillationen begannen, entscheidend präzisiert werden [5]. Falls die Symmetriebrechung nach der vermuteten inflationären Expansionsphase des Universums geschah, ergibt sich eine Untergrenze für die Axionenmasse von etwa  $30 \mu\text{eV}$ , da ansonsten der Beitrag der Axionen zur Dunklen Materie die beobachtete Gesamtmenge übersteigt. Allerdings sind zusätzlich mögliche Populationen nichtrelativistischer Axionen zu berücksichtigen. Diese beruhen auf Diskontinuitäten im  $\theta$ -Feld, die entstehen, weil räumliche Bereiche ohne kausalen Zusammenhang vor der Symmetriebrechung unterschiedliche Anfangswerte von  $\theta$  besitzen können. Axionen mit Massen zwischen  $30 \mu\text{eV}$  und  $20 \text{meV}$  wären als „ultraleichte Teilchen“ mindestens acht Größenordnungen leichter als Elektronen und könnten die Dunkle Materie im Universum sehr gut erklären [5, 6]. Bei einer Symmetriebrechung vor der Inflation lässt sich keine Vorhersage für die Axionenmasse machen, weil der Beitrag der Axionen zur Dunklen Materie dann vom zufälligen Anfangswert des  $\theta$ -Parameters abhängt. Damit könnte die Axionenmasse beliebig klein sein.

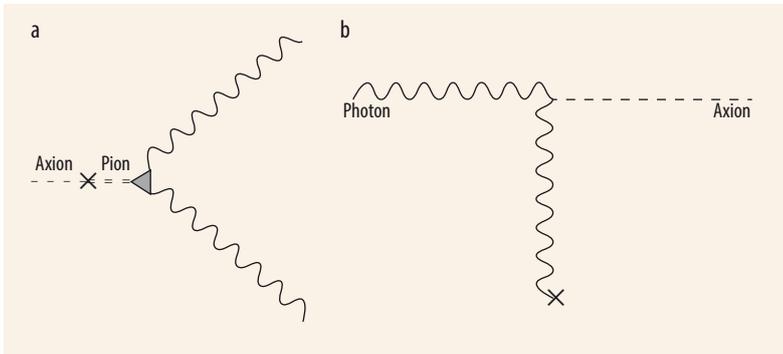
Auch jenseits des CP-Problems sagen Theorien wie die String-Theorie axionenähnliche Teilchen (axionlike particle, ALP) vorher, die ebenfalls Kandidaten für die Dunkle Materie sind. Diese entstehen über den gleichen Prozess einer Symmetriebrechung, aber hier gibt es keine Korrelation zwischen der Axionenmasse und der Symmetriebrechungsskala. Solche Teilchen

### CP-OPERATION UND CP-VERLETZUNG

Als **CP-Operation** bezeichnet man die gleichzeitige Anwendung der Paritätsoperation P (Raumspiegelung) und der Ladungskonjugation C auf ein physikalisches System.

Vektoren wie der Impuls ändern bei der Raumspiegelung ihr Vorzeichen. Axialvektoren wie Drehimpuls oder Spin sind dagegen invariant. Die CP-Operation überführt beispielsweise linkshändige Teilchen in rechtshändige Antiteilchen.

Die Vermutung CP-invarianter Naturgesetze wurde erstmals 1964 experimentell mit der **CP-Verletzung** in der schwachen Wechselwirkung bei Kaonen-Zerfällen widerlegt. Die theoretische Erklärung stammt von Kobayashi und Maskawa (1972, Nobelpreis 2008 [7]). Für die starke Wechselwirkung wurde bislang keine CP-Verletzung beobachtet, obwohl die quantenfeldtheoretische Beschreibung dies erwarten lässt.



**Abb. 2** Axionen (gestrichelt) und Photonen (Wellenlinie) können mittels einer Mischung von Axionen mit Pionen koppeln (a). Beim Primakoff-Effekt erfolgt die Konversion der Axionen in Photonen in einem statischen Magnetfeld, das ein „Photon zur Verfügung stellt“ (b). Dieser Prozess kann in beiden Richtungen ablaufen.

unterliegen im Gegensatz zu Axionen keinen theoretischen Einschränkungen für Masse und Kopplungsstärke. ALPs sind anhand ihrer Kopplung an Photonen nicht von Axionen unterscheidbar, allerdings wäre ihre Wechselwirkung mit Gluonen verschieden.

### Auf der Suche nach Axionen und ALPs

Eine generische Eigenschaft des Axions ist seine Kopplung an elektromagnetische Felder und damit an Photonen (Abb. 2), die sich die meisten experimentellen Ansätze zu ihrer Suche zunutze machen. Ein Axion kann in einem Magnetfeld in ein reelles Photon konvertieren, indem es sich vom Magnetfeld ein Photon „leiht“. Dieser Prozess heißt inverser Primakoff-Effekt. Seine Stärke ist proportional zum Skalarprodukt  $\vec{E} \cdot \vec{B}$  und invers proportional zu  $v_{PQ}$ . Experimente zur Axionensuche benötigen daher ein möglichst großes statisches Magnetfeld [8].

Drei Typen von Experimenten unterscheiden sich je nach Quelle der Axionen: Haloskope, Helioskope und „Light shining through the wall“, kurz: LSW-Experimente. Bei letzteren findet sowohl die Produktion als auch der Nachweis der Axionen im Labor statt. Zunächst passiert ein intensiver Laserstrahl einen Dipolmagneten, in dem die optischen Photonen in Axionen konvertieren können. Diese Axionen passieren dann ungehindert eine lichtundurchlässige Wand und konvertieren in einem weiteren Dipolfeld wieder in optische Photonen. Den Aufbau von Haloskopen, die nach „ruhender“ Dunkler Materie suchen, und von Helioskopen, die Axionen aus dem Kern der Sonne nachweisen sollen, besprechen wir später anhand konkreter Beispiele. Alle drei Techniken kommen in laufenden Experimenten zur Anwendung [2] und dienen auch der Suche nach ALPs basierend auf deren Kopplung an das Photon.

Ein vierter Ansatz ist es, das Axionfeld als klassisches Feld mit dem  $\theta$ -Parameter als Amplitude zu betrachten. Ein oszillierender  $\theta$ -Parameter führt zu einem oszillierenden nEDM, was sich mit hochsensitiven Magnetometern messen lässt [2]. Dazu gibt es vielversprechende experimentelle Anstrengungen, insbesondere auch an der Universität Mainz.

Die Gegenwart von Dunkler Materie aus Axionen führt zu einem zusätzlichen Quellenterm in den

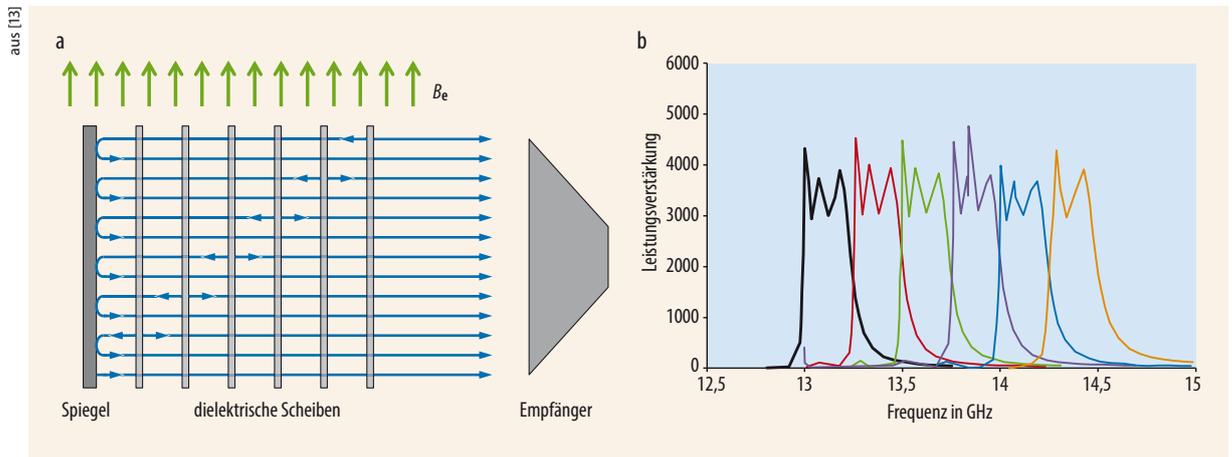
Maxwell-Gleichungen proportional zum klassischen oszillierenden Axionfeld. Das nutzen Haloskope bei der Konversion von Axionen und ALPs zu Photonen in einem statischen Magnetfeld aus. Dabei ist die de Broglie-Wellenlänge der Kandidaten für Dunkle Materie, also deren Ausdehnung, meist größer als das Experiment selbst. Das Experiment befindet sich damit quasi im Axion. Interpretiert man Axionen als Welle, induziert somit ein ruhendes Axion in einem statischen Magnetfeld ein oszillierendes elektrisches Feld. Die Amplitude dieser Oszillation ist zwar extrem klein, doch bei bekannter Frequenz lassen sich Resonanzeffekte nutzen. Die gängigste Methode ist es, einen Resonator einstellbarer Resonanzfrequenz zu verwenden, in dem die axioneninduzierte Schwingung des elektrischen Feldes immer weiter verstärkt wird. Die Amplitude der Resonanzfrequenz ist proportional zu Volumen und Gütefaktor des Resonators. Eine Antenne kann das Signal zum Aufzeichnen auskoppeln.

In einem Messdurchlauf über verschiedene Frequenzen erwartet man bei der Frequenz, die einem Axion oder ALP entspricht, eine erhöhte Strahlungsleistung. Für Dunkle Materie-Axionen (DM-Axionen) beträgt diese in einem realistischen Resonator mit hundert Litern Volumen und einem Gütefaktor  $Q \sim 10^5$  bei einem Magnetfeld von 8 T ungefähr  $10^{-23}$  W. Mit diesem Konzept ist die Suche nach Axionen mit Massen zwischen einem und  $30 \mu\text{eV}$  möglich.

Die Experimente ADMX [9] und Haystack [10] nutzen dieses Prinzip: Die genaue Position verschiebbarer Stäbe im Körper des Resonators beeinflusst die Re-



**Abb. 3** Die Resonanzkavität des ADMX-Experiments lässt sich durch das Justieren von Frequenzmodulierstäben kalibrieren.



**Abb. 4** Ein dielektrisches Haloskop emittiert Photonen kohärent von vielen Oberflächen und reflektiert sie an einem Spiegel an einer Seite. Das Signal lässt sich auf der anderen Seite messen (a). Je nach Distanz zwischen den hier zwanzig Scheiben ändert sich die Verstärkung der Axionen-Photonen-Konversion als Funktion der Frequenz (b).

sonanzfrequenz (Abb. 3). Je nach Position der Stäbe ist das Experiment auf Axionen mit einer bestimmten Masse empfindlich. Bei jedem eingestellten Frequenzbereich von 25 kHz läuft die Messung etwa 100 s – so lange, bis ein DM-Axion mit entsprechender Frequenz eine statistisch relevante Strahlungsleistung der resonant konvertierten Photonen ermöglichen sollte. Zum Nachweis einer Leistung von etwa  $10^{-23}$  W bei den gegebenen Frequenzen sind speziell entwickelte Sensoren nötig, die bei sehr niedrigen Temperaturen funktionieren müssen und deren Genauigkeit durch das Quantenrauschen limitiert ist.

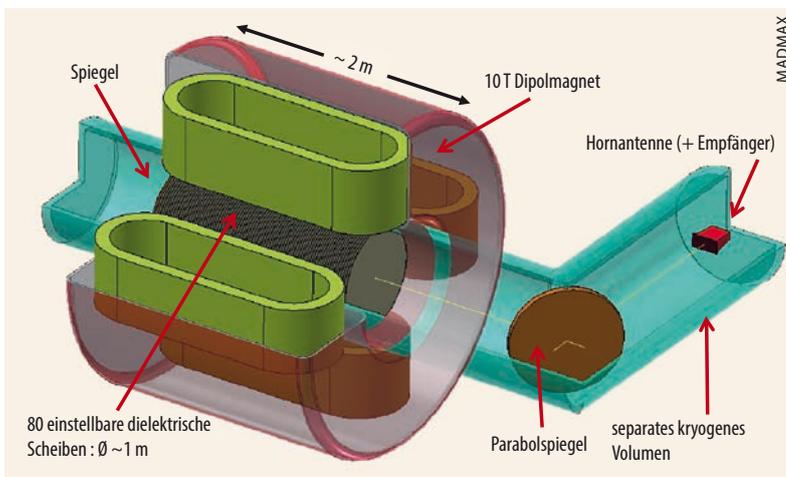
Die ADMX-Kollaboration hat nach jahrzehntelanger Entwicklungsarbeit eine Empfindlichkeit erreicht, die es erlaubt, DM-Axionen nachzuweisen, falls diese eine Masse zwischen einem und  $10 \mu\text{eV}$  haben. Die Messungen laufen derzeit noch. Die Haystack-Kollaboration hat sich insbesondere auf die Entwicklung spezieller hochempfindlicher Sensoren bei höheren Frequenzen konzentriert. Sie hat kürzlich Ergebnisse für Axionenmassen im Bereich um  $20 \mu\text{eV}$  geliefert. Das ist zwar noch nicht empfindlich genug, um DM-

Axionen nachzuweisen. Die Entwicklungsarbeiten zeigen aber, dass auch für den Massenbereich von 10 bis  $30 \mu\text{eV}$  die nötige Empfindlichkeit demnächst zu erreichen ist. Ähnliche Experimente sind in Südkorea, Australien und am CERN in Vorbereitung.

### Auf dem Weg zu größeren Massen

Bei Axionen größerer Masse, die das Szenario der Peccei-Quinn-Symmetriebrechung nach der Inflation vorhersagt, versagt das Prinzip der Resonatoren, da sie ein kleineres Volumen benötigen, aber der Gütefaktor mit dem Volumen sinkt. Neue Konzepte sehen vor, kleinere Resonatoren beispielsweise direkt miteinander zu koppeln. Platzsparend gelingt das mit der Unterteilung eines großen Zylindervolumens in „Pizzastücke“. Dabei koppeln die einzelnen Volumina im Zentrum des Zylinders miteinander, sodass zwar die Resonanzfrequenz derjenigen der kleineren Volumina entspricht, das Gesamtvolumen allerdings dem des unterteilten Zylinders. Diesen „Pizzakavität“ genannten Ansatz untersuchen momentan mehrere Forschungsinstitute weltweit.

Ein weiteres Konzept macht sich zunutze, dass elektrische Felder in Materialien mit dielektrischer Konstante  $\epsilon$  um eben diesen Faktor unterdrückt sind. Axioneninduzierte Oszillationen des elektrischen Feldes in einem statischen Magnetfeld an Übergängen zwischen Medien mit verschiedenen  $\epsilon$  führen zu einer Diskontinuität des elektrischen Feldes, welche die klassische Elektrodynamik nicht erlaubt. Um ein kontinuierliches Feld zu garantieren, müssen Photonen mit der Frequenz der Feldoszillation senkrecht zu den Oberflächen abstrahlen. Nach diesem Prinzip ergibt sich für DM-Axionen, dass ein Spiegel ( $\epsilon = \infty$ ) in einem Magnetfeld von 10 T pro Quadratmeter Fläche eine Leistung von etwa  $10^{-27}$  W abstrahlt. Um Leistungen zu erreichen, welche die empfindlichsten verfügbaren Sensoren innerhalb vertretbarer Zeit nachweisen, kann anstelle eines ebenen Spiegels ein Parabolspiegel mit



**Abb. 5** Im MADMAX-Experiment sind bis zu 80 Scheiben mit je einem Quadratmeter Fläche vor einem Spiegel in einem Dipolmagnetfeld mit 10 T aufgestellt. Die Scheiben sind positionierbar. Der Spiegel fokussiert die emittierten Photonen.

entsprechender Fläche die emittierte Strahlung in seinem Brennpunkt sammeln. Dies erweist sich allerdings aufgrund der großen Fläche als schwierig.

Die jüngst gegründete MADMAX-Kollaboration (Magnetized Disc and Mirror Axion eXperiment) hat zum Ziel, ein Haloskop nach einer Idee aus dem Max-Planck-Institut für Physik zu bauen [11]: In einem Magnetfeld befinden sich viele transparente Scheiben mit großer Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$  vor einem Spiegel, sodass sich die abgestrahlte Leistung um die Anzahl der Oberflächen erhöht und Welleneffekte ausnutzbar werden. Da das Experiment „innerhalb des Axions“ steht, trifft jede Oberfläche die gleiche Oszillation des elektrischen Feldes und alle Oberflächen strahlen Photonen kohärent ab. Bei geeigneter Platzierung der Scheiben überlagern sich die abgestrahlten Photonen konstruktiv: Bei der korrekten Distanz zwischen den Oberflächen verstärkt das axioneninduzierte oszillierende Feld für gegebene Frequenzen die Photonenemission (Abb. 4). Mit Abständen von 1,5 mm bis 1,5 cm kann MADMAX nach Axionen mit Massen von 40 bis 400  $\mu\text{eV}$  suchen. Kleine Variationen der Distanz erlauben eine relativ breitbandige Verstärkung (etwa 50 MHz). Beispielsweise können 80 Scheiben aus  $\text{LaAlO}_3$  ( $\epsilon = 24$ ) für Frequenzen um etwa 20 GHz eine mehr als 10 000-mal höhere Verstärkung erreichen als ein einzelner Spiegel. Damit strahlt ein solches System bei einem Quadratmeter Scheibenoberfläche eine axioneninduzierte Leistung von etwa  $10^{-23}$  W ab, die sich mit einem Parabolspiegel fokussieren und mit einem geeigneten Empfängersystem nachweisen lässt (Abb. 5).

### Der Sonne zugewandt

Anders als Haloskope sind Helioskope nicht darauf angewiesen, dass Axionen die Dunkle Materie im Universum darstellen. Sofern eine Kopplung  $g_{\gamma\gamma}$  von

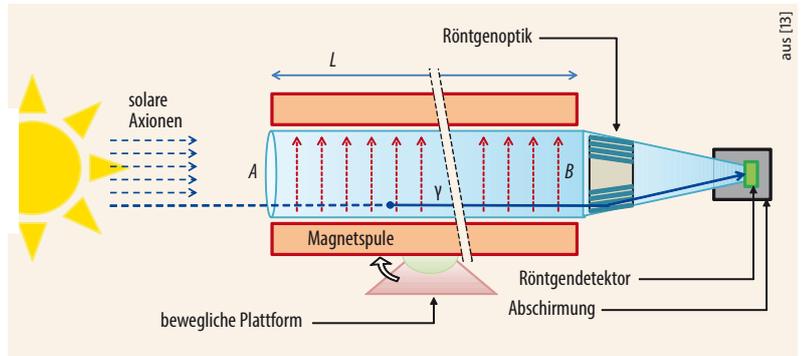


Abb. 6 In Helioskopen werden Axionen aus der Sonne im Magnetfeld zu Photonen konvertiert, um sie mit Röntgendetektoren nachzuweisen.

Axionen oder ALPs an Photonen existiert, produziert die Sonne Axionen oder ALPs mit einem gut vorher-sagbaren Fluss, weil dann im Sonneninneren Photonen über den Primakoff-Effekt konvertieren. Aufgrund der Boltzmann-Verteilung der Photonenenergien besitzen diese Axionen überwiegend Energien im Röntgenbereich mit einem Maximum bei 3 keV. In einem zur Sonne ausgerichteten Magneten können die solaren Axionen wieder zu Photonen konvertieren und als Röntgenphotonen nachgewiesen werden (Abb. 6). Das derzeit empfindlichste Helioskop ist CAST, das CERN Axion Solar Telescope. Ein ausgedienter Prototyp eines LHC-Magneten stellt ein Magnetfeld mit  $B = 9$  T bereit. Die Anzahl nachgewiesener Photonen ist proportional zum Produkt  $B^2 L^2 A \eta$ , wobei  $L$  die Länge des durchquerten Magnetfeldes,  $A$  die Querschnittsfläche des Magneten und  $\eta$  die Nachweiseffizienz für einzelne Röntgenphotonen sind.

Die experimentelle Herausforderung besteht darin, einzelne Röntgenphotonen möglichst untergrundfrei nachzuweisen. Da Untergrundereignisse überall auf der Detektorfläche erscheinen, gilt es dazu, die Sonne auf eine möglichst kleine Fläche abzubilden. Dazu eignen sich Röntgenteleskope nach dem Wolter-Prinzip,

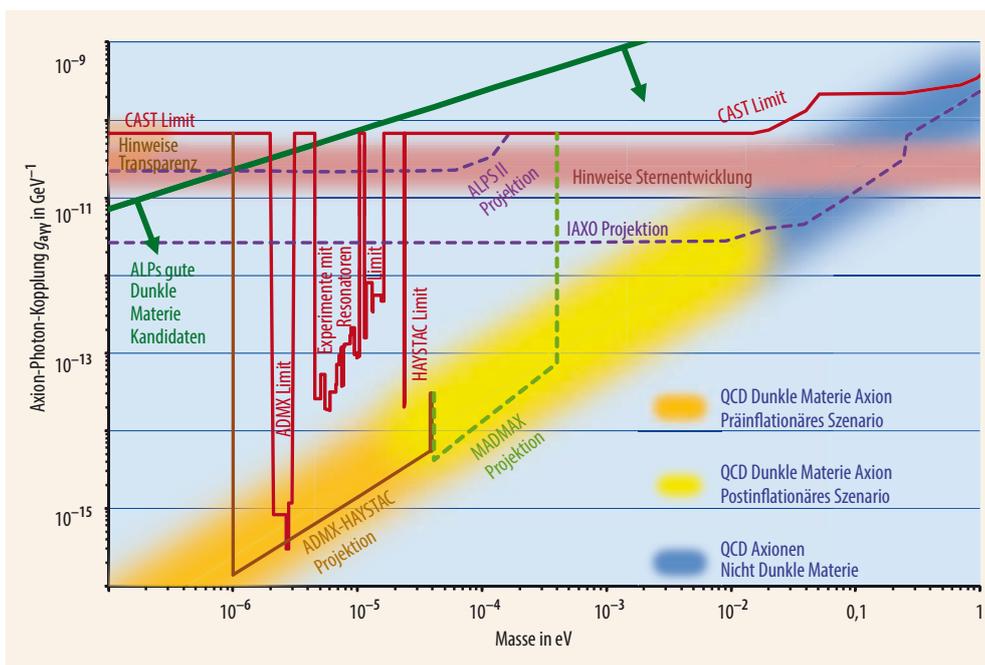


Abb. 7 Verschiedene Experimente ergaben Ausschlussgrenzen für die Kopplungsstärke, oberhalb derer Axionen und ALPs einer bestimmten Masse ausgeschlossen sind (rote Linie). Aus Modellen folgen die erwarteten Bereiche für Axionen, die das Problem der Dunklen Materie (orange, gelb) lösen. ALPs und Axionen mit Massen größer als 10 meV (blau) könnten andere kosmologische Fragen (rot) klären. Laufende und geplante Experimente (gestrichelte Linien) verschieben die Limits in den Bereich dieser Vorhersagen.

wie sie an Bord von astronomischen Röntgensatelliten verbaut sind, aufgrund ihrer hohen Effizienz und der starken Fokussierung. Beim Nachweis der Röntgenphotonen haben sich neben CCDs auch gasgefüllte Detektoren, wie Micromegas und GridPix-Detektoren, bewährt. Gasgefüllte Detektoren haben den Vorteil, dass Untergrundereignisse eine abweichende Topologie besitzen und sich damit diskriminieren lassen. Mit CAST ist es gelungen, den erwarteten Untergrund im interessanten Energiebereich auf 1,02 Ereignisse in 290 Stunden Sonnenbeobachtung zu reduzieren, sodass für Axionenmassen unterhalb von 20  $\mu\text{eV}$  die massenunabhängige Obergrenze der Kopplung bei  $g_{\text{a}\gamma\gamma} < 0,66 \cdot 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$  (95 % CL) liegt [12].

Fortschritte in der Detektor- und Röntgenteleskopentwicklung erlauben nun den nächsten Schritt zu einem wesentlich größeren Magneten, der speziell für ein Helioskop entwickelt wird. Das International Axion Observatory IAXO soll nach derzeitiger Planung aus acht Rohren von 20 m Länge mit einer Gesamtquerschnittsfläche von 2,3  $\text{m}^2$  bestehen, die sich in einem Magnetfeld mit durchschnittlich 2,5 T nutzbarer Feldstärke befinden [13]. Damit lässt sich die Empfindlichkeit um mehr als eine Größenordnung steigern. Sollte es damit gelingen, ALPs oder Axionen nachzuweisen, klären sich einige astrophysikalische Fragestellungen: Einerseits implizieren Beobachtungen, dass gewisse Sterne schneller Energie verlieren als erwartet [2]. Dies könnte am Entstehen von ALPs oder Axionen im Sterninneren und ihrer darauffolgenden Abstrahlung liegen. Andererseits gibt es Hinweise darauf, dass hochenergetische Gammastrahlung aus den Tiefen des Universums weiter vordringt als theoretisch erwartet – das Transparenzproblem. Photonen, die unterwegs durch eine Kopplung an das intergalaktische Magnetfeld in ALPs konvertieren, die ungehindert kosmologisch relevante Distanzen durchqueren und sich später wieder in Photonen zurückverwandeln, wären des Rätsels Lösung. Für Axionen mit Massen größer als 1  $\text{meV}$  ist IAXO das einzige empfindliche Experiment.

Die MADMAX- und IAXO-Kollaborationen könnten ihre Experimente am DESY in Hamburg aufbauen, das an beiden Experimenten beteiligt ist – in Nachbarschaft zum LSW-Experiment ALPS II (Any Light Particle Search II), das eine Kette ausrangierter Magnete des Speicherrings HERA verwendet [14]. Auch wenn LSW-Experimente auf absehbare Zeit nicht die Sensitivität zum Nachweis von Axionen erreichen, haben sie das Potenzial, andere ALP-Kandidaten zu entdecken, die insbesondere auch das Transparenzproblem erklären.

### Dornröschen erwacht

Verschiedene Erweiterungen des Standardmodells motivieren die Suche nach Teilchen wie Axionen und ALPs. Axionen stellen eine mögliche Lösung des starken CP-Problems dar und gelten als Kandidaten für Teilchen der Dunklen Materie. Auch ALPs könnten

zur Dunklen Materie beitragen und gleichzeitig eine Erklärung für astrophysikalische Anomalien liefern, beispielsweise für die beobachtete übergroße Reichweite von TeV-Photonen im Universum oder das anomal schnelle Abkühlen verschiedener Sterne.

Nachdem die experimentelle Suche nach diesen Teilchen lange vernachlässigt war, scheinen die Anstrengungen nun aus einem Dornröschenschlaf zu erwachen. Weltweit gibt es ernstzunehmende komplexere experimentelle Ansätze, die es in nicht allzu ferner Zukunft erlauben sollten, die Hypothesen der QCD-Axionen als Dunkle Materie und der ALPs als Lösung für die beobachteten astrophysikalischen Anomalien zu überprüfen (Abb. 7). Das ADMX-Experiment in den USA ist bereits auf der Suche nach Axionen mit Massen zwischen einem und zehn  $\mu\text{eV}$ .

Insbesondere das DESY in Hamburg entwickelt sich derzeit zu einem Zentrum für die Suche nach Axionen und ALPs: Es beheimatet bereits das Experiment ALPS II und ist ein möglicher Standort für die Experimente MADMAX und IAXO.

### Literatur

- [1] R. Lang, Physik Journal, November 2014, S. 35
- [2] I. Irastorza und J. Redondo, arXiv:1801.08127 (2018)
- [3] R. Peccei und H. Quinn, Phys. Rev. Lett. **38**, 1440 (1977)
- [4] S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **40**, 223 (1978); F. Wilczek, Phys. Rev. Lett. **40**, 279 (1978)
- [5] S. Borsanyi et al., Nature **539**, 69 (2016)
- [6] A. Ringwald und K. Saikawa, Phys. Rev. D **93**, 085031 (2016); V. B. Klaer und G. D. Moore, JCAP **11**, 049 (2017)
- [7] A. Ali, Physik Journal, Dezember 2008, S. 22
- [8] P. Sikivie, Phys. Rev. Lett. **51**, 1415 (1983) und Phys. Rev. D **32**, 2988 (1985)
- [9] ADMX collaboration, Phys. Rev. Lett. **120**, 152301 (2018)
- [10] B. Brubaker et al., Phys. Rev. Lett. **118**, 061302 (2017)
- [11] A. Caldwell et al., Phys. Rev. Lett. **118**, 091801 (2017)
- [12] CAST collaboration, Nat. Phys. **13**, 584 (2017)
- [13] IAXO collaboration, JINST **9**, T05002 (2014)
- [14] ALPS collaboration, JINST **8**, T09001 (2013)

### DIE AUTOREN

**Béla Majorovits** (FV Teilchenphysik) hat an der U Heidelberg Physik studiert und am MPI für Kernphysik promoviert. Als Postdoc hat er an der U Oxford am CRESST-Experiment mitgearbeitet. Seit 2006 ist er Gruppenleiter am MPI für Physik und seit 2011 Privatdozent an der TU München. Er ist Sprecher der MADMAX-Kollaboration.



**Klaus Desch** (FV Teilchenphysik, Arbeitskreis Beschleunigerphysik) ist Professor für Experimentalphysik an der U Bonn. Er arbeitet auf dem Gebiet der experimentellen Teilchenphysik mit Beschleunigern (ATLAS, ILC) und ohne Beschleuniger (CAST, IAXO) sowie in der Detektorentwicklung.

**Andreas Ringwald** (FV Teilchenphysik) ist theoretischer Teilchenphysiker am DESY und arbeitet daran, die Eigenschaften des Axions und anderer ultraleichter Teilchen jenseits des Standardmodells vorherzusagen und in Experimenten zu überprüfen. Er hat das ALPS-Projekt bei DESY angeregt. In seiner Freizeit segelt er gern.

