

an der Grenzfläche so optimieren lässt, dass der zweidimensionale Charakter bei höherer Geschwindigkeit erhalten bleibt. Mit der Chemie der Grenzfläche zu spielen wird ebenso ein weiterer Schritt sein wie Untersuchungen zur zeitlichen Stabilität sowie zur möglichen Elektromigration.

Über das gegenwärtige Paar von SrTiO_3 und LaAlO_3 hinaus kann man sich ein breites Spektrum von anderen Materialkombinationen ausmalen und sich dabei die

herausragenden Eigenschaften der Oxidperowskite zunutze machen – wie die Hochtemperatur-Supraleitung, den kolossalen Magnetowiderstand, Ferroelektrizität usw. Die Forschungsarbeiten an SrTiO_3 und LaAlO_3 haben Bednorz und Müller die wunderbare Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung beschert. Wer weiß, welche Überraschungen die Grenzflächen, an denen sich diese Materialien treffen, noch bereit halten?

Hans Hilgenkamp

- [1] N. Reyren et al., *Science* **317**, 1196 (2007)
- [2] A. D. Caviglia et al., *Nature* **456**, 624 (2008)
- [3] G. Rijnders und D. H. A. Blank, *Nature* **433**, 369 (2005)
- [4] A. Ohtomo und H. Y. Hwang, *Nature* **427**, 423 (2004)
- [5] J. G. Bednorz und K. A. Müller, Nobel Lecture 1987, *Rev. Mod. Phys.* **60**, 585 (1988)
- [6] A. Brinkman et al., *Nature Materials* **6**, 493 (2007)
- [7] C. Cen et al., *Nature Materials* **7**, 298 (2008)

Prof. Dr. Hans Hilgenkamp, Condensed Matter Physics and Devices, Faculty of Science and Technology and MESA+ Institute for Nanotechnology, University of Twente, P.O. Box 217, 7500 AE Enschede, Niederlande

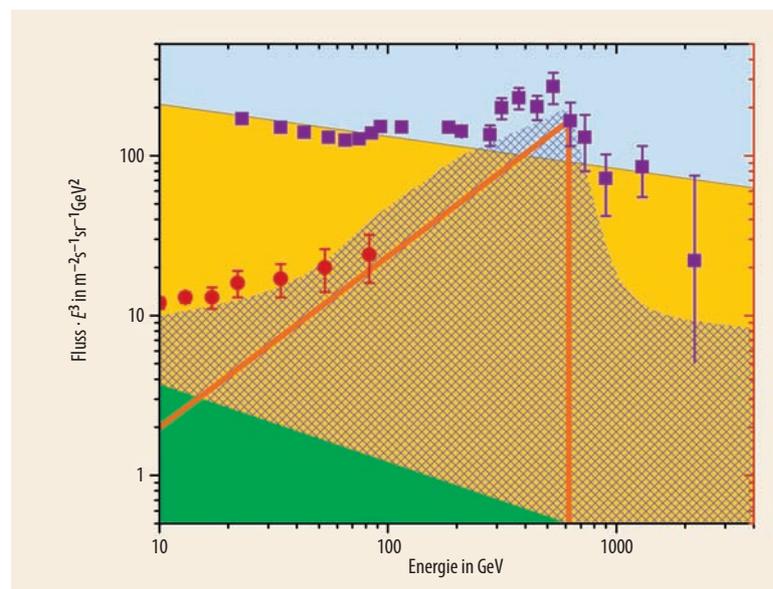
■ Anomalie im Kosmos

Die PAMELA-Kollaboration hat in der Kosmischen Strahlung Positronen bis zu Energien von 100 GeV detektiert und findet dabei einen überraschenden Überschuss.

Die Kosmische Strahlung, die ständig auf die Erde einprasselt, besteht überwiegend aus Protonen und α -Teilchen, aber in geringerem Umfang auch aus Elektronen. Die Häufigkeit dieser Teilchen nimmt als Funktion der Energie mit einem Potenzgesetz steil ab. Zu einem äußerst geringen Anteil enthält die Kosmische Strahlung auch Antiteilchen – diese entstehen lediglich durch die Wechselwirkung der primären Teilchen mit dem interstellaren Gas oder durch exotische Prozesse wie die Paarvernichtung von bisher unbekanntem Teilchen der Dunklen Materie. Bei Energien von 10 GeV sollte das Verhältnis zwischen Positronen und Elektronen daher nur 1:50 betragen [1]. Das internationale Satellitenexperiment PAMELA, an dessen Aufbau auch Manfred Simon von der Universität Siegen beteiligt war, hat nun jedoch bei der Analyse der zwischen Juli 2006 und Februar 2008 aufgezeichneten Daten ein unerwartet starkes Ansteigen des Positronenflusses relativ zum Gesamtfluss aus Elektronen und Positronen bei Energien zwischen 1,5 und 100 GeV gefunden [2]. Bereits im November 2008 hatte das Ballonexperiment ATIC in fast 40 Kilometer Höhe spektakuläre Hinweise auf eine weitere Anomalie bei noch höheren Energien

geliefert [3]. Die auffällige Schulter im ATIC-Spektrum, das allerdings nicht zwischen Elektronen und Positronen unterscheidet, lässt sich als Fortsetzung des PAMELA-Positronenspektrums interpretieren (Abb.). In diesem Fall würde der Positronenanteil im Maximum der ATIC-Schulter bei 620 GeV nahe am Maximalwert von 50 Prozent für ein reines Paarplasma liegen.

Grundsätzlich ist wohl einige Vorsicht im Umgang mit Daten angebracht, die mit schwer kontrollierbaren systematischen Fehlern behaftet sein können. Die rasch einsetzende Lawine von Publikationen zeigt jedoch schon jetzt einige weitreichende Konsequenzen auf, die vor allem den möglichen Zusammenhang mit dem Problem der Dunklen Materie



Als Funktion der Energie sollte der Fluss der primären Elektronen und der sekundären Positronen der Kosmischen Strahlung abfallen (gelbe bzw. grüne Kontur). Sowohl der von ATIC gemessene Gesamtfluss von Elektronen und Positronen (violette Quadrate) als auch der von PAMELA gemessene Positronenfluss (rote

Kreise) weichen davon jedoch ab. Als Erklärung der Anomalie werden die Anihilation von Kaluza-Klein-Teilchen mit einer Ruhemasse von 620 GeV im geklumpten Dunkelmateriehalo der Milchstraße (orange Linie) oder relativistische Elektronen und Positronen aus nahen Pulsaren diskutiert (blaue Schraffur).

1) Diese ist von der Größenordnung der elektroschwachen Symmetriebrechungsskala $E_{ew} = (\sqrt{2} G_F)^{-1/2} = 246 \text{ GeV}$.

betreffen. Effektive Theorien der Quantengravitation sagen neue Teilchen voraus, die eine wichtige Komponente der Dunklen Materie bilden könnten und nach Theodor Kaluza und Oskar Klein benannt sind. Diese hatten in den Zwanzigerjahren des letzten Jahrhunderts eine Theorie der Gravitation und des Elektromagnetismus mit einer aufgerollten (kompaktifizierten) fünften Dimension formuliert. Um die Daten zu verstehen, müssten bei der Annihilation von Kaluza-Klein-Teilchen überwiegend Elektronen und Positronen mit Energien von 620 GeV entstehen. Diese Energien sind konsistent mit der theoretisch vorhergesagten Ruhemasse der KK-Teilchen.¹⁾

Aus Sicht der Teilchenphysik erscheint es in einem generischen Szenario allerdings sehr problematisch, dass die Annihilationsreaktion $KK + KK \rightarrow e^+ + e^-$ dominieren sollte – dies wäre aber notwendig, um das Positronen/Elektronenverhältnis von 1:1 zu erklären [4]. Plausibler wäre es, wenn auch Photonen bei der Annihilation entstünden, die sich als Gammastrahlung nachweisen lassen. Dafür liefern Gamma-beobachtungen des Galaktischen Zentrums, wo die Annihilation von KK-Teilchen als Dunkler Materie vor allem stattfinden sollte, allerdings keinen Hinweis [5]. Aus

Sicht der Kosmologie müsste auch noch gezeigt werden, dass bei der erforderlichen relativ starken Selbstwechselwirkung genügend KK-Teilchen im frühen Universum produziert werden können, um die Dunkle Materie zu erklären. In jedem Fall würden die Energieverluste bei der Ausbreitung der Elektronen und Positronen durch das interstellare Medium auch bei hohen galaktischen Breiten sehr helle Synchrotronstrahlung verursachen, für die die Satelliten COBE und WMAP bei ihren Himmelsdurchmusterungen keine Anzeichen gefunden haben.

Für die Anomalie könnten auch astrophysikalische Quellen von relativistischen Elektronen und Positronen verantwortlich sein, die wegen ihrer Gammastrahlung schon seit langem bekannt sind [6]. Gegenwärtig beobachtet das Weltraumobservatorium Fermi Gammastrahlung von 80 MeV bis 100 GeV. Fermi findet zahlreiche Pulsare, die dem bereits länger bekannten Geminga-Pulsar ähneln und praktisch nur aufgrund ihrer Gammastrahlung sichtbar sind [7]. Sie sind die Überreste von Kernkollaps-Supernovae und beziehen ihre Energie aus der elektromagnetischen Abbremsung extrem schnell rotierender Neutronensterne, wobei ultrarelativistische Elektronen und Positronen im Verhältnis 1:1 entstehen.

Aufgrund der geringen Entfernung Gemingas von ungefähr 500 Lichtjahren sollte eine schwache Anisotropie der Elektronen und Positronen existieren, die sich möglicherweise beobachten lässt. MILAGRO beobachtet Gammastrahlung im multi-TeV Bereich von einer ausgedehnten Region um Geminga [8]. Schon wenige nahe Pulsare vom Geminga-Typ würden ausreichen, die Anomalie zu erklären, wenn sie mit sehr hoher Effizienz Elektronen und Positronen emittieren [9]. Zum Verständnis von Pulsaren und ihrer Effizienz bei der Bildung von Winden aus Elektron-Positron-Paaren werden Daten von Tscherenkow-Teleskopen wie MAGIC, VERITAS oder H.E.S.S. bei Energien oberhalb von 100 GeV beitragen. Ob in den Quellen der Anomalie auch relativistische Nukleonen produziert werden, sollten Messungen mit dem ICECUBE-Teleskop für Neutrinos zeigen. Das AMANDA-II-Experiment verzeichnet in der Geminga-Region eine marginale Häufung von Ereignissen [10]. Man darf gespannt sein, wie sich die Interpretation dieses komplexen astrophysikalischen Sachverhalts nun im Licht neuer Beobachtungen, die Elektronen und Positronen, Gammastrahlung und Neutrinos abdecken, weiter entwickeln wird.

Karl Mannheim und Dominik Elsässer

KURZGEFASST

■ Ende einer langen Kontroverse?

Vor 100 Jahren führten Hermann Minkowski und Max Abraham eine Kontroverse über eine scheinbar einfache, aber bis heute offene Frage: Wie groß ist der Impuls von Licht in einem Medium mit Brechungsindex n ? Laut Abraham sollte der Impuls verglichen mit Vakuum das $1/n$ -fache betragen, da die Geschwindigkeit im Medium abnimmt, laut Minkowski jedoch das n -fache, da die Wellenlänge im Medium geringer ist. Chinesische Physiker haben nun Laserpulse durch eine Quarzfaser mit einem freien Ende geschickt und beobachtet, dass diese sich biegt, wenn das Licht sie verlässt. Sie interpretieren dies als Rückstoß, da der Lichtimpuls beim Verlassen der Faser zunimmt – demnach hatte Abraham Recht. *W. She, J. Yu und R. Feng et al., Phys. Rev. Lett.* **101**, 243601 (2008)

■ Tanz auf dem Seifenfilm

Chaos zu erzeugen, fällt Physikern vor allem auf ihrem Schreibtisch leicht. Zwei Wissenschaftler aus Belgien bzw. den USA haben jetzt einen sehr einfachen chaotischen Oszillator in einem Fluid analysiert: Dazu ließen sie einen Wassertropfen auf einem horizontalen Seifenfilm, der vertikal oszillierte, „tanzen“. Solange der Tropfen keine Energie gewinnt oder verliert, hüpfert er periodisch auf und ab. Sobald aber Energie zwischen Tropfen und Seifenfilm übertragen wird, geht die Bewegung ins Chaos über. Dies ist ein Lehrbuchbeispiel für einen chaotischen Oszillator, der sich mit nur einer Differentialgleichung beschreiben lässt. Ihre numerische Lösung enthält alle Eigenschaften der Bewegung. *T. Gilet und J. W. M. Bush, Phys. Rev. Lett.* **102**, 014501 (2009)

Prof. Dr. Karl Mannheim und Dipl.-Phys. Dominik Elsässer, Lehrstuhl für Astronomie, Universität Würzburg, Am Hubland, D-97074 Würzburg

- [1] I. V. Moskalenko und A. W. Strong, *Astrophys. J.* **493**, 694 (1998)
- [2] O. Adriani (PAMELA), eingereicht bei *Nature*, arXiv:0810.4995v1 (2008); A. Morselli und I. Moskalenko, Identification of Dark Matter conference (IDM2008), Stockholm 2008, arXiv:0811.3526v1 (2008)
- [3] J. Chang et al. (ATIC Collaboration), *Nature* **456**, 362 (2008)
- [4] L. Bergström, G. Bertone, T. Bringmann, J. Edsjö und M. Taoso, arxiv:0812.3895 (2008)
- [5] F. A. Aharonian et al. (HESS) *Phys. Rev. Lett.* **97**, 221102 (2006); Erratum-ibid. **97**, 249901 (2006); J. Albert et al. (MAGIC), *Astrophys. J.* **63**, L101 (2006)
- [6] F. A. Aharonian, A. M. Atayan und H. J. Voelk, *A&A* **294**, L41 (1995)
- [7] R. Cowen, *ScienceNews* **175**, 5 (2009)
- [8] H. Yüksel, M. D. Kistler und T. Stanev, arXiv:0810.2784 (2008)
- [9] S. Profumo, arXiv:0812.4457 (2008)
- [10] ICECUBE Collaboration, arXiv:0809.1646v2 (2008)