

DUNKLE MATERIE

Auf Kollisionskurs produziert

Bei Zusammenstößen von Protonen mit sehr hohen Energien könnte am Large Hadron Collider Dunkle Materie entstehen.

David Berge, Joachim Kopp und Ruth Pöttgen

Obwohl zahlreiche astrophysikalische Beobachtungen Hinweise für die Existenz einer Dunklen Materie liefern, kennen wir weder die Produktions- noch die Wechselwirkungsmechanismen dieser hypothetischen Teilchen. Wenn es gelingt, Dunkle Materie direkt im Labor herzustellen, wäre es möglich, diese Prozesse im Detail zu untersuchen. Dabei spielen Teilchenbeschleuniger wie der Large Hadron Collider am CERN eine wichtige Rolle.

Dunkle Materie kann im frühen Universum durch verschiedene Mechanismen entstanden sein. Am populärsten ist nach wie vor der Ansatz, dass es sich dabei um Weakly Interacting Massive Particles handelt. Für die Suche nach diesen Teilchen am Large Hadron Collider ist das Postulat entscheidend, dass sich Dunkle und sichtbare Materie ineinander umwandeln können, beispielsweise durch Paarvernichtungsprozesse der Form

$\bar{\chi} \chi \leftrightarrow \bar{f} f$, wobei χ ($\bar{\chi}$) das Teilchen (Antiteilchen) der Dunklen Materie bezeichnet und f (\bar{f}) ein Teilchen (Antiteilchen) aus dem Standardmodell. Wenn die Rate dieser Prozesse nicht zu klein ist, sollte sich im frühen Universum schnell ein thermodynamisches Gleichgewicht zwischen Dunkler und sichtbarer Materie einstellen – alle Freiheitsgrade wären dann gleich stark bevölkert. Für fermionische Dunkle Materie, also Teilchen mit einem halbzahligen Eigendrehimpuls, der Masse m_χ ergibt sich die Anzahldichte n_χ aus einer Fermi-Dirac-Verteilung zu

$$n_\chi = \int \frac{d^3\mathbf{p}}{(2\pi)^3} \frac{1}{1 + \exp(\sqrt{\mathbf{p}^2 + m_\chi^2} / k_B T)}. \quad (1)$$

Hier bezeichnet \mathbf{p} den Impuls der Teilchen, T die Temperatur und k_B die Boltzmann-Konstante. Wenn das Universum expandiert, wird $k_B T$ zu einem bestimmten Zeitpunkt kleiner als m_χ , was die Dichte der Dunklen Materie gemäß

- ◀ Mit dem CMS-Detektor suchen Teilchenphysiker am CERN auch nach Spuren Dunkler Materie.

Gl. (1) exponentiell unterdrückt. Dadurch verschiebt sich das Gleichgewicht im Paarvernichtungsprozess zugunsten der Teilchen aus dem Standardmodell, weil immer weniger von ihnen ausreichend Energie besitzen, um sich in Dunkle Materie umzuwandeln. Während die Dichte weiter sinkt, nimmt auch die Annihilationsrate der Dunklen Materie beständig ab. Sobald die Rate kleiner ist als das Inverse des Alters des Universums, kommt der Annihilationsprozess $\bar{\chi}\chi \rightarrow \bar{f}f$ effektiv zum Erliegen, und die Anzahl der Teilchen der Dunklen Materie bleibt fortan konstant. Dies bezeichnet man als „Ausfrieren“ der Dunklen Materie.

Die Dichte der Dunklen Materie im heutigen Universum ist invers proportional zur Annihilationsrate: Je geringer die Rate, desto früher friert die Dunkle Materie aus und desto höher ist ihre Dichte heute. Aus den Beobachtungen des kosmischen Mikrowellen-Hintergrundes ist bekannt, dass die Dichte der Dunklen Materie etwa 84 Prozent der gesamten Materiedichte des Universums ausmacht [1]. Aus diesem Wert leitet sich ab, dass die Annihilationsrate von der gleichen Größenordnung sein sollte wie typische Ereignisraten der schwachen Wechselwirkung im Standardmodell. Deshalb könnte die Masse der WIMPs ähnlich groß sein wie die Masse der W -, Z - und Higgs-Bosonen und etwa 100 GeV betragen.¹⁾ Falls dies tatsächlich der Fall ist, können an Teilchenbeschleunigern wie dem Large Hadron Collider Reaktionen der Form $\bar{f}f \rightarrow \bar{\chi}\chi$ stattfinden. Die Kollisionsenergien reichen aus, um Dunkle Materie mit einer Masse von mehreren TeV pro Teilchen zu produzieren. Außerdem sind die Kollisionsraten hoch genug, dass signifikant viele Ereignisse auftreten können. Wir beschränken uns im Folgenden auf Signaturen von WIMPs, deren Teilchenzahldichte im Universum durch „Ausfrieren“ feststeht.

Schnelle Teilchen und riesige Detektoren

Der Large Hadron Collider ist am CERN in einem 27 Kilometer langen ringförmigen Tunnel installiert. Im Speicherring erreichen zwei gegenläufige Protonenstrahlen Energien von jeweils 6,5 TeV. Damit steht dort die weltweit größte Kollisionsenergie zur Verfügung. Außerdem ist die Luminosität, ein Maß für die Rate der Teilchenkollisionen, so hoch, dass auch extrem seltene Prozesse wie die Produktion Dunkler Materie auftreten können. Um am Large Hadron Collider nach Dunkler Materie zu suchen, eignen sich insbesondere die beiden Detektoren ATLAS und CMS.

Sie sind in unterirdischen Kavernen entlang des Beschleunigertunnels untergebracht und gehören zu den größten und aufwändigsten Maschinen, die Menschen jemals gebaut haben. Bei einer Kollision zweier Protonen registrieren sie die entstehenden Sekundärteilchen und

zeichnen deren Eigenschaften auf. Beide Detektoren sind darauf ausgelegt, eine maximale Vielfalt an Produktions- und Zerfallsmechanismen zu studieren. Sie bestehen aus verschiedenen Komponenten, die in mehreren Lagen hintereinander angeordnet sind und jeweils spezielle Wechselwirkungseigenschaften der Teilchen ausnutzen (Abb. 1). Aus der Kombination der Signale, die in den verschiedenen Lagen auftreten, lassen sich Rückschlüsse darauf ziehen, um welches Teilchen es sich handelt. Ein Schauer im elektromagnetischen Kalorimeter in Kombination mit einer Teilchenspur ist beispielsweise charakteristisch für ein Elektron. In Beschleunigerexperimenten wie ATLAS und CMS sind diese Lagen zylindrisch um den Kollisionspunkt der Protonenstrahlen angeordnet. Die beiden Experimente unterscheiden sich in den Technologien, die sie für die einzelnen Detektorkomponenten verwenden.

Wie zeigt sich das Unsichtbare?

Die Wechselwirkung von WIMPs mit normaler Materie ist so schwach, dass die Dunkle Materie in den Detektoren keine Signale hinterlässt und für die Experimente am LHC „unsichtbar“ bleibt. Dennoch können die Experimente nach Dunkler Materie suchen. Teilchen der Dunklen Materie tragen keine elektromagnetische Ladung und werden nicht von der starken Wechselwirkung beeinflusst. Sie können ohne ein Signal alle Detektorlagen durchdringen. Sie lassen sich daher nur indirekt über eine scheinbare Verletzung der Impulserhaltung nachweisen, wenn sie zusammen mit anderen Teilchen entstehen. Die einlaufenden Protonen bewegen sich nur entlang der Strahlachse, sodass der Impuls in der Ebene transversal dazu vor der Kollision gleich Null ist. Gemäß Impulserhaltung muss das auch nach der Kollisi-

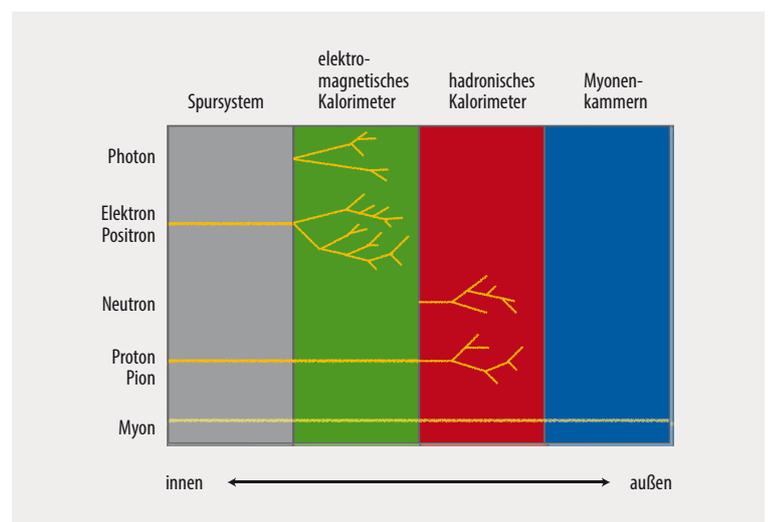
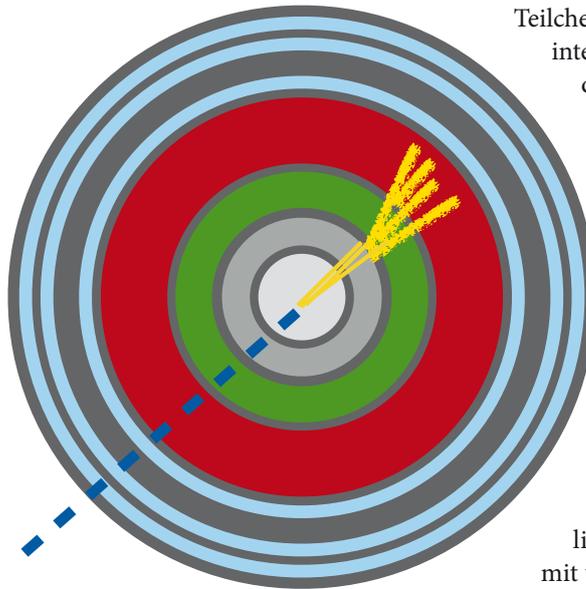


Abb. 1 Die Teilchen des Standardmodells hinterlassen in Detektorsystemen wie ATLAS oder CMS charakteristische Signaturen. Der innerste Detektor, das Spursystem, registriert die Flugbahn geladener Teilchen. Photonen sowie Elektronen und Positronen deponieren ihre gesamte Energie in Form elektromagnetischer Schauer im elektromagnetischen Kalorimeter. Im darauffolgenden hadronischen Kalorimeter lassen sich alle Teilchen nachweisen, welche die starke Wechselwirkung spüren (z. B. Protonen, Neutronen oder Pionen). Allein Myonen können alle Lagen mit geringem Energieverlust durchqueren und werden außerhalb der Kalorimeter in speziellen Myonenkammern nachgewiesen.

1) Im Folgenden setzen wir der Einfachheit halber die Vakuumlichtgeschwindigkeit $c = 1$, d. h. wir geben Teilchenmassen in Energieeinheiten an.

Abb. 2 Entlang der Strahlachse betrachtet zeichnet sich ein Kollisionsereignis, bei dem Dunkle Materie zusammen mit Teilchen des Standardmodells entsteht, beispielsweise durch einen einzelnen Jet (gelb) aus: Die Teilchen haben Signale im Spursystem (grau) sowie im elektromagnetischen (grün) und hadronischen Kalorimeter (rot) hinterlassen. Es fehlt ein ausgleichender Transversalimpuls (blau gestrichelt).



sion gelten. Addieren sich die Transversalimpulse der registrierten Teilchen nicht zu Null, haben nicht nachgewiesene Teilchen einen Teil des transversalen Impulses getragen. Die Suche nach Dunkler Materie am LHC entspricht daher einer Suche nach fehlendem Transversalimpuls.

Bei einem Kollisionsereignis, in dem Dunkle Materie produziert wird, weisen die unterschiedlichen Detektorschichten beispielsweise einen einzelnen Jet nach (Mono-Jet-Ereignis, **Abb. 2**). Dieses kollimierte Bündel stark wechselwirkender Teilchen des Standardmodells entsteht aus Quarks oder Gluonen, die aus der Kollision hervorgehen. Außerhalb des Jets gibt es keine weiteren Teilchen, die seinen Transversalimpuls ausbalancieren würden. Doch nicht nur Dunkle Materie, sondern auch Neutrinos hinterlassen solche Signaturen in den Detektorsystemen ATLAS und CMS. Neutrinos entstehen beispielsweise bei der Produktion eines Z-Bosons, das anschließend in ein Neutrino-Antineutrino-Paar zerfällt. Solche Neutrino-Ereignisse sind damit der dominierende Untergrund bei der Suche nach Dunkler Materie mit Collider-Experimenten. Insbesondere lässt sich für ein einzelnes Kollisionsereignis nicht entscheiden, ob die unsichtbaren Teilchen, die den fehlenden Transversalimpuls tragen, Neutrinos, Dunkle Materie oder etwas völlig anderes waren. Nur durch sehr viele Ereignisse und den Vergleich mit der erwarteten Anzahl an Untergrundereignissen ergibt sich eine statistische Aussage, ob möglicherweise Dunkle Materie erzeugt wurde.

Signaturen und Modelle

Um die Suche nach Mono-Jet-Ereignissen oder ähnlichen speziellen Signaturen zu optimieren und die Ergebnisse zu interpretieren, kommen häufig sogenannte vereinfachte Modelle („simplified models“) zur Anwendung. Vereinfachte Modelle erweitern das Standardmodell nur minimal, in der Regel um einen einzelnen Wechselwirkungsprozess, der die Teilchen der Dunklen Materie an diejenigen des Standardmodells koppelt. Ein Beispiel ist das Higgs-Portal-Modell, demzufolge die Dunkle Materie über das Higgs-

Teilchen mit den Teilchen des Standardmodells interagiert. Daneben gibt es Suchstrategien, die auf einer vollständig ausformulierten Erweiterung des Standardmodells basieren. Dazu muss nicht a priori die Dunkle Materie als Motivation dienen. Ein prominentes Beispiel ist die Suche nach Teilchen, die in supersymmetrischen Modellen auftreten. In diesem Fall sollten sich die Endzustände durch sehr viele produzierte Teilchen auszeichnen. Signatur für die Dunkle Materie wäre wiederum ein fehlender Transversalimpuls.

Im Vergleich zu vollständig ausformulierten Theorien erweist sich die Suche mit vereinfachten Modellen oftmals als weniger empfindlich. Dafür deckt sie ein breiteres Spektrum an Kandidaten für die Dunkle Materie ab. Bei ATLAS und CMS werden beide Ansätze verfolgt, um möglichst flexibel zu sein. Im Folgenden gehen wir nur auf Ergebnisse ein, die auf vereinfachten Modellen beruhen. Dazu gehören die Suche nach Mono-Jet-Signaturen in ATLAS [2] und die Suche nach Higgs-Portal-Signaturen in CMS [3].

Ein Jet im Alleingang

Kollisionsereignisse, die sich durch (mindestens) einen Jet mit hohem Transversalimpuls und die Abwesenheit anderer Signale im Detektor auszeichnen, weisen einen hohen fehlenden Transversalimpuls auf. Solche Ereignisse bilden die sogenannten Signalregionen der Mono-Jet-Suche. Manche Prozesse, die im Rahmen des Standardmodells zu erklären sind, können ebenfalls solche Signaturen im Detektor hinterlassen. Dazu gehört die Produktion von Z- oder W-Bosonen zusammen mit Jets und der anschließende Zerfall dieser Bosonen in Endzustände mit Neutrinos. Diese Prozesse erzeugen einen Untergrund in der Signalregion, der sich mithilfe von Simulationen bestimmen lässt. Die Simulationen beinhalten den Kollisionsprozess, eine Beschreibung des Detektors sowie die Wechselwirkung der Teilchen im Detektor, die aus der Kollision hervorgehen. Die simulierten Ereignisse können in der gleichen Weise analysiert werden wie die Daten des Experiments. Um zu testen, ob die Simulation den Untergrund gut beschreibt, dienen Kontrollregionen, die nicht mit der Signalregion überlappen. In der Kontrollregion liegen gezielt ausgewählte Kollisionsereignisse, die vorrangig von einem eindeutig identifizierbaren Prozess stammen, der eng mit dem Untergrundprozess verwandt ist. Der Vergleich der Daten in dieser Region mit der entsprechenden Simulation erlaubt es, diese für die Vorhersage des jeweiligen Untergrunds anzupassen und zu optimieren.

Sobald der erwartete Untergrund bekannt ist, lässt sich die Anzahl der Ereignisse für einen fehlenden Transversalimpuls p_T^{miss} mit den gemessenen Werten vergleichen (**Abb. 3**). Dabei fällt zunächst auf, dass etwa 90 Prozent des

Untergrunds aus der Produktion von Z- und W-Bosonen stammen, wobei die Anzahl dieser Ereignisse für einen fehlenden Transversalimpuls von 250 GeV etwa 2000-mal höher ist als bei 1,2 TeV. Ereignisse mit einem hohen fehlenden Transversalimpuls kommen im Standardmodell also deutlich seltener vor als solche mit niedrigeren Werten. Das Spektrum für Ereignisse, bei denen Dunkle Materie erzeugt wurde, fällt dagegen weniger steil ab. Wenn sich solche Ereignisse tatsächlich in den Daten befinden, sollten sie sich insbesondere durch einen Überschuss an Ereignissen bei sehr hohem fehlenden Transversalimpuls zeigen. Beim Vergleich des Verhältnisses der gemessenen Daten zur Summe aller Untergrundeignisse zeigt sich aber kein signifikanter Überschuss. Der Mono-Jet-Kanal liefert demnach bisher keine Hinweise auf die Produktion Dunkler Materie. Allerdings lassen sich bereits die Parameterbereiche einiger interessanter theoretischer Modelle einschränken, beispielsweise solche, bei denen die Dunkle Materie über ein zusätzliches Eichboson an die Teilchen des Standardmodells koppelt (Abb. 3, grün gestrichelt).

Das Higgs-Portal

Für Higgs-Portal-Modelle ergibt sich eine Signatur, die den Mono-Jet-Ereignissen ähnelt, weil das Higgs-Teilchen darin in Dunkle Materie zerfallen kann und für den Detektor unsichtbar bleibt. Dabei stammen beobachtete Jets aber aus der Produktion des Higgs-Teilchens. Deshalb haben sie besondere Eigenschaften, die es erlauben, solche unsichtbaren Higgs-Zerfälle effektiv von Untergrundprozessen zu trennen. Entspricht beispielsweise die invariante Masse des Jet-Systems der Masse des Z-Bosons, kann dieses Ereignis

aus der assoziierten Produktion eines Higgs-Teilchens und eines Z-Bosons stammen. Die CMS-Kollaboration hat mehrere Suchen nach unsichtbaren Higgs-Zerfällen kombiniert [3] und dabei eine Ausschlussgrenze für das Verzweigungsverhältnis des Higgs-Zerfalls in unsichtbare Endzustände erhalten, die bei 0,26 liegt (95 %-Vertrauensniveau). Die Produktionsrate der Higgs-Teilchen beruht bei der Analyse auf der Vorhersage des Standardmodells.

Besonders interessant sind diese Limits im Vergleich mit anderen Suchstrategien. Im Rahmen eines Higgs-Portal-Modells besteht beispielsweise ein Zusammenhang zwischen dem Verzweigungsverhältnis für unsichtbare Zerfälle des Higgs-Bosons und der Wahrscheinlichkeit für die Streuung von Dunkler Materie an Nukleonen. Die Ergebnisse vom Large Hadron Collider lassen sich also mit den Resultaten aus der direkten Suche nach Teilchen der Dunklen Materie vergleichen (Abb. 4). Bei einem Vertrauensniveau von 90 Prozent liefern die Protonenkollisionen für niedrige Massen die stärksten Einschränkungen der Higgs-Portal-Modelle im Parameterraum aus Teilchenmasse und Streuquerschnitt. Bei größeren Massen sind direkte Suchen sensitiver. Insbesondere ist für $m_{DM} > m_h/2$ der Zerfall des Higgs-Teilchens in Dunkle Materie kinematisch verboten, sodass die Analyse der CMS-Daten oberhalb von etwa 60 GeV nicht mehr sensitiv ist.

Bei solchen Vergleichen unterschiedlicher Suchstrategien gilt es immer, die intrinsischen Beschränkungen der individuellen Suchen zu berücksichtigen. Im Fall der Suchen mit Collider-Experimenten heißt das insbesondere, dass die Entdeckung eines „unsichtbaren“ Teilchens noch nicht beweist, dass es tatsächlich zur Dunklen Materie im Universum beiträgt. Beispielsweise könnte es sich um ein

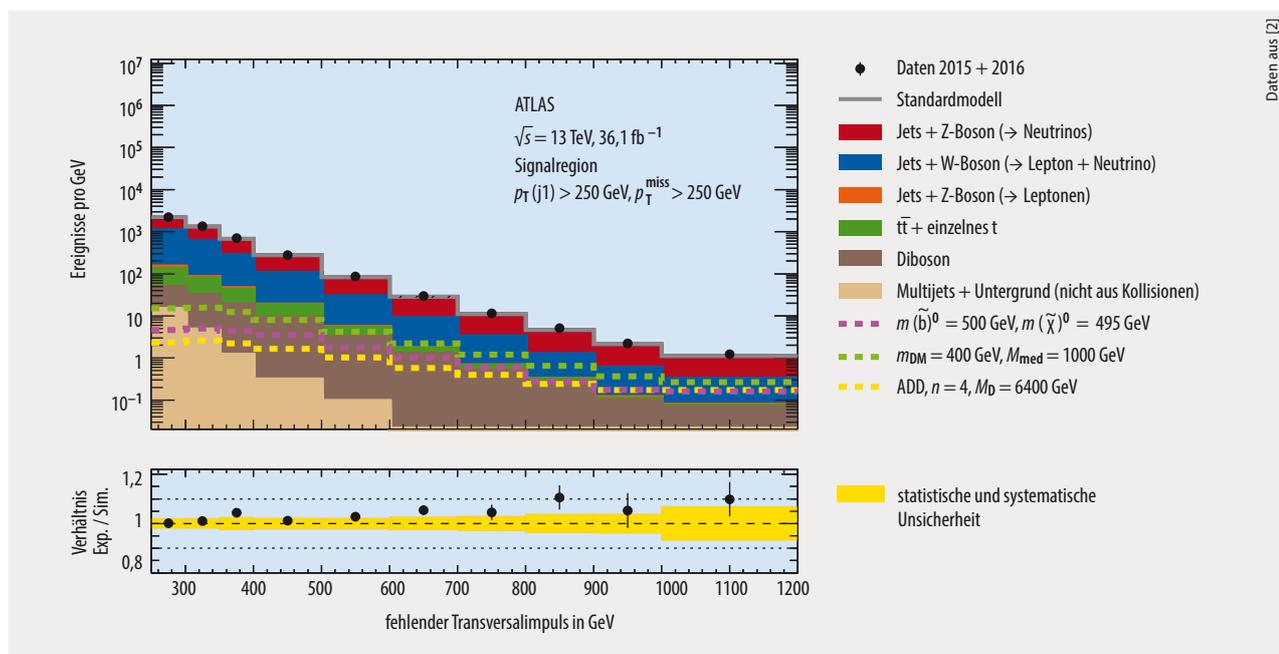
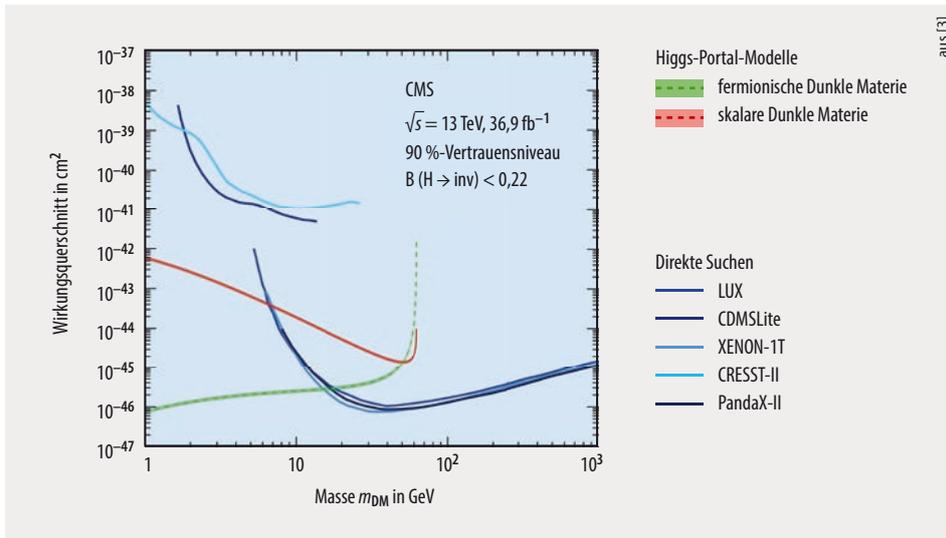


Abb. 3 Die gemessenen Verteilungen des fehlenden Transversalimpuls von Mono-Jet-Ereignissen im ATLAS-Detektor (oben, schwarz) lassen sich mit der Vorhersage des Untergrunds aus dem Standardmodell vergleichen, der sich aus mehreren Beiträgen zusammensetzt (farbiges Histogramm). Auch jenseits des Stan-

dardmodells sind Beiträge zu erwarten (gestrichelt), insbesondere durch Dunkle Materie (grün). Das Verhältnis aus gemessenen und vorhergesagten Ereignissen (unten, schwarz) zeigt im Rahmen der statistischen und systematischen Unsicherheiten (gelb) keine signifikanten Abweichungen.



aus [3]

Abb. 4 Die Ausschlussgrenzen des Streuquerschnitts für Dunkle Materie mit Nukleonen sind für die Daten von CMS unter der Annahme gezeigt, dass die Dunkle Materie aus skalaren Teilchen (rot) oder Fermionen (grün) besteht. Die Resultate verschiedener direkter Suchen (blau) ergeben auf einem 90 %-Vertrauensniveau obere Grenzen für den Wirkungsquerschnitt, die ab einer Masse von etwa 10 GeV niedriger liegen.

instabiles Teilchen handeln, dessen Lebensdauer lang genug ist, um den Detektor ohne ein Signal zu verlassen, aber dennoch kürzer als das Alter des Universums. Ein solches Teilchen kommt nicht als Kandidat für die Dunkle Materie infrage, weil diese auf der Zeitskala von einigen zehn Milliarden Jahren stabil sein muss.

Ein Blick in die Zukunft

Obwohl die Suche nach Dunkler Materie am Large Hadron Collider den Parameterraum vieler Modelle bereits signifikant eingeschränkt hat und noch deutlich weiter einschränken wird, ist eine Entdeckung nicht garantiert. Eventuell ist die Produktion von Dunkler Materie in Form von WIMPs an zukünftigen Beschleunigerexperimenten mit höheren Kollisionsenergien möglich. Die Suche nach solchen Ereignissen ist daher ein zentrales Argument für den Bau neuer Teilchenbeschleuniger [4, 5].

Leichte Dunkle Materie mit einer Masse unterhalb von einem GeV ließe sich auch in sogenannten Fixed Target- oder Beam Dump-Experimenten erzeugen. Dabei trifft ein hochenergetischer Teilchenstrahl auf ein feststehendes Target. Aufgrund der höheren Luminosität ist es dabei möglich, zu kleineren Wirkungsquerschnitten vorzudringen als bei Collider-Experimenten. Am sensitivsten ist derzeit das NA64-Experiment am CERN. Zukünftige Projekte dieser Art sind beispielsweise SHiP am CERN, BDX in Mainz und LDMX, das am CERN oder am SLAC entstehen könnte. Auch die Nahdetektoren der Experimente DUNE am Fermilab und T2HK im J-PARC, deren primäres Ziel die Untersuchung von Neutrinooszillationen ist, wären geeignet.

Falls WIMPs entdeckt werden, können aber selbst die leistungsstärksten Beschleuniger in Zukunft nicht allein unser Verständnis der Dunklen Materie vervollständigen. Nur im Zusammenspiel unterschiedlicher Suchstrategien, welche die direkte Suche nach der Streuung Dunkler Materie in unterirdischen Präzisionsdetektoren und die Suche nach den Annihilations- oder Zerfallsprodukten der Dunklen Materie in der kosmischen Strahlung einschließen, ist dies möglich.

Literatur

- [1] N. Aghanim et al. (Planck Collaboration), arXiv: 1807.06209 (2018)
- [2] ATLAS Collaboration, JHEP **01**, 126 (2018)
- [3] CMS Collaboration, Phys. Lett. B **793**, 520 (2018)
- [4] J. Bramante et al., Phys. Rev. D **93**, 063525 (2016)
- [5] A. Abada et al. (FCC Collaboration), Eur. Phys. J. C **29**, 474 (2019)

Die Autoren

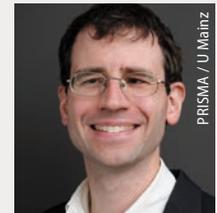


DESY

David Berge (FV Teilchenphysik) studierte Physik an der HU Berlin und promovierte am MPI für Kernphysik, Heidelberg. Danach arbeitete er am CERN und an der U Amsterdam. Als Professor für experimentelle Teilchen- und Astroteilchenphysik an der HU Berlin und leitender Wissenschaftler bei DESY

beschäftigt er sich mit kosmischen Teilchenbeschleunigern und sucht mit der ATLAS-Kollaboration nach Dunkler Materie.

Joachim Kopp (FV Teilchenphysik) studierte Physik an der TU München und promovierte 2009 in Heidelberg. Nach Stationen am Fermilab und am MPI für Kernphysik wurde er 2014 auf eine Professur für theoretische Teilchenphysik an der U Mainz berufen. Seit 2018 absolviert er einen mehrjährigen Forschungsaufenthalt am CERN.



PRISMA / U Mainz

Schwerpunkte seiner Arbeit sind Neutrinos und Dunkle Materie.

Ruth Pöttgen (FV Teilchenphysik) studierte und promovierte an der U Mainz. Als PostDoc in der ATLAS-Gruppe an der U Stockholm beschäftigte sie sich mit Signaturen von Physik jenseits des Standardmodells, bis sie 2017 eine „Tenure Track“-Assistenzprofessur an der U Lund antrat. Dort sucht sie mit den Experimenten ATLAS und LDMX nach Dunkler Materie.



E. Barendahl

Prof. Dr. David Berge, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Platanenallee 6, 15738 Zeuthen, **Prof. Dr. Joachim Kopp**, Theoretical Physics Department, CERN, 1211 Genf 23, Schweiz und Theoretical High Energy Physics, JGU Mainz, Staudingerweg 7, 55128 Mainz und **Dr. Ruth Pöttgen**, Fysiska Institutionen, Lunds Universitet, Professorsgatan 1, 22363 Lund, Schweden