

femto

Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 02/19



Heiß begehrt

DUNKLE MATERIE

Auf der Jagd nach neuen Teilchen

Asteroiden verraten
Größe ferner Sterne

Wassersensoren aus
dem 3D-Drucker

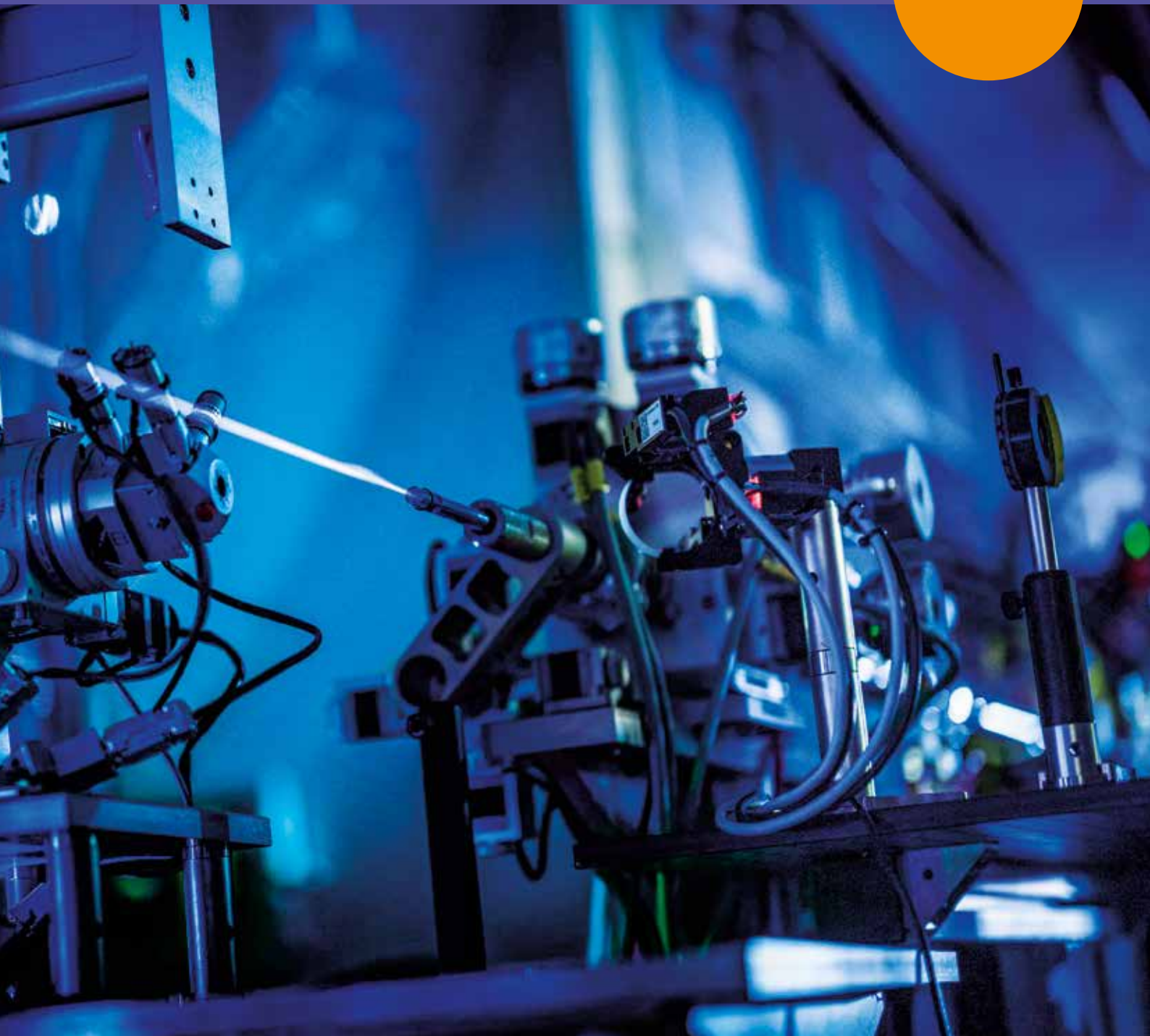
Mit Gold Krankheiten
aufspüren





Der stärkste Röntgenlaserstrahl der Welt

Der European XFEL ist der größte Röntgenlaser der Welt und produziert extrem starkes Röntgenlicht, mit dem Wissenschaftler beispielsweise Bilder von Molekülen aufnehmen. Es ist milliardenfach heller als das herkömmlicher Röntgenstrahlungsquellen, aber sehen kann man den Strahl eigentlich nicht, denn Röntgenlicht ist für das Auge unsichtbar. Auf diesem Bild haben Forscher gemeinsam mit einem Fotografen den Röntgenlaserstrahl, der in einem 3,4 Kilometer langen unterirdischen Tunnel zwischen DESY und der Experi-



zwischen DESY und der Experimentierhalle in Schenefeld bei Hamburg erzeugt wird, erstmals sichtbar gemacht. Möglich ist das, weil der Röntgenstrahl den Stickstoff in der Luft zum Leuchten anregt, wenn die Moleküle seinen Weg kreuzen.

Das Prinzip ähnelt dem einer Leuchtstoffröhre, bei der die angelegte Hochspannung das Gas im Inneren der Röhre zum Leuchten bringt. Trotz der extrem hohen Intensität des Strahls ist das Leuchten des

Stickstoffs vergleichsweise schwach und wäre mit bloßem Auge nicht so leicht zu erkennen. So deutlich sichtbar wie auf dem Foto wird der Strahl erst bei völliger Dunkelheit und einer Belichtungszeit von 90 Sekunden. Fotografiert wurde ein Strahl von einem Millimeter Durchmesser, der aus 800 Blitzen pro Sekunde besteht. Da sich während der Experimente niemand in der Experimentierstation aufhalten darf, hat der Fotograf die Kamera vom benachbarten Kontrollraum aus ferngesteuert.

Inhalt

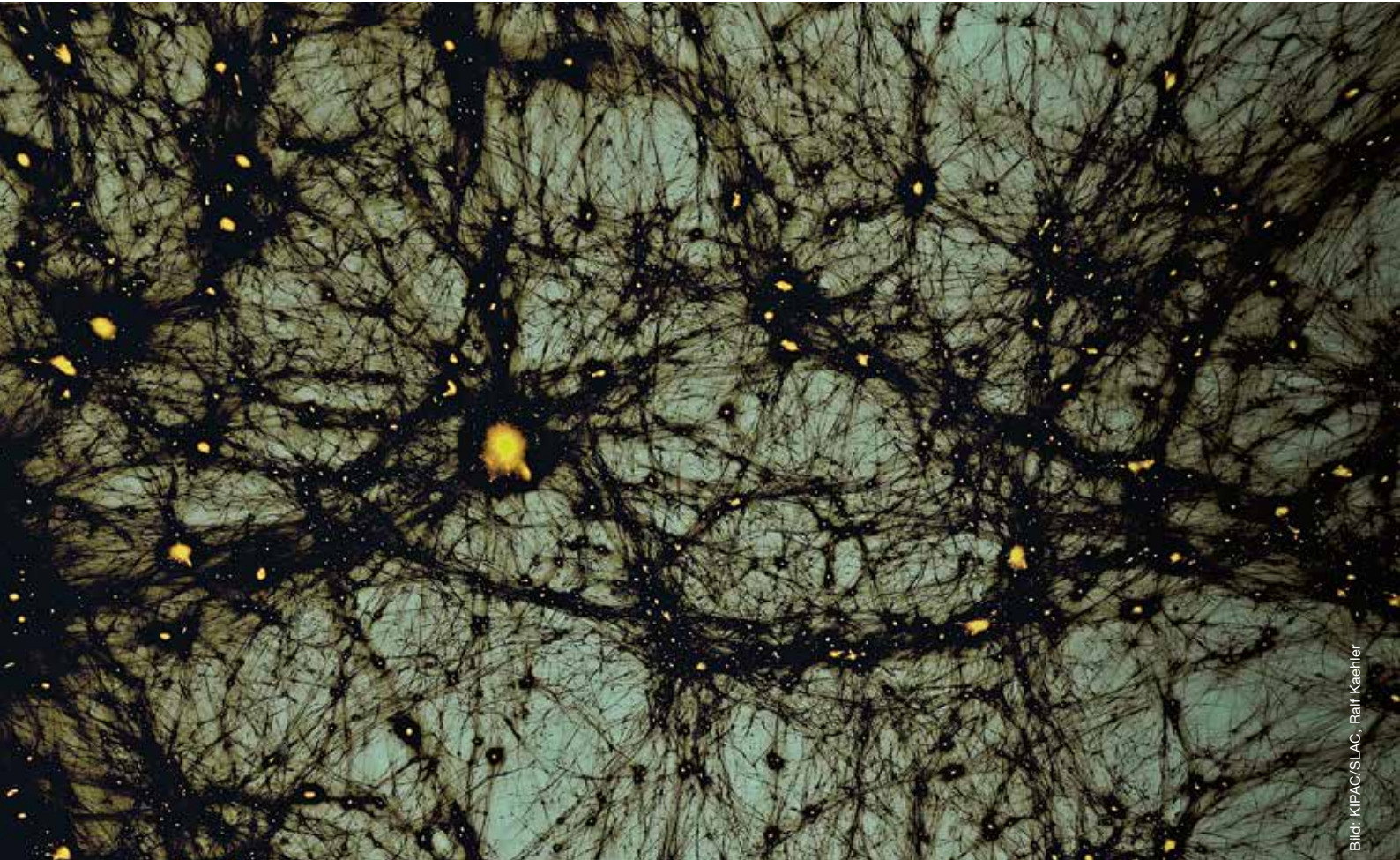


Bild: KIPAC/SLAC, Ralf Kaehler

ZOOM

DUNKLE MATERIE

Auf der Jagd nach neuen Teilchen

Die Suche nach der geheimnisvollen Dunklen Materie beschäftigt die Physik seit vielen Jahrzehnten. Bereits in den 1930er Jahren hatten sich Astronomen über einen merkwürdigen Befund gewundert: Galaxienhaufen hielten zusammen, obwohl sie eigentlich auseinanderfliegen sollten. Neben den sichtbaren Himmelskörpern – Sternen, Planeten und Staubwolken – muss es zusätzlich eine unsichtbare Masse geben, deren Gravitation Galaxien im Zaum hält. Doch woraus besteht diese ominöse Dunkle Materie, ohne die sich kaum erklären lässt, wie sich Galaxien und Galaxienhaufen im Laufe der Entstehungsgeschichte des Weltalls gebildet haben? Vielleicht aus noch unentdeckten, ultraleichten oder überaus schweren Elementarteilchen? Und was haben Schwarze Löcher damit zu tun? Rund um den Globus läuft die Suche, und bald könnte eine neue Generation von Experimenten das Geheimnis der Dunklen Materie endlich lüften.



06



12



33

CAMPUS

- 06 Asteroiden verraten Größe ferner Sterne**
Gammateleskop-Technik bestimmt bislang kleinsten Winkeldurchmesser
- 08 Boost für die Plasma-beschleunigung**
Laserbohrer ermöglicht neuen Weltrekord
- 10 Druckbare Wassersensoren**
Röntgenuntersuchung zeigt Arbeitsweise von funktionaler Verbindung auf Kupferbasis
- 36 Mit Gold Krankheiten aufspüren**
Neue Diagnosemöglichkeiten in der Medizin
- 38 Platin schlägt Nanoblasen**
Technisch wichtiges Edelmetall oxidiert schneller als erwartet
- 40 Biegsame Schaltkreise für den 3D-Druck**
Neues Verfahren für flexible und transparente Elektronik

ZOOM

- 12 Dunkle Materie**
Auf der Jagd nach neuen Teilchen
- 26 Kluges Upcycling**
Wie das Hightech-Experiment ALPS II mit gebrauchten Magneten nach Dunkler Materie sucht
- 28 Die Kunst der Dunklen Materie**
Interview mit DESY-Physiker Christian Schwanenberger zu einem besonderen Kunstprojekt

SPEKTRUM

- 30 Forschung kompakt**
- Was Spinnen an der Decke hält
 - Parkinson-Symptome durch Mangan-Vergiftung
 - Hologrammtechnik misst extrem kurze Lichtpulse
 - Neuer Blick ins Erdinnere
 - Gammastrahlung aus der Superblase
 - Meteoriteneinschläge im Labor
 - Neues Gas für Plasmalinsen
 - Medikamentenschleuse im Röntgenlicht
 - Kontrolle aus dem Nichts
 - Flüssigkeiten kristallisieren in Nanometerspalten

RUBRIKEN

- 02 femtoskop**
Röntgenlaserstrahl sichtbar gemacht
- 39 femtopolis**
Warum Gewitterwolken mehrfach blitzen

- 35 femtomenal**
Der kürzeste UV-Laserpuls der Welt
- 42 femtofinale**
Rezept für ein Universum

Asteroiden verraten Größe ferner Sterne

Gammateleskop-Technik verdoppelt Auflösungsvermögen astronomischer Winkelmessungen

Wenn ein Asteroid vor einem Stern vorbeizieht, entsteht ein Beugungsmuster (hier deutlich übertrieben dargestellt), aus dem sich der Durchmesser des Sterns bestimmen lässt.

Mit Hilfe der besonderen Eigenschaften von Gammastrahlenteleskopen haben Forschende die Durchmesser ferner Sterne bestimmt. Die Messungen mit dem Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System (VERITAS) liefern die Größe eines Riesensterns in 2674 Lichtjahren Entfernung und eines sonnenähnlichen Sterns in 700 Lichtjahren Distanz. Die Arbeit des Teams um Tarek Hassan von DESY und Michael

Daniel vom Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) etabliert eine neue Methode zur Bestimmung von Sterndurchmessern und liefert die bislang kleinsten Winkeldurchmesser von Sternen am Firmament.

Nahezu jeder Stern am Nachthimmel ist selbst für die besten Teleskope zu weit entfernt, um seine Größe direkt zu bestimmen. Die Forschenden nutzten daher ein optisches Phänomen namens Diffraktion, um die Sterndurchmesser zu bestimmen. Dieser Effekt lässt sich

unter anderem beobachten, wenn ein Asteroid aus unserem Sonnensystem zufällig vor einem weit entfernten Stern vorbeiwandert.

„Die extrem schwachen Schatten von Asteroiden ziehen jeden Tag über uns hinweg“, erläutert Hassan. „Dabei ist der Rand des Schattens jedoch nicht scharf. Stattdessen ist der zentrale Schatten umgeben von Lichtmustern, die an kleine Wasserwellen erinnern.“ Die Physik bezeichnet das als Beugungsmuster. Es lässt sich in jedem Schülerlabor mit

Hilfe eines Lasers erzeugen, der auf eine scharfe Kante gerichtet wird.

Die Form des Musters erlaubt Rückschlüsse auf die Ausdehnung der Lichtquelle. Anders als das Beugungsmuster in einem Schülerlabor lässt sich das eines Sterns an einem Asteroiden jedoch nur sehr schwer messen. „Die Sternbedeckungen durch Asteroiden sind sehr schwer vorherzusagen“, sagt Daniel. „Und das Beugungsmuster lässt sich nur erkunden, indem man schnelle Schnappschüsse macht, während der Schatten über das Teleskop wandert.“ Astronomen haben auf diese Weise bereits Sterne vermessen, die vorübergehend vom Mond bedeckt wurden. Das funktioniert ungefähr bis zu einer scheinbaren Größe – also einem Winkeldurchmesser – von einer tausendstel Bogensekunde. Zum Vergleich: So groß würde eine Zwei-Cent-Münze auf dem Pariser Eiffelturm von New York aus erscheinen.

Augen für Sternenlicht

Allerdings sind nicht viele Sterne am irdischen Himmel so groß. Um noch kleinere Winkeldurchmesser zu bestimmen, nutzte das Team Tscherenkow-Teleskope. Diese

– auch für solche von Sternenlicht.

Mit den VERITAS-Tscherenkow-Teleskopen am Fred-Lawrence-Whipple-Observatorium im US-Bundesstaat Arizona ist es dem Team gelungen, das Beugungsmuster des Sterns mit der Katalognummer TYC 5517-227-1 einzufangen, während er am 22. Februar 2018 vorübergehend vom 60 Kilometer großen Asteroiden Imprinetta bedeckt wurde. Mit den VERITAS-Teleskopen ließen sich 300 Bilder pro Sekunde aufnehmen, woraus sich das Helligkeitsprofil des Beugungsmusters mit großer Genauigkeit rekonstruieren ließ. Daraus ergab sich die scheinbare Größe des Sterns am Himmel, also sein Winkeldurchmesser, zu 0,125 tausendstel Bogensekunden. Zusammen mit der Entfernung von 2674 Lichtjahren ergibt das einen Durchmesser des Sterns, der elfmal so groß ist wie der unserer Sonne. Damit ließ sich der Stern der Klasse der Roten Riesen zuordnen, was zuvor nicht eindeutig geklärt war.

Die Forschenden konnten drei Monate später zudem den Stern TYC 278-748-1 untersuchen, der am 22. Mai 2018 vom 88 Kilometer großen Asteroiden Penelope bedeckt wurde. Die Auswertung lieferte einen

„Unsere Pilotstudie etabliert eine neue Methode, um die Durchmesser von Sternen zu bestimmen“

Tarek Hassan, DESY

mit Tscherenkow-Teleskopen liefert eine zehnmal bessere Auflösung als die Standardmethode bei Sternbedeckungen durch den Mond. Und sie ist mindestens doppelt so scharf wie interferometrische Größenmessungen.“ Die Messungengenauigkeit der neuen Methode beträgt nach Angaben der Autoren gegenwärtig rund zehn Prozent. „Wir erwarten, dass sich das durch einen optimierten Aufbau deutlich verbessern lässt, etwa indem man die beobachteten Wellenlängen auf einen bestimmten Bereich einschränkt“, sagt Daniel. Da unterschiedliche Wellenlängen unterschiedlich gebeugt werden, verwischt das gemessene Beugungsmuster, wenn ein zu breiter Wellenlängenbereich aufgezeichnet wird.

„Unsere Pilotstudie etabliert eine neue Methode, um die Durchmesser von Sternen zu bestimmen“, fasst Hassan zusammen. Die Forschenden schätzen, dass geeignete Teleskope mehr als eine Asteroiden-Sternbedeckung pro Woche beobachten könnten. „Da ein Stern umso kleiner erscheint, je weiter er entfernt ist, bedeutet eine Verbesserung der Winkelauflösung auch eine Erweiterung der Reichweite solcher Beobachtungen“, erläutert der DESY-Forscher. „Wir schätzen, dass sich mit unserer Methode noch Sterne in zehnmal größerer Entfernung analysieren lassen als mit der Mondbedeckungsmethode.“ Die Technik könne damit genug Daten liefern, um eine größere Zahl von Sternen in sogenannten Populationsstudien zu untersuchen.

„Dies ist der kleinste Winkeldurchmesser eines Sterns, der je gemessen worden ist“

Michael Daniel, SAO

Instrumente sind darauf spezialisiert, das extrem kurze und schwache bläuliche Leuchten einzufangen, das entsteht, wenn ein energiereiches Teilchen oder Gammaquant aus dem Weltall auf die Erdatmosphäre trifft. Tscherenkow-Teleskope machen nicht die besten Bilder, aber dank ihrer großen Spiegelfläche, die gewöhnlich wie ein Insektenauge in sechseckige Einzelspiegel segmentiert ist, und ihrer leistungsfähigen Kameras sind sie besonders empfindlich für Lichtschwankungen

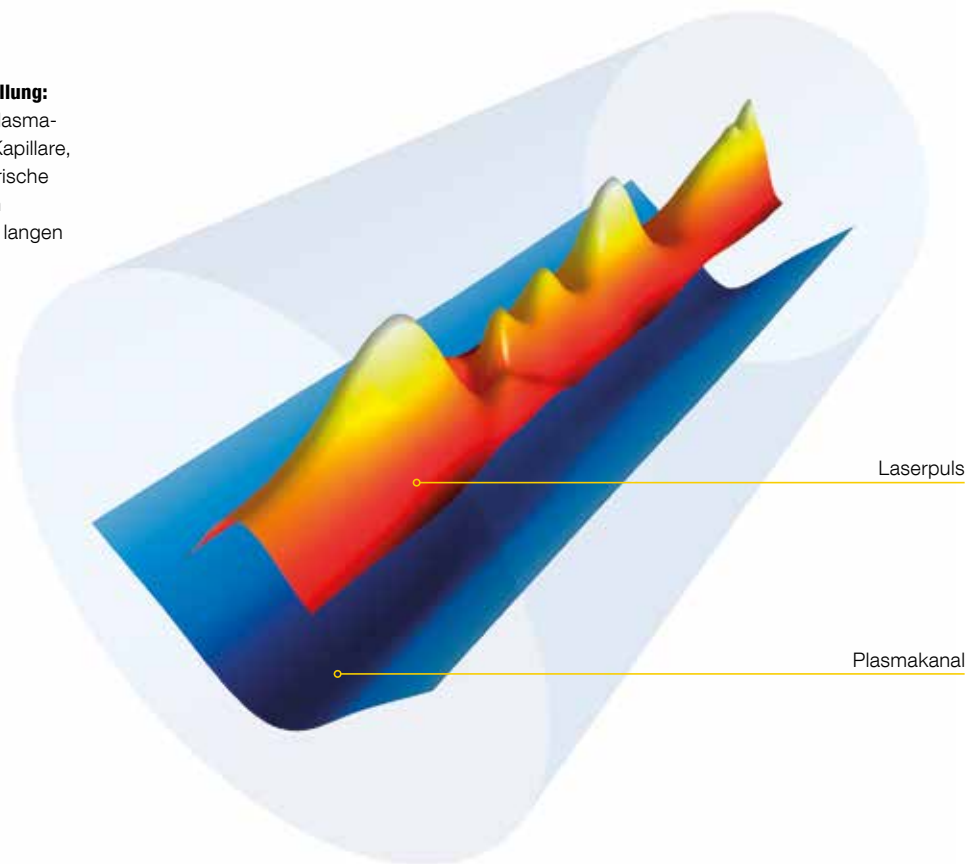
Winkeldurchmesser von 0,094 tausendstel Bogensekunden, was bei einer Entfernung von 700 Lichtjahren dem 2,17-fachen Sonnendurchmesser entspricht. Das deckt sich hervorragend mit einer früheren Schätzung, die mit Hilfe indirekter Methoden auf 2,173 Sonnendurchmesser gekommen war.

„Dies ist der kleinste Winkeldurchmesser eines Sterns, der je gemessen worden ist“, betont Daniel. „Die Beobachtung von Sternbedeckungen durch Asteroiden

Nature Astronomy, 2019;
DOI: 10.1038/s41550-019-0741-z

Künstlerische Darstellung:

Visualisierung des Plasmakanals (blau) in der Kapillare, der durch eine elektrische Entladung und einen acht Nanosekunden langen Laserpuls (rot/gelb) erzeugt worden ist.



Laserpuls

Plasmakanal

Bild: Keldysh Institute of Applied Mathematics, Gemady Bagdasarov, und Berkeley Lab, Anthony Gonsalves/Jean-Luc Vay

Boost für die Plasmabeschleunigung

Laserbohrer ermöglicht neuen Weltrekord

Wim Leemans, DESYs neuer Forschungsdirektor für den Bereich Beschleuniger, ist ein international profilierter Spitzenwissenschaftler und ein Pionier in der Entwicklung zukunftsweisender Laser-Plasmabeschleuniger. Bevor er im Februar 2019 zu DESY kam, leitete er den Forschungsbereich für Beschleunigertechnologien und Angewandte Physik am Berkeley Lab (Kalifornien, USA) sowie das Berkeley Lab Laser Accelerator (BELLA) Center. Gemeinsam mit seinem Team hat er dort wichtige Meilensteine für die neue Generation kompakter Teilchenbeschleuniger gelegt: Anfang des Jahres stellten die BELLA-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler mit einem „Laser-Plasmabohrer“ einen neuen Rekord für Plasmabeschleuniger auf. In einer nur 20 Zentimeter langen Plasmakapillare beschleunigten sie Elektronen auf 7,8 Milliarden Elektro-

nenvolt (Giga-Elektronenvolt, GeV) – ein Wert, für den die modernsten konventionellen Teilchenbeschleuniger mehrere hundert Meter benötigen.

„Diese neue Technologie eröffnet ganz neue Möglichkeiten, auch für unsere Arbeit bei DESY“

Ralph Abmann, DESY

Ein Plasma ist ein Gas, in dem den Molekülen ihre Elektronen entrissen wurden, so dass sich eine Mischung aus elektrisch positiv geladenen Gas-molekülen und elektrisch negativen Elektronen bildet. „Die Entwicklung stabiler Plasmabeschleuniger mit einer Energie nahe zehn Giga-Elektronenvolt markiert einen Meilenstein auf dem

Weg vom Labor zu ersten Anwendungen“, betont Leemans, der das Verfahren bei DESY weiterentwickeln wird. „Wir haben ein neues Konzept für den Werkzeugkasten der Plasmabeschleuniger-Forscher entwickelt. Und zusammen mit anderen Verfahren zur Kontrolle von Beschleunigung, Strahlstabilität und -qualität, die es bei DESY bereits gibt, wird dies kompakte Elektronenquellen möglich machen.“

Teilchenbeschleuniger sind in vielen Bereichen unverzichtbare Werkzeuge, von der Forschung über die Industrie bis zur Medizin. Konventionelle Teilchenbeschleuniger nutzen Radiowellen, um Pakete elektrisch geladener Teilchen, wie zum Beispiel Elektronen, schneller und schneller voranzutreiben. Die heute hochentwickelte Technik erzeugt Teilchenstrahlen hoher Qualität mit fast jeder gewünschten Eigenschaft. Je höher die Teilchenenergie sein soll, desto größer und teurer werden allerdings die Anlagen.

Surfen auf der Plasmawelle

Die zurzeit noch experimentelle Laser-Plasmabeschleunigung verfolgt ein komplett anderes Konzept: Bei ihr pflügt ein kurzer, extrem heller Laserpuls durch ein Plasma. Wie ein Schnellboot auf einem See erzeugt der Laserpuls kräftige Heckwellen in seiner Bahn. Auf diesen Plasmawellen können die Elektronen surfen wie ein Wakeboard-Surfer auf der Heckwelle des Schnellboots. Plasmawellen können Teilchen viele hundert Male stärker beschleunigen als konventionelle Beschleuniger. Auch wenn bei der jungen Technik noch zahlreiche Herausforderungen gemeistert werden müssen, verspricht sie günstigere und vor allem drastisch kleinere Teilchenbeschleuniger sowie neue Anwendungen.

Je kräftiger der Laserpuls ist, desto stärker ist die Beschleunigung im Plasma. Das BELLA-Team schoss unvorstellbar starke und kurze Infrarot-Laserpulse mit einer Spitzenleistung von 850 Billionen Watt (850 Terawatt) und einer Dauer von nur 35 billionstel Sekunden (35 Femtosekunden) in eine 0,8 Millimeter breite Saphirrohre voll Wasserstoffgas. Die Spitzenleistung des Lasers entspricht umgerechnet 8,5 Billionen 100-Watt-Glühlampen, die allerdings nur ein paar Dutzend Femtosekunden angeschaltet wären. Der Clou dabei war, dass ein vorseilender, erster Laserpuls zunächst einen Kanal durch das Plasma für den eigentlichen Beschleunigerpuls gebohrt hatte. Dadurch ließ sich die Plasmabeschleunigung über die gesamten Länge der Kapillare aufrechterhalten.

„Das in *Physical Review Letters* veröffentlichte Resultat aus Berkeley stellt einen Meilenstein für



Den Belgier **Wim Leemans** zog es sehr früh in seiner Karriere nach Kalifornien: Seine Doktorarbeit in der Elektrotechnik schrieb er an der University of California in Los Angeles. Anschließend arbeitete er insgesamt 27 Jahre am Berkeley Lab und hat in dieser Zeit das Laser-Beschleunigerprogramm des Forschungszentrums etabliert und zu weltweitem Ansehen gebracht.

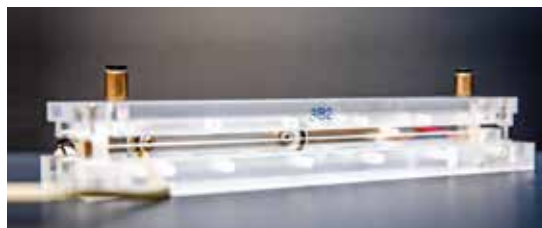
„Die Zeit ist reif, um die Laser-Plasmabeschleunigung aus dem Labor zur Anwendung zu führen“

Wim Leemans, DESY

Laser-Plasmabeschleuniger dar“, kommentiert Ralph Aßmann, Leitender Wissenschaftler für Beschleunigerforschung bei DESY, der nicht an der Studie beteiligt war. „Hier wird nicht nur ein neuer Energierekord gezeigt, sondern es wurde eine innovative Methode entwickelt, mit der eine mittlere Beschleunigungsspannung von 40 Milliarden Volt pro Meter über eine Strecke von 20 Zentimeter robust erzeugt wurde. Diese neue Technologie eröffnet ganz neue Möglichkeiten, auch für unsere Arbeit bei DESY.“

Zwar können Plasmabeschleuniger nicht so viele Teilchen auf einmal beschleunigen wie konventionelle Beschleuniger, aber sie können neue, bislang nicht machbare Anwendungen wie etwa einen miniaturisierten Röntgenlaser ermöglichen. „Unsere Methode ist ein großer Schritt nach vorn zu künftigen kompakten Forschungslichtquellen“, betont Leemans. „Die Zeit ist reif, um die Laser-Plasmabeschleunigung aus dem Labor zur Anwendung zu führen.“

Physical Review Letters, 2019,
DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.084801



Eine 20 Zentimeter lange Plasmazelle, wie sie für die Rekordbeschleunigung benutzt wurde.

Druckbare Wassersensoren

Röntgenuntersuchung zeigt Arbeitsweise von funktionaler Verbindung auf Kupferbasis

Ein spanisch-israelisches Forschungsteam hat ein ausdrückbares Material entwickelt, das als vielseitiger und robuster Wasserdetektor eingesetzt werden kann. Der Stoff auf Polymerbasis ist günstig, flexibel und ungiftig und ändert seine Farbe in Gegenwart kleiner Mengen Wasser von Violett zu Blau. Mit Hilfe von DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unter Leitung von Pilar Amo-Ocha von der Autonomen

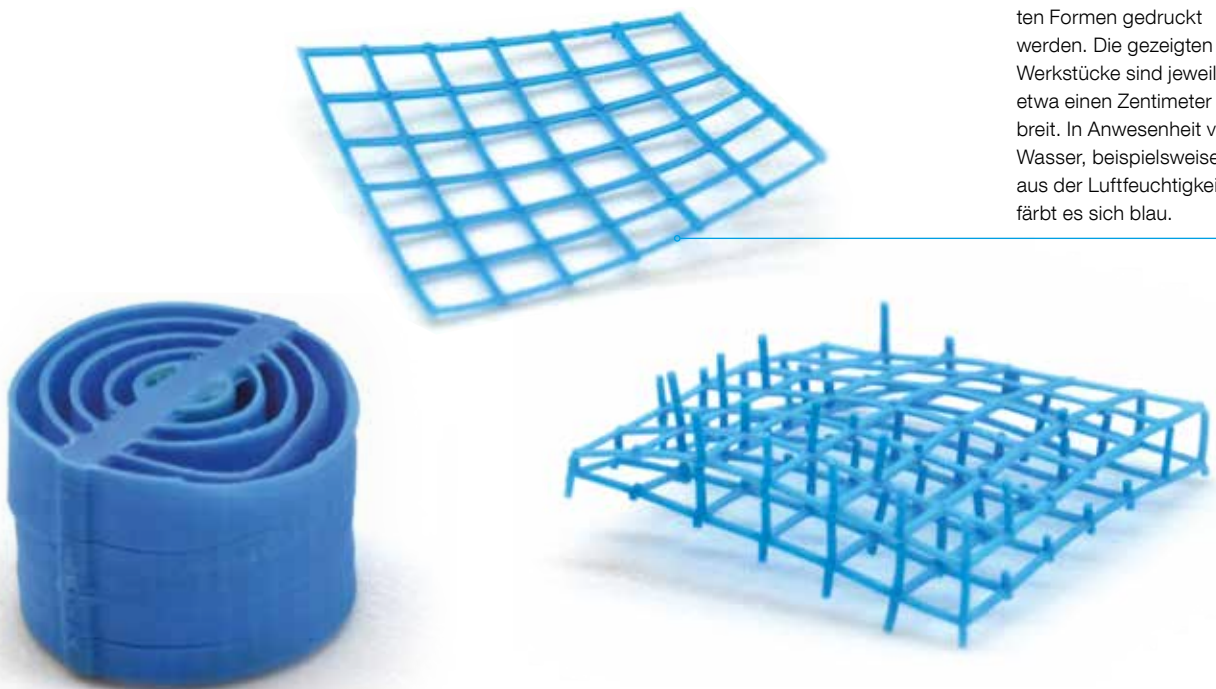
Universität Madrid (UAM) die durch Wasser ausgelösten Strukturänderungen in dem Material erkundet, die der beobachteten Farbänderung zugrunde liegen. Die Entwicklung öffnet die Tür zur Erzeugung einer neuen Familie 3D-druckbarer funktionaler Materialien.

Auf zahlreichen Gebieten wie beispielsweise Gesundheit, Lebensmittelsicherheit und Umweltschutz gibt es einen rasant steigenden Bedarf an Sensoren, die auf schnelle und einfache Weise gezielt be-

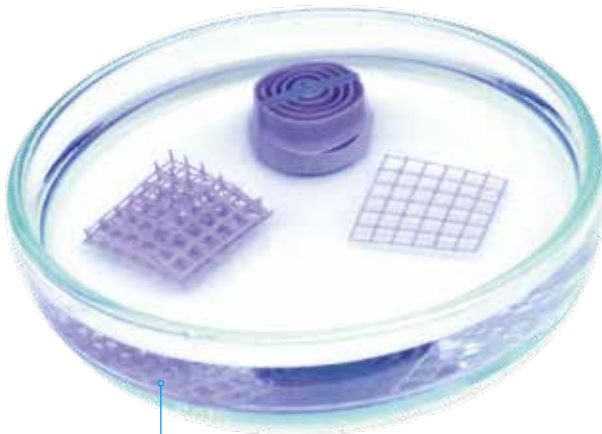
stimmte Stoffe nachweisen. Wasser gehört dabei zu den am häufigsten überwachten chemischen Verbindungen. „Es kann sehr wichtig sein zu wissen, wieviel Wasser in einer bestimmten Umgebung oder in einem Stoff vorhanden ist“, erläutert DESY-Forscher Michael Wharmby. „Wenn ein Öl zum Beispiel zu viel Wasser enthält, schmiert es Maschinen möglicherweise nicht gut, und mit einem zu hohen Wasseranteil verbrennt Treibstoff nicht ordentlich.“

„Die Vielseitigkeit moderner 3D-Drucktechnik bedeutet, dass sich diese Sensoren in ganz unterschiedlichen Bereichen einsetzen lassen“

Shlomo Magdassi, Hebräische Universität Jerusalem



Das Sensormaterial kann in unterschiedlichsten Formen gedruckt werden. Die gezeigten Werkstücke sind jeweils etwa einen Zentimeter breit. In Anwesenheit von Wasser, beispielsweise aus der Luftfeuchtigkeit, färbt es sich blau.



Im trockenen Zustand (hier in einer wasserfreien Flüssigkeit) färbt sich das Sensormaterial violett.

Farbumschlag im Sensor

Der funktionale Teil des neuen Sensormaterials ist ein sogenanntes Koordinationspolymer auf Kupferbasis, eine organische Verbindung mit einem Wassermolekül, das an ein zentrales Kupferatom gebunden ist. „Wenn man die Verbindung auf 60 Grad Celsius erhitzt, ändert sie ihre Farbe von Blau zu Violett“, berichtet Amo-Ocha. „Diese Änderung lässt sich rückgängig machen, indem man das Material an der Luft lässt, in Wasser taucht oder in eine Flüssigkeit mit Spuren von Wasser legt.“ Mit der energiereichen Röntgenstrahlung von DESYs Forschungslichtquelle PETRA III konnte das Team beobachten, dass in den auf 60 Grad erhitzten Proben die Wassermoleküle fehlten, die zuvor an die Kupferatome gebunden waren. Das führt zu einer umkehrbaren strukturellen Neuorganisation des Materials, wodurch es zu der Farbänderung kommt.

„Als wir das verstanden hatten, konnten wir auch die Physik dieser Veränderung modellieren“, sagt José Ignacio Martínez vom Institut für Werkstoffwissenschaften in Madrid (ICMM-CSIC). Die Forscherinnen und Forscher waren dann in der Lage, die Kupferverbindung mit einem 3D-Druckermaterial zu mischen und Sensoren in verschiede-

nen Formen daraus zu drucken. Sie testeten die gedruckten Sensoren in Luft und mit Flüssigkeiten, die unterschiedliche Anteile Wasser enthielten.

Dabei zeigte sich, dass die gedruckten Sensoren sogar noch empfindlicher auf Wasser reagieren als das kupferbasierte Polymermaterial allein. Die Forschenden schreiben das der Porosität des gedruckten Materials zu. In Flüssigkeiten schlug der gedruckte Sensor innerhalb von zwei Minuten bereits bei einem Wasseranteil von 0,3 bis 4 Prozent an. Zudem reagierte er noch auf eine relative Luftfeuchtigkeit von nur 7 Prozent. Wenn das Material durch

„Es kann sehr wichtig sein zu wissen, wieviel Wasser in einer bestimmten Umgebung oder in einem Stoff vorhanden ist. Wenn ein Öl zum Beispiel zu viel Wasser enthält, schmiert es Maschinen nicht gut“

Michael Wharmby, DESY



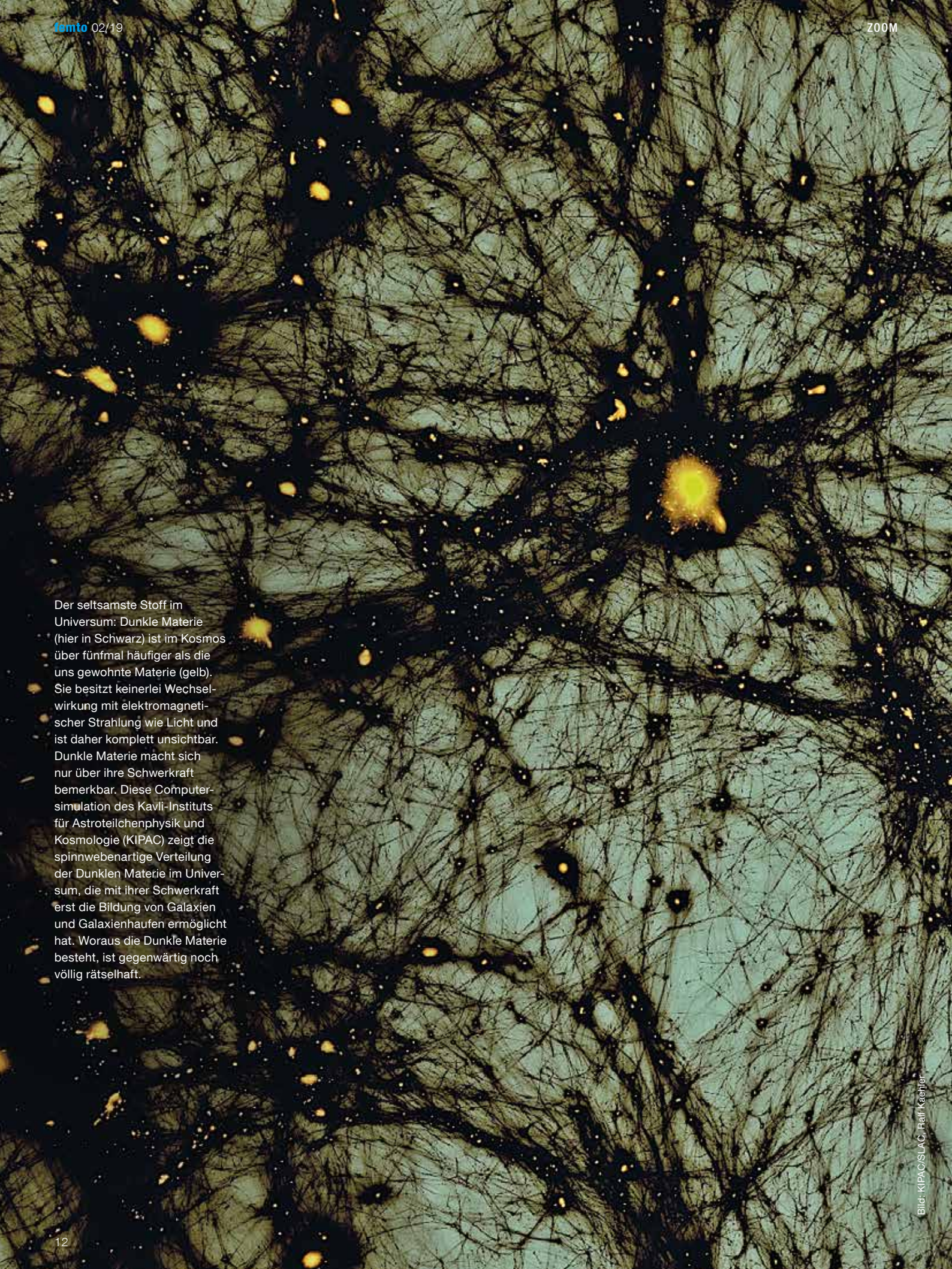
DESY-Forscher Michael Wharmby leitet die Messstation, an der die Untersuchungen stattfanden.

Erhitzen oder in einer wasserfreien Flüssigkeit getrocknet wird, färbt es sich von Blau wieder zurück nach Violett. Tests zeigten, dass es selbst über viele Erhitzungszyklen stabil bleibt und die kupferbasierten Polymere gleichmäßig in den gedruckten Sensoren verteilt sind. An der Luft bleibt das Material mindestens ein Jahr stabil, ebenso bei biologisch relevanten pH-Werten von 5 bis 7.

„Die Vielseitigkeit moderner 3D-Drucktechnik bedeutet darüber hinaus, dass sich diese Sensoren in ganz unterschiedlichen Bereichen einsetzen lassen“, betont Shlomo Magdassi von der Hebräischen Universität Jerusalem. Das Konzept könne zudem genutzt werden, um weitere derartige funktionale Materialien zu entwickeln.

„In unserer Arbeit präsentieren wir die ersten 3D-gedruckten Verbundobjekte aus einem nicht-porösen Koordinationspolymer“, sagt Félix Zamora von der Autonomen Universität Madrid. „Das eröffnet die Möglichkeit, die große Familie dieser leicht herzustellenden Verbindungen mit ihren interessanten magnetischen, optischen und elektrischen Eigenschaften für das funktionale 3D-Drucken zu benutzen.“

Advanced Functional Materials, 2019;
DOI: 10.1002/adfm.201808424



Der seltsamste Stoff im Universum: Dunkle Materie (hier in Schwarz) ist im Kosmos über fünfmal häufiger als die uns gewohnte Materie (gelb). Sie besitzt keinerlei Wechselwirkung mit elektromagnetischer Strahlung wie Licht und ist daher komplett unsichtbar. Dunkle Materie macht sich nur über ihre Schwerkraft bemerkbar. Diese Computersimulation des Kavli-Instituts für Astroteilchenphysik und Kosmologie (KIPAC) zeigt die spinnwebartige Verteilung der Dunklen Materie im Universum, die mit ihrer Schwerkraft erst die Bildung von Galaxien und Galaxienhaufen ermöglicht hat. Woraus die Dunkle Materie besteht, ist gegenwärtig noch völlig rätselhaft.

ZOOM

DUNKLE MATERIE

Die Suche nach der mysteriösen Dunklen Materie beschäftigt die Physik seit vielen Jahrzehnten. Bereits in den 1930er Jahren hatten sich Astronomen über einen merkwürdigen Befund gewundert: Galaxienhaufen hielten zusammen, obwohl sie eigentlich auseinanderfliegen sollten. Neben den sichtbaren Himmelskörpern – Sternen, Planeten und Staubwolken – muss es zusätzlich eine unsichtbare Masse geben, deren Gravitation Galaxien im Zaum hält. Doch woraus besteht diese ominöse Dunkle Materie, ohne die sich kaum erklären lässt, wie sich Galaxien und Galaxienhaufen im Laufe der Entstehungsgeschichte des Weltalls gebildet haben? Vielleicht aus noch unentdeckten, ultraleichten oder überaus schweren Elementarteilchen? Und was haben Schwarze Löcher damit zu tun? Rund um den Globus läuft die Suche, und bald könnte eine neue Generation von Experimenten das Geheimnis der Dunklen Materie endlich lüften.

10⁻³² Sekunden 1 Sekunde 100 Sekunden 380 000 Jahre 300–500 Millionen Jahre Milliarden Jahre 13,8 Milliarden Jahre



Inflation: Das ganz junge Universum dehnt sich kurzzeitig extrem schnell aus.

Licht und Materie entstehen.

Licht und Materie sind gekoppelt. Dunkle Materie entwickelt sich unabhängig: Sie beginnt bereits, zusammenzuklumpen und eine Netzstruktur zu bilden.

Licht und Materie entkoppeln: Protonen und Elektronen bilden Atome, das Licht kann sich frei ausbreiten. Aus dieser Zeit stammt die allgegenwärtige kosmische Hintergrundstrahlung (siehe Abbildung rechts).

Nach der Entkopplung von Licht und Materie gibt es zunächst noch keine Sterne. Die Atome der uns gewohnten Materie beginnen jedoch, den Einfluss des Dunkle-Materie-Geflechts zu spüren. In dessen dichtesten Knoten leuchten nach 300 bis 500 Millionen Jahren die ersten Sterne und Galaxien auf.

Galaxien entwickeln sich weiter.

Das Universum heute

Wir haben Glück, es ist bewölkt.“ Markus Garczarczyk hat einen kurzen Blick aufs Wetter geworfen, jetzt öffnet er eine Metalltür, die in einen kleinen Turm führt. Dort tippt der Forscher auf einen Touchscreen, es ertönt das Sirren kräftiger Elektromotoren. Sie wuchten das in die Höhe, was auf dem Turm montiert ist – ein 60 Tonnen schweres Spiegelteleskop, Durchmesser zwölf Meter. „Bei klarem Himmel hätten wir es in seiner Parkposition lassen müssen“, erklärt Garczarczyk. „Sonst würde der Reflektor das Sonnenlicht so

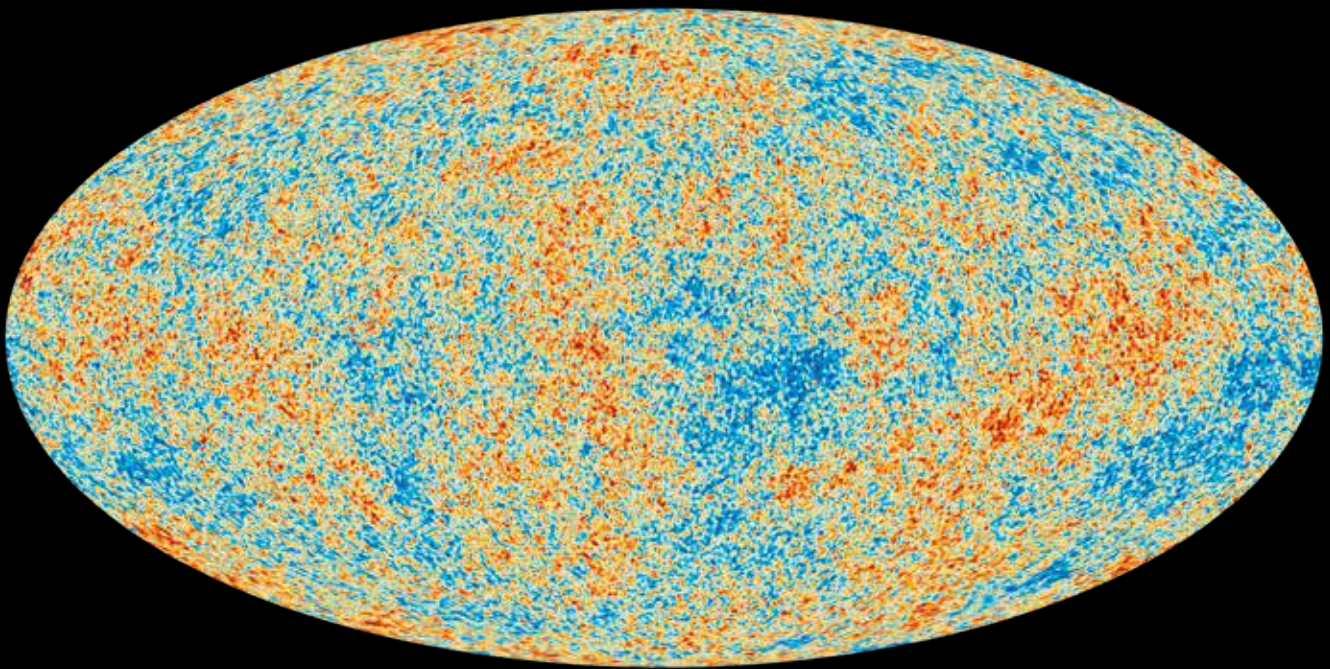
stark bündeln, dass es die Anlage beschädigt.“

Das schwere Gerät steht am Rand des Wissenschaftsparks Adlershof in Berlin. Es ist der Prototyp eines neuen internationalen Großprojekts der Astronomie – des Cherenkov Telescope Array (CTA). „Es soll aus etwa hundert Einzelteleskopen bestehen und Gammastrahlen aus dem All aufspüren“, sagt Garczarczyk, Physiker bei DESY in Zeuthen, das CTA maßgeblich mitbetreibt. Gammastrahlen sind die energiereichsten aller elektromagnetischen Wellen. Unter anderem entstehen sie bei Gewaltprozessen im Kosmos, etwa bei Supernova-Explosionen und Sternkollisionen. Und sie könnten helfen, eines der größten Rätsel der Physik zu lösen: Woraus besteht die ominöse Dunkle Materie, die die Galaxien zusammenzuhalten scheint wie ein unsichtbarer Klebstoff?

Bereits in den 1930er Jahren hatten sich Astronomen über einen merkwürdigen Befund gewundert: Galaxienhaufen hielten zusammen, obwohl sie eigentlich auseinanderfliegen sollten. Und in den 1970 Jahren stellte ein US-Team fest, dass sich die Sterne, die um das Zentrum einer Galaxie kreisen, so schnell bewegen, dass sie eigentlich herauskatapultiert werden müssten. Die Folgerung: Neben den sichtbaren Himmelskörpern – Sternen, Planeten und Staubwolken – muss es zusätzlich eine unsichtbare Masse geben, Dunkle Materie genannt. Ihre Gravitation ist es, die die Sterne in einer Galaxie im Zaum hält und verhindert, dass zum Beispiel unsere Milchstraße schon längst auseinandergedriftet ist.



Der Prototyp für die Teleskope des Cherenkov Telescope Array (CTA) ist seit 2013 im Wissenschaftspark Berlin-Adlershof in Betrieb.



Auch andere Hinweise sprechen für die Existenz der rätselhaften Substanz: So sieht es danach aus, als würde Dunkle Materie das Licht ferner Galaxien ein wenig aus der Bahn lenken – Fachleute sprechen vom Gravitationslinsen-Effekt. Auch in der sogenannten kosmischen Hintergrundstrahlung – quasi dem Echo des Urknalls – finden sich Indizien für ihr Dasein. Und: Ohne die Dunkle Materie lässt sich kaum erklären, wie sich Galaxien und Galaxienhaufen im Laufe der Entstehungsgeschichte des Weltalls gebildet haben.

Geburtshelfer für Galaxien

Heute gehen Kosmologen davon aus, dass das Universum vor rund 13,8 Milliarden Jahren aus einem winzigen Punkt heraus explosionsartig geboren wurde – dem Urknall. „Unmittelbar nach diesem Big Bang, als der Kosmos noch extrem klein war, dürfte es winzige Quantenfluktuationen gegeben haben“, erklärt Kai Schmidt-Hoberg, Theoretiker bei DESY. „Angetrieben von diesen Fluktuationen konnte sich die Dunkle Materie wegen der Gravitation zusammenziehen und die ersten Strukturen im Universum bilden – fadenartige Verdichtungen, in Computersimulationen erinnern sie an das Geflecht von Nervenzellen im Gehirn.“ Dieses Geflecht zog in der Folge durch seine Schwerkraft normale Materie an, die dann verklumpte und Himmelskörper bilden konnte – die Dunkle Materie als Geburtshelfer für Galaxien.

Das Frappierende: Das Ganze geht nur auf, wenn man annimmt, dass es rund fünfmal mehr Dunkle Materie gibt als sichtbare. Hinzu kommt

ein weiteres Rätsel. In den 1990er Jahren entdeckten Astronomen, dass der Kosmos viel schneller expandiert als erwartet – eine geheimnisvolle Kraft scheint ihn regelrecht auseinanderzutreiben. Seitdem spricht die Fachwelt von einer „Dunklen Energie“, aus der das Universum zu etwa 68 Prozent zu bestehen scheint. 27 Prozent macht die Dunkle Materie aus. Und nur mickrige fünf Prozent des Universums sind aus dem gemacht, aus dem wir und unsere Umgebung bestehen – der vertrauten sichtbaren Materie.

Die kosmische Hintergrundstrahlung stammt aus der Zeit 380 000 Jahre nach dem Urknall und wabert bis heute durchs All. Kleine Temperaturschwankungen, wie hier vom europäischen Satelliten „Planck“ gemessen, waren die Saaten künftiger Strukturen wie Galaxienhaufen.

„Im Moment gibt es viele Kandidaten – beinahe zu viele“

Kai Schmidt-Hoberg, DESY



Das Problem: Trotz jahrzehntelanger Suche ist völlig unklar, woraus Dunkle Materie eigentlich besteht. Die Theoretiker bringen diverse neue Elementarteilchen ins Spiel – manche ultraleicht, andere überaus schwer. Andere Fachleute halten Schwarze Löcher für die Ursache. Und wieder andere meinen, dass etwas mit einer Grundgleichung der Physik nicht stimmt – dem Gravitationsgesetz von Isaac Newton. „Im Moment gibt es viele Kandidaten – beinahe zu viele“, klagt Schmidt-Hoberg. „Nicht zuletzt deshalb ist es so schwierig herauszufinden, was tatsächlich hinter der Dunklen Materie steckt.“ >>

Das Large Underground Xenon Experiment (LUX) hat 1500 Meter tief in einer alten Mine in South Dakota versucht, Teilchen namens WIMPs (siehe rechts) direkt einzufangen. Sein Nachfolger, das LUX-Zeplin Experiment, soll der weltweit empfindlichste WIMP-Detektor werden.



Im weltgrößten Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider (LHC) am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN bei Genf versuchen Physikerinnen und Physiker hingegen, WIMPs in energiereichen Kollisionen direkt zu erzeugen.



Seit 2016 späht der Detektor XENON1T rund 1400 Meter unter dem italienischen Gran-Sasso-Massiv nach WIMPs. Angeschlagen hat er bislang nicht, seine Ausschlussgrenzen sind jedoch besser als die zuvor von LUX gesetzt.



Rund um den Globus läuft die Suche auf breiter Front: Teilchenbeschleuniger versuchen, Dunkle Materie gezielt zu erzeugen. Hochsensitive Detektoren, eingebaut tief im Gebirge, lauern auf die mysteriösen Teilchen. Diverse Teleskope richten ihren Blick in den Himmel und fahnden dort nach Spuren. In den kommenden Jahren wird eine weitere Offensive beginnen: Mit einer neuen Generation an Instrumenten unternimmt die Fachwelt den nächsten Anlauf.



„WIMPs passen sehr gut ins derzeitige Bild der Kosmologie“

Joachim Mnich, Direktor für Teilchenphysik bei DESY

Spurensuche mit dem LHC

Viele Experten liebäugeln mit einer speziellen Klasse von Elementarteilchen – den WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles, also schwach wechselwirkende massereiche Teilchen). Verglichen mit vielen anderen Teilchen wären sie relativ schwer: WIMPs könnten soviel wiegen wie

ein Kohlenstoffatom, ein Urkern oder sogar ein kleines Protein. Weitgehend unbeachtet vom Rest der Welt würden sie in Unmengen durchs All geistern. Mit gewöhnlicher Materie würden sie nur sporadisch agieren, sich jedoch auf großen Skalen durch ihre Schwerkraft bemerkbar machen.

„WIMPs passen sehr gut ins derzeitige Bild der Kosmologie“, sagt Joachim Mnich, Direktor für Teilchenphysik bei DESY. „Außerdem sagen manche Theorien vorher, dass es Teilchen mit genau solchen Eigenschaften geben müsste.“ Die wohl gängigste dieser Theorien heißt Supersymmetrie, kurz SUSY. Sollte sie Gültigkeit haben, würde sie gewisse theoretische Probleme der Teilchenphysik lösen und zum Beispiel erklären, warum die Gravitation so schwach ist. Nebenbei würde sie vielversprechende Kandidaten für die Dunkle Materie liefern, zum Beispiel das Neutralino. Dieses könnte sich mit dem derzeit weltgrößten Beschleuniger herstellen lassen, dem LHC am CERN. Die Strategie: Man schießt normale Materie – in diesem Fall Protonen – mit möglichst großer Wucht aufeinander und hofft, dass ein wenig Dunkle Materie dabei herauskommt.

Seit 2010 nimmt der Genfer Beschleuniger Messdaten. Bislang aber hat er noch keinerlei Spuren eines SUSY-Teilchens aufgespürt. Ist die Sache damit vom Tisch? „Nein“, meint Mnich, „wir verfolgen das weiter.“ Denn zum Leidwesen der Fachwelt verrät die Theorie der Supersymmetrie nicht, wie schwer solche SUSY-Teilchen sein könnten – was die Physiker weitgehend im Dunkeln tappen lässt. „Deshalb lohnt es sich, weiter nach diesen Teilchen zu suchen“, betont Mnich. „Doch um die Chancen zu maximieren, etwas zu finden, müssen wir möglichst viele Kollisionen beobachten.“

Genau das dürfte von 2026 an möglich sein. Dann soll ein Upgrade des LHC dafür sorgen, dass fünfmal mehr Protonen in dem 27 Kilometer großen Ring kollidieren – was die Chancen auf eine Entdeckung deutlich erhöht.

Doch selbst wenn im Genfer Beschleuniger respektable Mengen an Dunkle-Materie-Teilchen entstehen, ist es alles andere als einfach, sie aufzuspüren. „Diese Teilchen sind praktisch unsichtbar“, erklärt DESY-Physikerin Sarah Heim, Leiterin einer Helmholtz-Nachwuchsgruppe. „Sie wechselwirken so schwach mit Materie, dass sie den

Gesucht:
WIMP



Weakly Interacting Massive Particles

Masse: etwa 100 GeV

μeV meV eV keV MeV GeV TeV

Wechselwirkungsstärke: mittel

Suchmethode: direkt, indirekt und mit Teilchenbeschleunigern

Besondere Eigenschaften: Elementarteilchen; kann verschiedene Erscheinungsformen haben, beispielsweise als Neutralino oder Kaluza-Klein-Teilchen. Als Neutralino wäre es das supersymmetrische Partnerteilchen der Bosonen wie dem Higgs-Teilchen und würde die Theorie der Supersymmetrie bestätigen; als Kaluza-Klein-Teilchen würde es bestätigen, dass es mehr Dimensionen gibt, als wir kennen.

„Diese Teilchen sind praktisch unsichtbar“

Sarah Heim, DESY

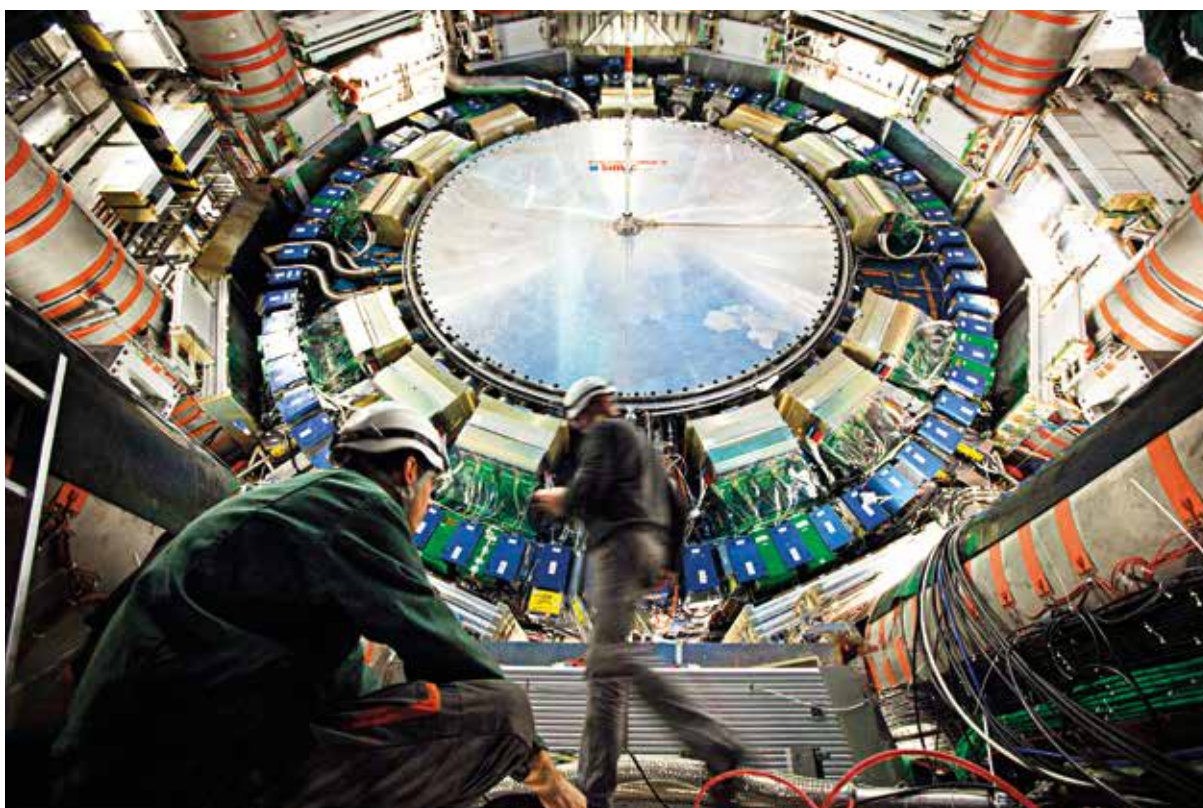


Impuls von einem unsichtbaren Teilchen davongetragen worden sein – womöglich einem Dunkle-Materie-Teilchen“, erklärt Heim.

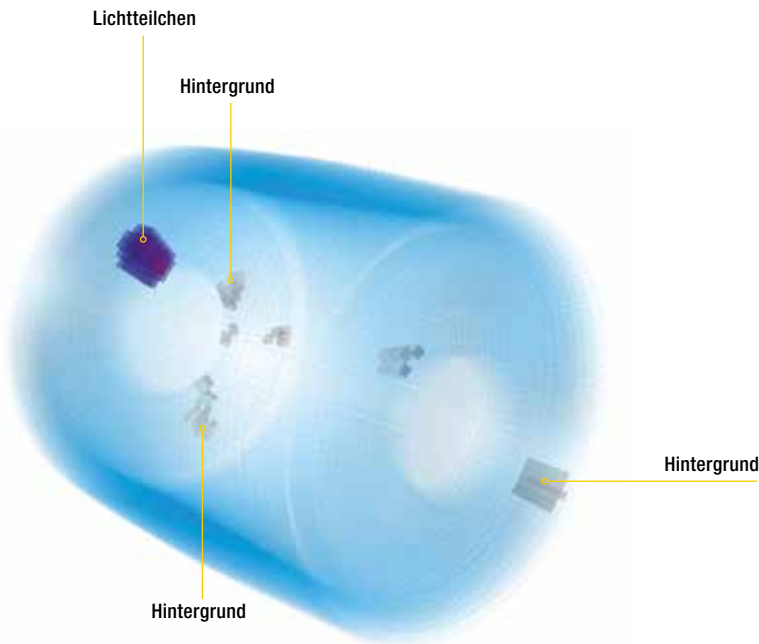
Bislang konnten die Fachleute zwar noch keine Dunkle Materie aufspüren. „Aber immerhin können wir schon manche Bereiche innerhalb bestimmter Modelle ausschließen“, sagt die Teilchenphysikerin. Damit wissen die Forscher nun, wo sie nicht mehr suchen müssen. Und was, wenn selbst der hochgerüstete LHC ab 2026 keine Dunkle Materie findet? Dann dürfte die Forschergemeinde auf einen größeren Nachfolger hoffen, an dessen Plänen das CERN derzeit tüftelt. „Ein größerer Ring mit einem Umfang von vielleicht 100 Kilometern könnte deutlich schwerere Teilchen erzeugen“, sagt Sarah Heim. „Das würde die Chance erhöhen, doch noch SUSY-Teilchen oder andere Kandidaten für die Dunkle Materie zu finden.“ >>

Detektoren am LHC regelrecht durch die Lappen gehen, zum Beispiel unserem ATLAS-Detektor.“

Deshalb greifen die Fachleute zu einem Trick: Sie analysieren die Impulse der Teilchen, die der Detektor gemessen hat. Deren Summe muss nämlich genauso groß sein wie die Impulse der ursprünglichen Kollisionspartner – quasi ein Nullsummenspiel. „Sollten wir eine signifikante Abweichung messen, müsste der fehlenden



ATLAS ist der größte Detektor, der je an einem Teilchenbeschleuniger gebaut wurde. Er hat unter anderem – gemeinsam mit dem CMS-Detektor am LHC – das Higgs-Teilchen entdeckt. Der Universal-detektor fahndet jedoch auch nach Teilchen der Dunklen Materie.



Simuliertes Dunkle-Materie-Ereignis im Detektor Belle II. Der rot-blaue Cluster stammt von einem Lichtteilchen, das simulierte Dunkle-Materie-Teilchen ist unsichtbar und auf der gegenüberliegenden Seite aus dem Detektor entkommen.

„Das wäre zumindest ein indirekter Hinweis auf die Existenz von Dunkler Materie“

Torben Ferber, DESY

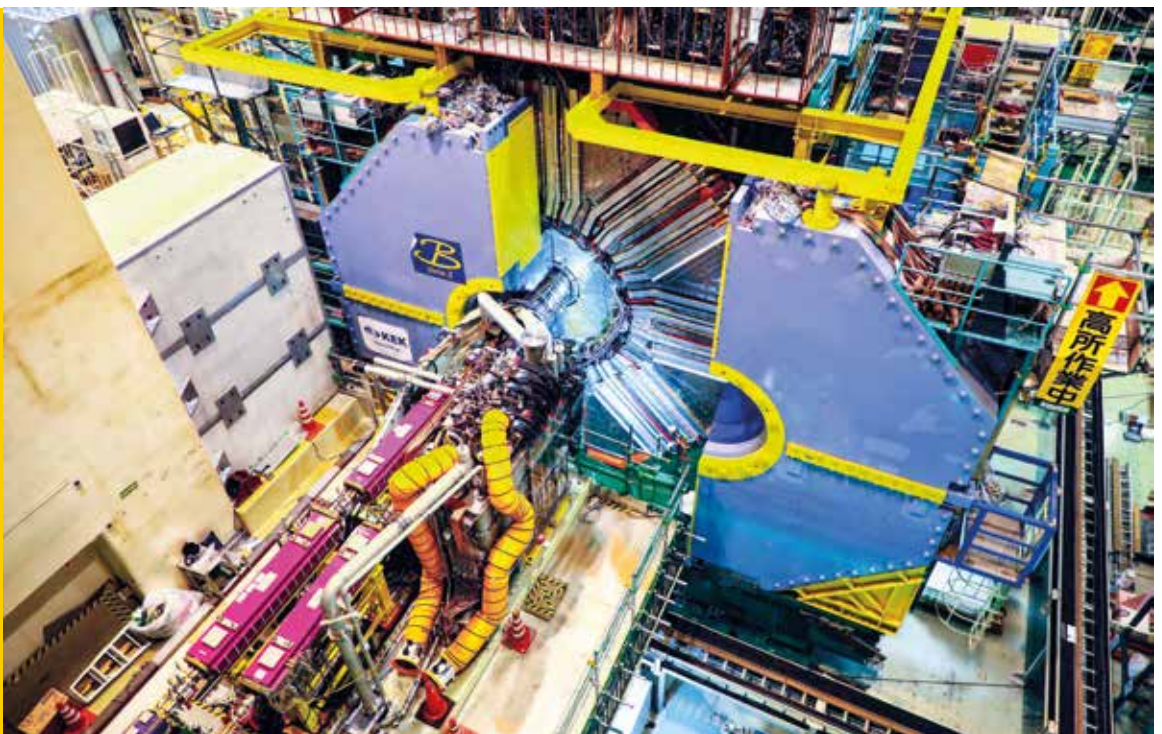
Dunkle-Materie-Jagd in Japan

Auch Torben Ferber, ebenfalls Leiter eine Helmholtz-Nachwuchsgruppe bei DESY, fahndet per Beschleuniger nach den Exoten. Allerdings sucht er sein Glück nicht beim LHC, sondern mit einer kleineren, ganz neuen Maschine: SuperKEKB liegt in Japan, hat einen Umfang von drei Kilometern und feuert anders als der Genfer Gigant keine Protonen aufeinander, sondern Elektronen und deren Antiteilchen, die Positronen. Die Kollisionsenergie ist so abgestimmt, dass ein sogenanntes Υ -Teilchen entsteht. Dieses zerfällt nach seiner Erzeugung flugs wieder – und zwar in zwei B-Mesonen.

„Deshalb bezeichnen wir die Anlage auch als B-Fabrik“, sagt Ferber. „Im Vergleich zum LHC sind die Kollisionen bei uns viel sauberer, was sehr präzise Messungen erlaubt.“ Hinzu kommt: Der japanische Beschleuniger schießt extrem viele Teilchen aufeinander, spuckt also eine enorme Zahl an Messdaten aus – was die Präzision nochmals erhöht. „Pro Sekunde zeichnen wir 30 000 Ereignisse auf“, erklärt Ferber. „Das sind bis zum geplanten Ende des Projekts 50-mal mehr Daten als beim Vorgängerexperiment.“

Im April begann das offizielle Experimentierprogramm – ein Teil davon widmet sich der Suche nach Dunkler Materie. „Wir versuchen, sie direkt zu erzeugen“, so Ferber. „Dabei suchen wir nach relativ leichten Teilchen, etwa so schwer wie ein Proton.“ Um die Exoten dingfest zu machen, werden die Fachleute nach einem bestimmten Signal in ihrem Detektor namens Belle II Ausschau

Der Detektor Belle hat in seiner Laufzeit von 1999 bis 2010 knapp 800 Millionen Paare von B-Mesonen registriert. Am Nachfolger Belle II (rechts) sollen es rund 40 Milliarden werden. Der Detektor am japanischen Teilchenbeschleuniger SuperKEKB ist rund 7 Meter hoch und 7,5 Meter lang.





Federica Petricca leitet die CRESST-Gruppe am Münchener Max-Planck-Institut für Physik.

halten – ein kurzer Lichtblitz und sonst nichts. Ebenso könnte es aber auch sein, dass die Dunkle Materie – quasi hinter den Kulissen – in die Zerfälle der γ -Teilchen reinfunkt und dadurch für winzige Abweichungen in den Messdaten sorgt. „Das wäre zumindest ein indirekter Hinweis auf die Existenz von Dunkler Materie“, sagt Ferber.

Die Höhlen-Detektoren

Eine andere Klasse von Experimenten kommt ohne Beschleuniger aus: Es sind Detektoren, die herumgeisternde Dunkle-Materie-Teilchen direkt aufschnappen wollen. Man findet sie in speziellen Orten – in Laboren, tief eingegraben in einen Berg. „Dadurch lässt sich die allgegenwärtige kosmische Strahlung abschirmen, die die Messungen sonst empfindlich stören würde“, sagt Federica Petricca vom Max-Planck-Institut für Physik in München. Sie ist die Sprecherin eines Experiments namens CRESST, das im Gran-Sasso-Labor in Italien steht – 1400 Meter tief in einem Bergmassiv.

„Da wir nach sehr seltenen und schwachen Ereignissen schauen, müssen wir unser Experiment bis ins letzte Detail verstehen“

Federica Petricca, Max-Planck-Institut für Physik

Das Prinzip: Trifft ein Dunkle-Materie-Teilchen auf den Detektor, könnte es an einem der Atomkerne gestreut werden. Der daraus resultierende Rückstoß würde sich durch einen winzigen Wärmeeintrag im Detektor verraten. „Um diesen messen zu können, müssen wir CRESST bei extrem tiefen Temperaturen betreiben“, erläutert Petricca. „Und zwar bei zehn Millikelvin, also zehn tausendstel Grad über dem absolutem Temperaturnullpunkt.“

Als Detektormaterial kommen zehn Kristalle aus Kalziumwolframat zum Einsatz. Jeder



Das Experiment Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers (CRESST) späht 1400 Meter tief im italienischen Gran-Sasso-Massiv nach winzigen Temperaturschwankungen, die durch eine seltene Kollision eines Dunkle-Materie-Teilchens ausgelöst werden können. Arbeiten am zentralen Detektorteil müssen unter Reinraumbedingungen stattfinden.

wiegt 25 Gramm und ist nur wenig größer als ein Zuckerwürfel. Um sie gegen die natürliche radioaktive Strahlung des Felsgesteins abzuschirmen, stecken die tiefgekühlten Kristalle hinter dicken Schutzschichten aus Polyethylen, Blei und Kupfer. „Da wir nach sehr seltenen und schwachen Ereignissen schauen, müssen wir unser Experiment bis ins letzte Detail verstehen“, betont Petricca.

Seit Jahren lauert CRESST auf Dunkle Materie. „Gefunden haben wir noch nichts“, erzählt die Physikerin. „Aber es ist uns gelungen, einen bestimmten Massebereich auszuschließen.“ Nun plant das CRESST-Team, seinen Detektor im kommenden Jahr von zehn auf bis zu 100 Module aufzustocken. Dies sollte die Messempfindlichkeit signifikant erhöhen, ähnlich wie es auch bei anderen Detektoren dieser Art vorgesehen ist – bei Anlagen wie XENON1T, LUX-Zeplin und SuperCDMS. >>

Gesucht:
FIMP



Febly Interacting Massive Particles


Masse: im GeV-Bereich

μeV meV eV keV MeV GeV TeV

Wechselwirkungsstärke: superschwach

Suchmethode: wegen ihrer schwachen Wechselwirkung mit dem Rest des Universums sehr schwer bis gar nicht aufzuspüren. Eine kleine Chance auf eine direkte Entdeckung hätte das XENON1T-Experiment in Italien.

Besondere Eigenschaften: extrem scheues Teilchen



Tscherehkw-Teleskope wie das geplante CTA spähren nach dem schwachen blauen Leuchten sogenannter Luftschaüer in der Erdatmosphäre. Das sind Teilchenkaskaden, die von energiereichen Atomkernen und Gammaquanten aus dem Kosmos ausgelöst werden, wenn sie mit Molekülen der Atmosphäre kollidieren. Aus der Beobachtung dieses Tscherehkw-Lichts lässt sich die Herkunftsrichtung eines Gammaquants rekonstruieren.

Signale aus dem Nachthimmel

Eine andere Strategie verfolgt man bei DESY in Zeuthen, und zwar mit CTA, jenem Verbund aus Spiegelteleskopen, der in ein paar Jahren nach Gammastrahlung aus dem All Ausschau halten soll. Das Prinzip: Trifft ein hochenergetischer Gammablitz auf die Lufthülle der Erde, löst er dort eine regelrechte Teilchenlawine aus. Die wiederum ruft blaue Lichtblitze hervor, Tscherenkow-Licht genannt. Mehrere Teleskope, verteilt über ein Areal, fangen dieses Licht auf. Anschließend lässt sich aus den Messdaten rekonstruieren, woher der Gammablitz kam und welche Energie in ihm steckte.

„Auch Teilchen der Dunklen Materie könnten Gammastrahlung produzieren“

Gernot Maier, DESY

„Auch Teilchen der Dunklen Materie könnten Gammastrahlung produzieren, wenn sie zerfallen oder annihilieren, sich bei einem Zusammenstoß gegenseitig vernichten“, sagt der DESY-Physiker Gernot Maier. „Wenn dem so ist, sollten wir in jenen Himmelsregionen besonders viele Gammablitzbeobachtungen machen, wo es eine Häufung von Dunkler Materie gibt.“ Im Verdacht steht zum Beispiel das Zentrum unserer Galaxie. Nur: Dort ist gammamäßig auch sonst viel Betrieb, die Signale von Dunkler Materie sind womöglich nur schwer zu erkennen.

Deshalb wollen die Fachleute zusätzlich auch sogenannte spheroidale Zwerggalaxien ins Visier nehmen, kleinere Begleiter unserer Milchstraße. Hier entstehen kaum neue Sterne – eine Art galaktisches Altersheim. „Astrophysikalisch sind sie sehr langweilig“, meint Maier. „Aber gerade deswegen ist es aussichtsreich, dort Dunkle Materie aufzuspüren.“ Der Grund: Es funkt nur wenig dazwischen. Würde man Gammablitzbeobachtungen finden, würden sie mit einiger Wahrscheinlichkeit von Dunkler Materie stammen.

Auch andere Kandidaten könnten sich Gammateleskopen zeigen – etwa die Spuren sogenannter primordialer Schwarzer Löcher. Sie sind deutlich kleiner als jene Schwarzen Löcher, die durch den Kollaps sterbender Sterne entstehen, und müssten unmittelbar nach dem Urknall



Rund um unsere Heimatgalaxie, die Milchstraße, existiert vermutlich ein Halo aus Dunkler Materie, in dieser künstlerischen Darstellung blau gezeichnet. Rund um unsere Sonne gibt es dagegen möglicherweise keine nennenswerten Mengen Dunkler Materie, wie Messungen zeigen.

erzeugt worden sein. „Stephen Hawking hat herausgefunden, dass Schwarze Löcher verdampfen können und mit der Zeit immer kleiner werden“, erklärt Maier. „Unmittelbar am Ende ihres Lebens könnten sie so heiß sein, dass sie Gammastrahlung abgeben. Nach diesen Signalen halten wir Ausschau.“

Ebenso könnte CTA für eine weitere Kandidatenklasse empfänglich sein – sogenannte WISPs (siehe Beitrag „Hightech-Experiment mit gebrauchten Magneten“, Seite 26). Diese extrem leichten Teilchen könnten sich durch bestimmte Eigenheiten im Energiespektrum verraten, so die Hoffnung. „Das können wir mit den heutigen Teleskopen nicht erkennen“, sagt Maiers Kollegin Elisa Pueschel. „Doch CTA könnte dazu womöglich in der Lage sein.“ >>



Gernot Maier leitet die CTA-Gruppe bei DESY.

Gesucht:
Primordiales Schwarzes Loch



Gruppe: MACHO, Massive Compact Halo Objects

Masse: mega-massiv; im Mount-Everest- bis Sonnenmassenbereich

μeV meV eV keV MeV GeV TeV

Wechselwirkungsstärke: gravitativ, also nur über die Schwerkraft – sehr schwach

Suchmethode: mit Hilfe von Teleskopen über den Gravitationslinseneffekt; bei Verschmelzung mit Gravitationswellendetektoren; beim Zerstrahlen mit Gammateleskopen.

Besondere Eigenschaften: muss ganz früh im Universum entstanden sein. Einziger Kandidat jenseits der Welt der Elementarteilchen.

Bereits heute gibt es drei Gammaobservatorien auf der Welt – VERITAS in Arizona, MAGIC auf den Kanaren und H.E.S.S. in Namibia. Doch während sie aus maximal fünf Einzelteleskopen bestehen, sollen es bei CTA rund 100 sein. Die größten werden einen Spiegeldurchmesser von 23 Metern besitzen, dazu kommen mittlere und kleine Teleskope, jeweils spezialisiert auf unterschiedliche Energiebereiche. Um den gesamten Himmel im Auge zu haben, sind zwei Standorte geplant – ein kleinerer auf der Kanareninsel La Palma, ein größerer auf der Südhalbkugel in Chile, auf einer Fläche groß wie 100 Fußballfelder.

„Ich erwarte mir eine Revolution unseres Weltbilds, denn mit CTA können wir alles zehnmal besser machen als mit den bisherigen Teleskopen“, sagt Christian Stegmann. Bei DESY ist er Direktor des neuen Bereichs Astroteilchenphysik, der Anfang 2019 gegründet wurde. DESY



Christian Stegmann ist Direktor für Astroteilchenphysik bei DESY.

ist zu 25 Prozent Anteilseigner bei CTA – und damit stark in das Großprojekt involviert. „Unter anderem kümmern wir uns um die Kameraentwicklung für die kleinen Teleskope und die Entwicklung der Steuerungssoftware“, sagt Stegmann. „Außerdem wird DESY in Zeuthen Sitz des Science Data Management Centre sein, der Neubau ist bereits in Planung.“ Und: DESY ist federführend für den Bau der insgesamt 40 mittelgroßen Teleskope.

„Ich erwarte mir eine Revolution unseres Weltbilds“

Christian Stegmann, DESY

Den Prototyp in Berlin-Adlershof hat Markus Garczarzyk vorsichtshalber wieder in die sichere Parkposition gefahren – ein wenig lugt die Sonne hinter den Wolken hervor. Der Physiker zeigt auf den zwölf Meter großen Reflektor. Der erinnert an einen übergroßen Rasierspiegel. Allerdings besteht er nicht aus einem Stück, sondern aus Dutzenden von Einzelspiegeln, Stückpreis 2500 Euro, angeordnet in einer Bienenwabenstruktur. Sie bündeln das Licht auf eine 16 Meter entfernte Spezialkamera. „Insgesamt werden wir mehr als 4000 dieser Spiegel bauen“, sagt Garczarzyk. „Das ist in angemessener Zeit nur als Massenproduktion zu schaffen.“

Seit 2013 ist der Prototyp in Betrieb. Seitdem haben die Forscher gemeinsam mit internationalen Partnern das Teleskop für die Serienfertigung vorbereitet, Kosten reduziert und Fehler ausgemerzt. „Wir haben unzählige Tests mit den Spiegeln gemacht und verschiedene Versionen getestet“, sagt Garczarzyk und zeigt auf einen Lagerplatz in der Ecke: „Da liegen alte Spiegel, die zum Teil bei den Tests kaputtgegangen sind.“ Demnächst sollen die ersten Teleskope auf La Palma aufgebaut werden, später dann in Chile. Der Großteil der Teleskope soll 2025 fertig sein – und dann unter anderem nach Gammaspuren von Dunkler Materie Ausschau halten.

Suche am Südpol

Eine andere Art von Teleskop findet sich an einem höchst exotischen Ort – dem Südpol. Dort lauert IceCube auf Neutrinos – überaus fadenscheinige Geisterteilchen aus dem All, die über ferne Gewaltprozesse Auskunft geben können. Höchst selten stößt so ein Neutrino mit einem Atomkern im drei Kilometer dicken Eispanzer zusammen.

Gesucht:
Axion



Gruppe: WISP, Weakly Interacting Slim Particles

Masse: zwischen 0,1 und 1 meV


µeV meV eV keV MeV GeV TeV

Wechselwirkungsstärke: superschwach

Suchmethode: zum Beispiel mit ALPS II bei DESY

Besondere Eigenschaften: kann durch die Wand gehen und sich im Magnetfeld in Licht verwandeln. Historisch gar nicht als Dunkle-Materie-Teilchen gedacht, würde also zwei physikalische Probleme mit einer Klappe schlagen.

Gesucht:
Gravitino



Gruppe: SUSY, Supersymmetric Particles

Masse: im GeV- bis TeV-Bereich

µeV meV eV keV MeV GeV TeV

Wechselwirkungsstärke: superschwach

Suchmethode: wegen seiner schwachen Wechselwirkung mit dem Rest des Universums sehr schwer aufzuspüren. Es könnte allerdings sehr langsam in Lichtteilchen und Neutrinos zerfallen, was mit Gamma-teleskopen nachweisbar wäre.

Besondere Eigenschaften: supersymmetrisches Partnerteilchen des Gravitons



Markus Ackermann
ist Neutrino-Astronom
bei DESY.

Dabei entsteht ein schwaches bläuliches Leuchten, das sich im Eis ungehindert ausbreitet. Dort stecken 5000 basketballgroße Spezi­alsensoren, verteilt über ein Volumen von einem Kubikkilo­meter, und fangen die Leuchtsignale auf.

Unter Umständen könnte IceCube dabei auch Dunkle Materie ins Netz gehen. So halten es Theoretiker für möglich, dass sich Dunkle Materie im Inneren der Sonne anreichert. „Dort könnte sie zerfallen“, sagt DESY-Physiker Markus Ackermann. „Und die einzigen Teilchen, die dabei entstehen und es aus der Sonne heraus schaffen könnten, wären Neutrinos.“ Zwar haben die Fachleute bislang noch nichts gefunden. Aber sie konnten bereits bestimmte Eigenschaften von Dunkle-Materie-Kandidaten eingrenzen. „Das sind Messungen, die nur mit einem Neutrino­teleskop möglich sind“, sagt Ackermann.

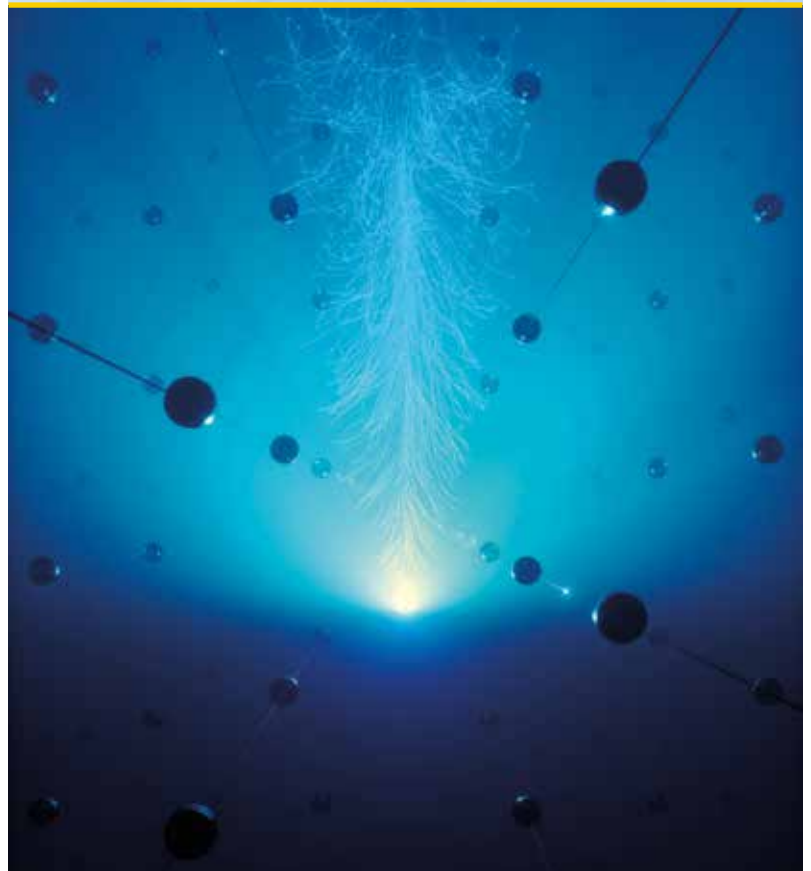
Eine zweite Variante: Irgendwo im Kosmos zerfällt ein extrem schweres Dunkle-Materie-Teilchen in Neutrinos, die im glasklaren Eis der Antarktis detektiert werden könnten. „Im Moment sieht es nicht so aus, als sollte es solche Teilchen geben“, sagt Ackermann. „Aber auf lange Sicht können sie sich durch ein spezielles Spektrum verraten.“ Und schließlich lauert das IceCube-Team auf Anzeichen einer neuen Neutrinosorte, den sogenannten sterilen Neutrinos. Sie würden noch schwächer auf Materie reagieren als normale Neutrinos und sich faktisch nur über ihre Gravitation bemerkbar machen.

*„Das sind Messungen,
die nur mit einem
Neutrino­teleskop
möglich sind“*

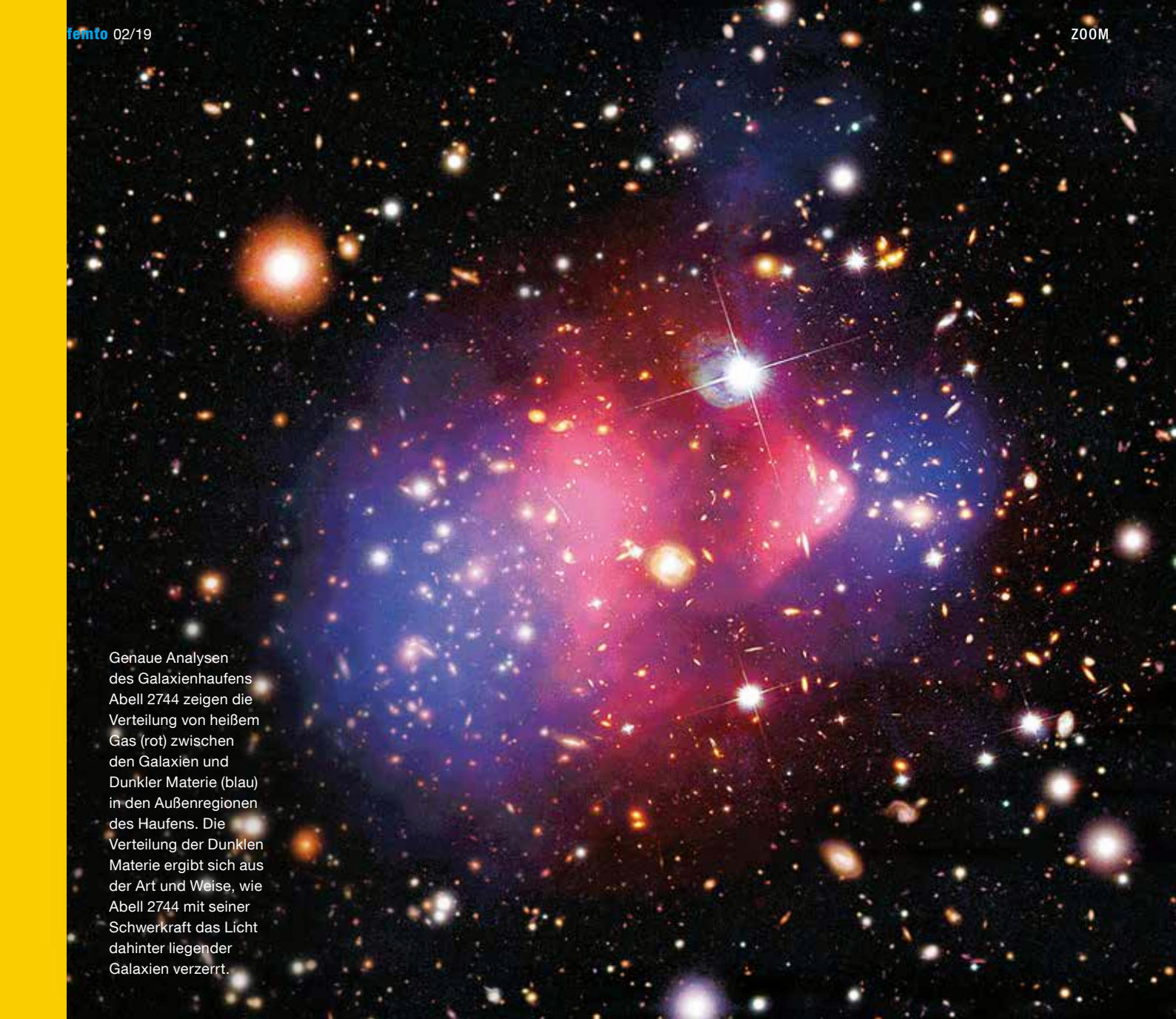
Markus Ackermann, DESY

Immerhin legen Symmetriegründe nahe, dass es solche Sonderlinge tatsächlich geben könnte – und zwar in mehreren Sorten. Im Prinzip könnten einige davon schwer genug sein, um Dunkle Materie auszumachen.

Die Idee: Gewöhnliche Neutrinos könnten sich im Flug in ihre sterilen Verwandten verwandeln. „IceCube könnte durchaus Anzeichen für solche Oszillationen in leichte sterile Neutrinos sehen“, beschreibt Ackermann. „Das wäre ein mögliches Indiz, dass es auch schwerere sterile Neutrinos geben könnte, die dann womöglich hinter der Dunklen Materie stecken.“ Bislang hat IceCube zwar noch nichts gefunden. Doch die Fachleute planen ein Upgrade, das die Empfindlichkeit des Südpol-Detektors erhöhen soll. >>



IceCube auf Neutrinosuche am Südpol: Die seltenen Neutrinkollisionen lösen im unterirdischen Eis Teilchenschauer aus, die bläulich aufleuchten. Das Licht wird von empfindlichen Detektoren (Photomultiplier) registriert, die in langen Ketten bis zu 2500 Meter tief ins antarktische Eis eingeschmolzen sind.



Genauere Analysen des Galaxienhaufens Abell 2744 zeigen die Verteilung von heißem Gas (rot) zwischen den Galaxien und Dunkler Materie (blau) in den Außenregionen des Haufens. Die Verteilung der Dunklen Materie ergibt sich aus der Art und Weise, wie Abell 2744 mit seiner Schwerkraft das Licht dahinter liegender Galaxien verzerrt.

Dunkle Spiegelwelt

Manche Theoretiker allerdings wollen nicht so recht daran glauben, dass tatsächlich neue, hypothetische Elementarteilchen hinter der Dunklen Materie stecken. Stattdessen meinen sie, dass das Newtonsche Gravitationsgesetz auf großen Skalen – dem Durchmesser von Galaxien – versagt. Hier könnte eine Theorie namens MOND gelten, die modifizierte Newtonsche Dynamik.

Zwar ließe sich damit durchaus erklären, warum Galaxien stabil sind und nicht auseinanderfliegen. Dennoch scheint die MOND-Hypothese in den letzten Jahren aus der Mode zu kommen: „Zwar gibt es da noch ein paar Gallier in ihrem Dorf, die dafür kämpfen“, schmunzelt Kai Schmidt-Hoberg. „Aber 99 Prozent der Community glaubt nicht daran.“ Der Grund: Zwar

kann die Theorie die Rotationsgeschwindigkeit in den Galaxien erklären, nicht aber andere durch die Dunkle Materie hervorgerufene Phänomene, etwa die Strukturbildung im frühen Universum.

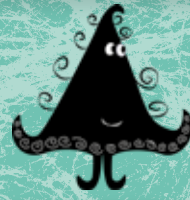
Stattdessen verfolgt Schmidt-Hoberg einen anderen Ansatz und beschäftigt sich mit sogenannter selbstwechselwirkender Dunkler Materie. Die meisten Theorien gehen davon aus, dass sich Dunkle-Materie-Teilchen weitgehend ignorieren, wenn sie irgendwo aufeinandertreffen. „Begegnen sich zwei dieser Teilchen, passiert in der Regel nicht viel“, beschreibt der Theoretiker. „Aber es könnte auch ganz anders sein, nämlich, dass diese Teilchen so stark aufeinander reagieren, als würden sie wie Billardkugeln aneinanderstoßen.“ Würde sich das bewahrheiten, hätte es für die

Natur der Dunklen Materie gravierende Folgen: „Dann ließen sich viele Kandidaten ausschließen, insbesondere die WIMPs, aber auch die Axionen“, sagt Schmidt-Hoberg. „Die nämlich zeigen keine große Selbstwechselwirkung.“ Die Folge wäre ein regelrechter Paradigmenwechsel – die Dunkle Materie wäre viel komplexer als gedacht. Es könnte gar eine Art dunkle Spiegelwelt existieren – ein Schattenkosmos aus komplett neuen Teilchen und Kräften. „Es könnte so etwas wie dunkle Protonen oder dunkle Elektronen geben“, spekuliert Schmidt-Hoberg. „Und sogar so etwas wie dunkles Licht.“

Allerdings würde diese Schattenwelt praktisch nicht mit unserer Materie interagieren. Ein direkter Nachweis wäre so gut wie unmöglich. Deshalb lässt sich diese Hypothese wohl nur indirekt belegen – durch einen genauen Blick auf ferne Galaxien. „Es gibt Hinweise, dass die Konzentration von Dunkler Materie in den Zentren von Galaxien nicht so groß ist, wie man es eigentlich erwartet“, erläutert Schmidt-Hoberg. Das ließe sich erklären, indem man annimmt, dass die Dunkle Materie stärker mit sich selbst wechselwirkt als gemeinhin angenommen: Da sich die Teilchen bildlich gesprochen gegenseitig wegrempeeln würden, könnten sie sich in den Galaxienzentren weniger stark anreichern – so die Idee.

Eines aber ist klar: Die Lage ist verzwickelt. Mittlerweile gibt es eine regelrechte Flut an Theorien über die Dunkle Materie. Manche erscheinen plausibler, andere eher exotisch. Die Folge: Schließt man eine Theorie durch neue Messdaten aus, springen andere dafür in die Bresche. „Den kompletten Parameterraum wird man in naher Zukunft nicht erforschen können“, meint Markus Ackermann. Und das bedeutet: Selbst wenn die anstehenden Experimente den Ursprung der Dunklen Materie nicht enträtseln können, heißt dies keineswegs, dass es sie nicht gibt.

Gesucht:
SIMP



Strongly Interacting Massive Particles

Masse: im GeV-Bereich

µeV meV eV keV MeV GeV TeV

Wechselwirkungsstärke: stark
(im dunklen Sektor)

Suchmethode: Weil es sehr stark auf und mit sich selbst reagiert, könnte es sich in astrophysikalischen Systemen, zum Beispiel um Sterne herum, zeigen. Bei Kollisionen von Sternsystemen wären die SIMPs relativ zu den zugehörigen Sternen verschoben.

Besondere Eigenschaften: typischerweise Teil eines komplexeren dunklen Sektors

Gesucht:
Fuzzy
dark
matter



Scalar Field Dark Matter

Masse: extrem leicht (im Bereich von 10^{-22} eV)

µeV meV eV keV MeV GeV TeV

Wechselwirkungsstärke: superschwach

Suchmethode: astrophysikalische Beobachtung über Welle-Teilchen-Dualismus. Die Welle ist dabei so groß wie eine ganze Galaxie! Man würde sie nur indirekt mit Hilfe von Teleskopen nachweisen können.

Besondere Eigenschaften: hat eher Wellen- als Teilcheneigenschaften

„Es könnte so etwas wie dunkle Protonen oder dunkle Elektronen geben. Und sogar so etwas wie dunkles Licht“

Kai Schmidt-Hoberg, DESY



Dieser Ausschnitt aus der Illustris-Simulation – einer der weltweit größten astrophysikalischen Simulationsreihen zur Entstehung und Entwicklung von Galaxien – zeigt, wie ein großer Galaxienhaufen im heutigen Universum in das Netz aus Dunkler Materie eingewoben ist. Die gezeigte Region ist etwa 300 Millionen Lichtjahre breit.

KLUGES UPCYCLING

Wie das Hightech-Experiment ALPS II mit gebrauchten Magneten nach Dunkler Materie sucht



Für die Suche nach Axionen setzt ALPS II auf dieselbe Präzisionslasertechnik wie Gravitationswellendetektoren.

D Dieter Trines steuert seinen alten BMW in eine Sackgasse, sie endet am Rand des Hamburger Volksparks. Hier, versteckt hinter Bäumen, liegt die Halle H1 – ein Relikt aus vergangenen Forschertagen. „Sie gehört zum Speicherring HERA“, erzählt Trines, einst Beschleunigerdirektor bei DESY. „Mit einem Umfang von gut sechs Kilometern war das einmal der größte Beschleuniger Deutschlands.“ 2007 wurde HERA abgeschaltet und eingemottet – und mit ihm, 20 Meter tief im Untergrund, die Halle H1. Doch als Trines mit dem Fahrstuhl nach unten fährt, stößt er auf reges Treiben. Techniker bauen Teile des Beschleunigers ab, um Platz für ein neues Experiment zu schaffen: ALPS II soll nach einer neuen, hypothetischen Teilchengattung suchen – den Axionen. Sollte es sie geben, könnten sie in Unmengen das Weltall bevölkern und die rätselhafte Dunkle Materie bilden.

Eigentlich wurde das Axion Ende der 1970er Jahre erdacht, um bestimmte Schwierigkeiten bei der starken Wechselwirkung – einer der vier Grundkräfte der Natur – aus dem Weg zu räumen. „Später kamen Theoretiker auf die Idee, dass Axionen auch hinter der Dunklen Materie stecken könnten“, sagt ALPS-Projektleiter Axel Lindner. Da die geisterhaften Teilchen im Vergleich zu den WIMPs extrem leicht sein dürften, sprechen die

Fachleute von WISPs (Weakly Interacting Slim Particles). 2005 stieß die Fachwelt auf Hinweise, dass es Axionen tatsächlich geben könnte. Daraufhin initiierte Andreas Ringwald, Theoretiker bei DESY, ein Experiment namens ALPS (Any Light Particle Search). 2010 präsentierte das Team um Lindner die Ergebnisse – und fand vorerst nichts.

Um genauer hinzuschauen, starteten die Physiker gemeinsam mit dem Albert-Einstein-Institut in Hannover, der Universität Mainz, der britischen University of Cardiff und der University of Florida in Gainesville nun ein Nachfolgeexperiment: ALPS II ist deutlich größer und empfindlicher als sein Vorgänger. Das Prinzip: Laserlicht wird in ein Magnetfeld gelenkt. Dort könnte es sich in ein Axion verwandeln. „Dieses Axion würden dann durch eine lichtundurchlässige Wand fliegen und dort wieder in ein Magnetfeld eintreten“, erläutert Lindner. „Hier könnte sich das Axion in Licht zurückverwandeln, das wir mit hochempfindlicher Messtechnik nachweisen wollen.“

Mit rund drei Millionen Euro, zum Teil finanziert durch die Heising-Simons-Stiftung aus den USA, war das Budget allerdings knapp bemessen. Also konnte das Team keine neuen Magneten konstruieren, sondern musste auf gebrauchte zurückgreifen. Die entscheidende Idee kam von Dieter Trines. „Ich habe vorgeschlagen, die alten, gekrümmten HERA-Magneten geradezubiegen, so dass sie für unser Experiment brauchbar sind“, erinnert er sich. „Das hat Axel Lindner so begeistert, dass er gesagt hat: Mach doch bei uns mit!“

Die Prozedur geschieht in einem alten HERA-Teststand. Jeder Magnet ist eine zwölf Meter lange und 70 Zentimeter dicke Röhre und hat ein hochkomplexes Innenleben. Um den zentralen Bereich, das Strahlrohr, geradezubiegen, wird die Röhre an beiden Enden fixiert, um dann in ihrer Mitte per Schraubwerkzeug mit einer Kraft von vier Tonnen zurechtgedrückt zu werden. „Im Grunde sehr einfach und billig“, meint Trines. 24 dieser geradegebogenen Magneten werden demnächst in den HERA-Tunnel eingebaut – auf einer Strecke von rund 300 Metern.

Im Kontrast zu den Magneten aus den 1980er Jahren steht die laseroptische Messtechnik

– sie ist hochmodern. „Zum Großteil bedienen wir uns Techniken, die in Gravitationswellendetektoren genutzt werden“, erläutert DESY-Physiker Aaron Spector. „So ist unser Laser im Prinzip der gleiche, der bei den beiden LIGO-Detektoren in den USA zum Einsatz kommen.“ Gravitationswellen sind winzige, sich lichtschnell ausbreitende Dellen in der Raumzeit, hervorgerufen durch kosmische Gewaltakte. Um sie aufzuspüren zu können, bedarf es einer überaus sensiblen Messtechnik: Laser, die äußerst stabil ihre Frequenz halten, und Sensoren, die selbst schwächste Lichtschimmer registrieren. Mit diesem Prinzip gelang LIGO 2015 der erste Nachweis einer Gravitationswelle, verursacht durch die Kollision zweier Schwarzer Löcher – wofür es 2017 den Physik-Nobelpreis gab.

„Später kamen Theoretiker auf die Idee, dass Axionen auch hinter der Dunklen Materie stecken könnten

Axel Lindner, DESY

Bei ALPS schicken die Forscher ihren hochpräzisen Laserstrahl durch das Feld von zwölf Magneten und lassen es mit Hilfe von Spiegeln hin- und herlaufen. Sollte dabei ein Axion entstehen, würde es durch eine lichtdichte Wand geistern, wo die restlichen zwölf Magneten stehen. Falls

sich in deren Feld das Axion in Licht zurückverwandelt, liegen verschiedene Detektoren auf der Lauer, um dieses Licht zu registrieren. „Sie sind in der Lage, einzelne Photonen aufzuspüren, also einzelne Lichtteilchen“, erklärt Spector. Hinzu kommt ein spezielles System, mit dem sich die Komponenten extrem schnell und präzise positionieren lassen. „Dadurch können wir den Einfluss von allgegenwärtigen Vibrationen minimieren, die unser Experiment ansonsten sehr stören würden“, sagt Spector. Spätestens 2021 soll die Datennahme starten. Würde ALPS tatsächlich fündig werden, wäre das eine Sensation: Das Axion wäre das erste Teilchen jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik – und ein überaus vielversprechender Kandidat für die Dunkle Materie.

Die Forscher tüfteln bereits an zwei Folgeexperimenten. „Manche Theorien gehen davon aus, dass Axionen in der Sonne erzeugt werden“, sagt Axel Lindner. „Diese Teilchen wollen wir mit einem speziellen Teleskop aufspüren, dem International Axion Observatory.“ IAXO, so der Kurzname, soll auf dem DESY-Gelände dem Tagesverlauf der Sonne folgen. Basis ist ein lichtdichter Magnet, in dem sich ein Sonnenaxion in Röntgenlicht umwandeln könnte. Läuft alles nach Plan, könnte ein erster Prototyp namens babyIAXO schon 2023 seinen Betrieb aufnehmen. Danach soll ein weiteres Experiment klären, ob Axionen tatsächlich für die Dunkle Materie verantwortlich sind: Ab 2028 könnte MADMAX (Magnetized Disk-and-Mirror Axion) herausfinden, ob es in unserer Umgebung vor Axionen womöglich nur so wimmelt.

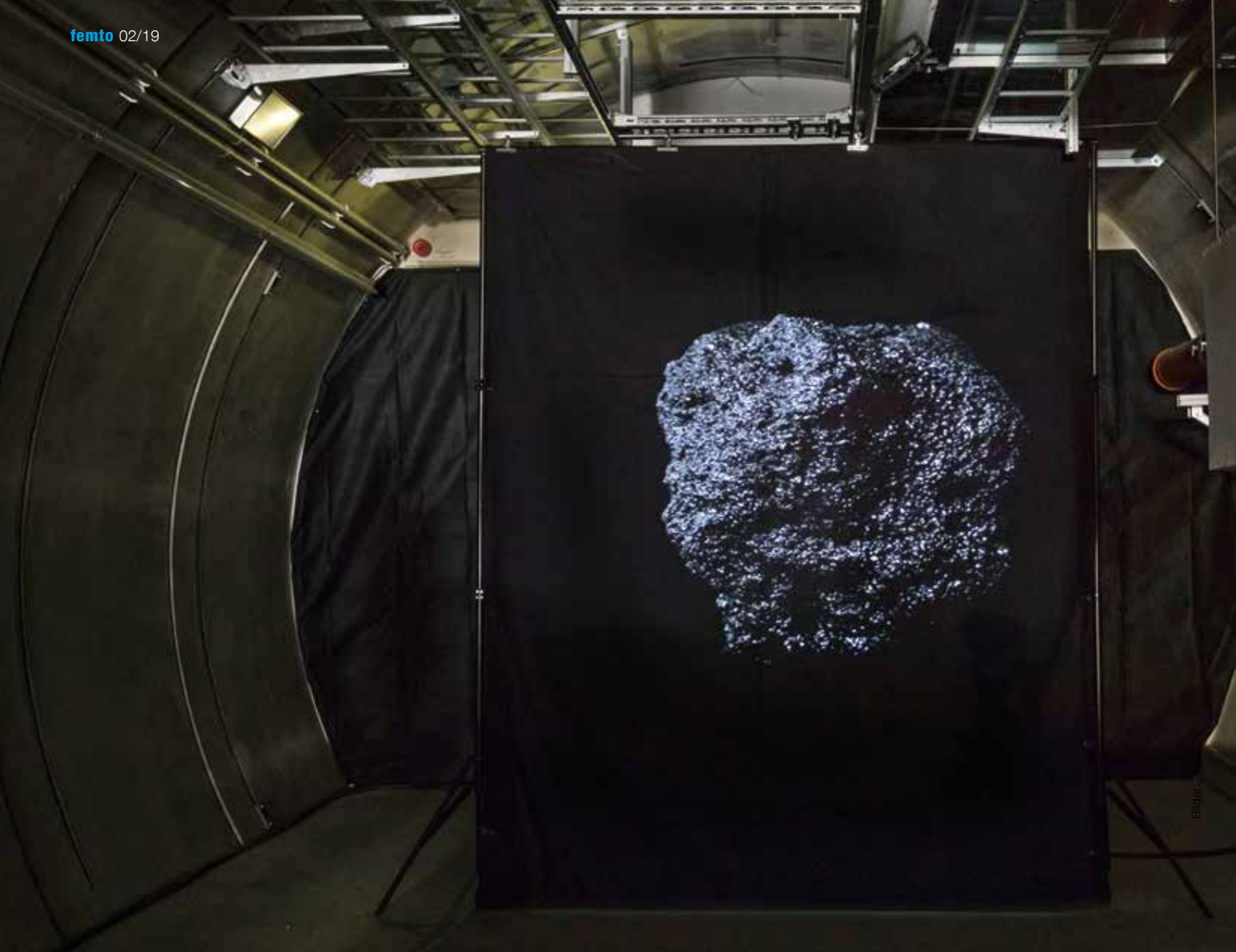


Axel Lindner leitet die ALPS-Gruppe bei DESY.

Bilder: DESY; DESY, Gesine Born



Licht durch die Wand: Je zwölf dieser geradegebogenen HERA-Magneten werden für ALPS II vor und hinter einer lichtundurchlässigen Wand installiert. Dann leuchtet ein starker Laser von der einen Seite auf die Wand. Registrieren die Detektoren auf der anderen Seite der Wand einen Lichtblitz, wäre das ein Hinweis auf ein Axion, das sich im Magnetfeld vor der Wand aus einem Lichtteilchen gebildet und hinter der Wand wieder zurückverwandelt haben könnte.



DIE KUNST DER DUNKLEN MATERIE

Im Herbst 2017 war DESY vier Wochen lang Schauplatz eines außergewöhnlichen Events: Unter dem Motto „Dark Matter“ haben 15 Kunstschaaffende aus ganz Deutschland ihre Werke auf dem Forschungscampus in Hamburg ausgestellt. Das Projekt war ein großer Erfolg – und wird 2020 seine Fortsetzung finden, wie DESY-Physiker Christian Schwanenberger erzählt.

femto: Wie kam die Idee einer Kunstausstellung bei DESY zustande?

Christian Schwanenberger: Rein zufällig. Auf einer Geburtstagsparty auf St. Pauli war ich mit der Künstlerin Tanja Hehmann ins Gespräch gekommen. Rasch stellten wir fest, dass Kunst und Wissenschaft zahlreiche Parallelen aufweisen – zum Beispiel, dass in beiden Disziplinen unglaublich viel experimentiert wird. Deshalb hatten wir das Gefühl, es könnte sich lohnen, beides in Kommunikation zu bringen.

femto: Warum haben Sie die Dunkle Materie als Thema gewählt?

Christian Schwanenberger: Wir Physiker wissen zwar, dass es Dunkle Materie geben muss. Aber wir haben keine Ahnung, woraus sie besteht und was wir da eigentlich suchen. Ähnliches findet sich in der Kunst: Auch sie beschäftigt sich manchmal mit Fragen, bei denen gar nicht genau klar ist, wonach man eigentlich sucht. Insofern schien uns die Dunkle Materie als thematische Klammer für eine Ausstellung sehr geeignet. Allerdings haben sich nicht alle Künstlerinnen und Künstler sklavisch an das Motto gehalten –



„time - image (dark matter)“ ist eine Videoskulptur von Sybille Neumeyer, in der sich ein Gesteinsbrocken in Erdrotationsgeschwindigkeit um sich selbst dreht.

eher logisch und linear, Künstler eher in der Fläche oder im Raum. Es war wirklich spannend, eine gemeinsame Sprache zu entwickeln. Faszinierend war auch, wie sich die Kunstschaaffenden durch spezielle Locations auf dem DESY-Gelände inspirieren ließen.

„Es war wirklich spannend, eine gemeinsame Sprache zu entwickeln“

Christian Schwanenberger, DESY

Zwei Beispiele: Das Künstlerduo „wearevisual“ baute aus großen Betonklötzen, die zur Abschirmung von Strahlung dienen, eine Art begehbare Burg. Drückte man innen auf einen Knopf, wurde eine schwarze Plastikfolie aufgeblasen, quasi als Symbol für die Dunkle Materie. Und im unterirdischen Tunnel des ehemaligen HERA-Beschleunigers hat der Audiokünstler Chris Pfeil eine Lautsprecherinstallation aufgebaut, bei der man das Gefühl hatte, den schnellen Teilchen beim Fliegen zuzuhören.

femto: Wie kam die Ausstellung an?

Christian Schwanenberger: Zu den sechs Events, zu denen wir im Rahmen der Aktion geladen hatten, kamen insgesamt 2500 Besucher. Drei Viertel von ihnen waren zuvor noch nie bei DESY gewesen – es war offenbar gelungen, ein neues Publikum für unsere Forschung zu interessieren. Auch bei den Besuchern des Tags der offenen Tür bei DESY kam die Ausstellung gut an. Nach der Ausstellung haben uns dann viele Kunstschaaffende kontaktiert und gefragt, ob sie bei der nächsten Ausgabe mitmachen können. Kurz gesagt: Das Projekt war so erfolgreich, dass wir es nun fortsetzen.

femto: Wann also wird bei DESY wieder der Kunst auf Wissenschaft treffen?

einen gewissen Spielraum wollten wir ihnen natürlich lassen.

femto: Wie gestaltete sich die Zusammenarbeit mit den Kunstschaaffenden – eine Kollision zweier Kulturen?

Christian Schwanenberger: In der Tat: Als wir uns das erste Mal trafen, hatte ich zunächst das Gefühl, dass wir komplett aneinander vorbeiredeten. Es hat eine Zeit gedauert, bis wir begriffen, was das Gegenüber überhaupt meinte. Physiker denken



Wissenschaft trifft Kunst: Physiker Christian Schwanenberger führt Besucher durch die Ausstellung (oben); Daniel Engelberg präsentierte seine experimentellen Module in einer Testhalle für Teilchenbeschleuniger.

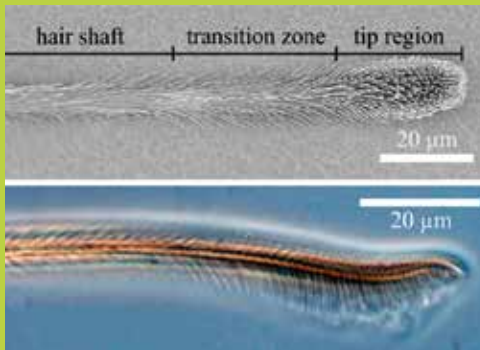
Christian Schwanenberger: Eine Veranstaltung gab es bereits im Sommer 2018 in Berlin, bei der sich der Künstler Tim Otto Roth in einer Licht- und Klanginstallation mit dem Neutrinooteleskop IceCube auseinandergesetzt hat. Für Ende 2020 bereiten wir dann wieder eine große Ausstellung in Hamburg vor. Dabei wollen wir versuchen, die Wechselwirkung zwischen Kunst und Wissenschaft zu intensivieren: Wir planen, Tandems aus Künstlern und Wissenschaftlern zu bilden, die gemeinsame Ideen entwickeln. Außerdem wollen wir den Kunstschaaffenden anbieten, einige Wochen bei DESY zu verbringen, um sich intensiv mit unseren Themen auseinanderzusetzen.

Was Spinnen an der Decke hält

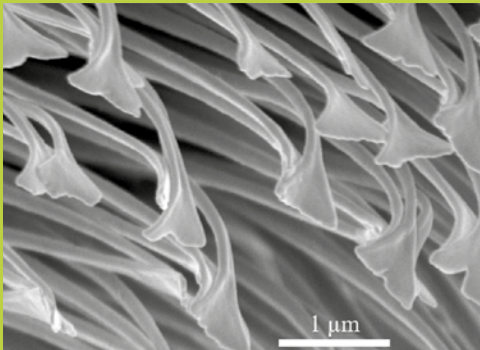
Um herauszufinden, warum sich die Jagdspinne *Cupiennius salei* so gut an senkrechten Oberflächen halten kann, untersucht das interdisziplinäre Forschungsteam die winzigen Hafthaare auf den Spinnenbeinen.



Unter dem Mikroskop werden unterschiedliche Bereiche des Hafthärchens sichtbar.



Im Rasterelektronenmikroskop sind an der Spitze des Hafthärchens die winzigen, haftenden Kontaktplättchen der Spinne zu sehen. Sie sind gerade einmal 20 Nanometer (millionstel Millimeter) dick.



Problemlos klettern Jagdspinnen an senkrechten Oberflächen oder bewegen sich über Kopf an der Decke. Den nötigen Halt dafür geben ihnen winzige Hafthärchen, die am Ende ihrer Beine sitzen. Diese borstenartigen Haare heißen in der Fachsprache Setae, Spinnen besitzen davon rund eintausend.

Wie auch der Spinnenpanzer bestehen die Härchen vor allem aus Proteinen und dem Vielfachzucker Chitin. Um mehr über ihre Feinstruktur herauszufinden, hat ein interdisziplinäres Forschungsteam aus den Bereichen Biologie und Physik der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) und des Helmholtz-Zentrums Geesthacht (HZG) den molekularen Aufbau dieser Härchen unter anderem an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III genauer untersucht.

Mit dem hochenergetischen Röntgenlicht fand das Team heraus, dass die Chitinmoleküle der Setae speziell angeordnet sind, damit sie den Belastungen beim ständigen Anhaften und Loslösen standhalten.

„Über ihre Anordnung in einer parallel verlaufenden Faserstruktur verstärken sie die Beine“, sagt Martin Müller vom Institut für Experimentelle und Angewandte Physik, Leiter des Bereichs Werkstoffphysik am HZG. „Außerdem kommen die Chitinmoleküle bis in die Spitzen der winzigen Hafthaare an den Spinnenbeinen vor.“ Ähnliche Hafthärchen finden sich auch bei Geckos, einer Echsenfamilie. Das Forschungsteam vermutet dahinter deshalb ein zentrales, biologisches Prinzip, um auf verschiedenen Untergründen haften zu können. Für die Entwicklung neuer Materialien mit hoher Belastbarkeit könnte das hilfreich sein.

Journal of the Royal Society Interface, 2019;

DOI: 10.1098/rsif.2018.0692

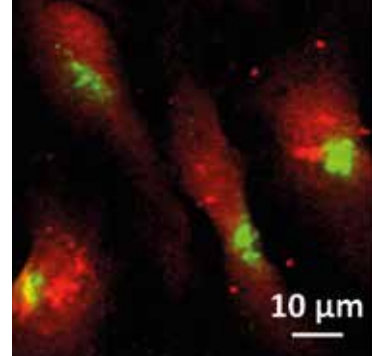
Parkinson-Symptome durch Mangan-Vergiftung

Eine neue Röntgenstudie enthüllt einen zentralen Mechanismus bei bestimmten erblichen parkinsonartigen Erkrankungen. So gilt eine Vergiftung mit Mangan, das in geringen Konzentrationen lebenswichtig ist, als eine mögliche Ursache für bestimmte Formen der Nervenkrankheit.

In Untersuchungen bei DESY sowie an der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle ESRF im französischen Grenoble konnte ein Forschungsteam detailliert zeigen, wie die Vergiftung mit dem Metall Mangan, die zu parkinsonartigen Symptomen führt, in der Zelle abläuft. Demnach sammelt sich das Mangan bei einem speziellen Gen-

defekt im Golgi-Apparat, der Versandzentrale für Eiweiße in der Zelle.

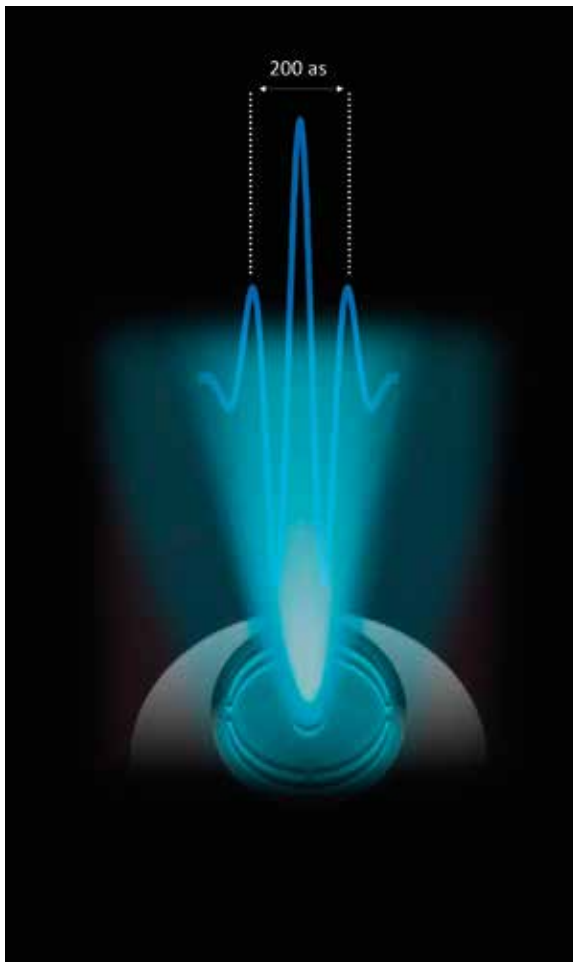
Das Team um Richard Ortega von der Universität Bordeaux hatte eine Mutation im Gen *SLC30A10* untersucht, die zuvor bei einer Reihe von familiären Parkinsonismus-Fällen aufgefallen war und offensichtlich zu vererbten Erkrankungen führen kann. „Bei der mutierten Form ist dieser Transport gestört, und es kommt zu giftigen Konzentrationen des Metalls in der Zelle“, sagt Ortega. „Ein genaues Verständnis dieser Mangan-Vergiftungen ist ein entscheidender Schritt, um eine mögliche Therapie entwickeln zu können.“ Parkinsonismus ist ein Sammelbegriff



Wo das Mangan steckt: Eine Röntgenfluoreszenzaufnahme zeigt die Verteilung von Mangan (grün) in den untersuchten Zellen (rot).

für Erkrankungen, die der eigentlichen Parkinson-Krankheit ähneln und unter anderem zu der charakteristischen Schüttellähmung führen.

ACS Chemical Neuroscience, 2018;
DOI: 10.1021/acchemneuro.8b00451



Die Hologrammtechnik kann Lichtpulse im Attosekundenbereich vermessen.

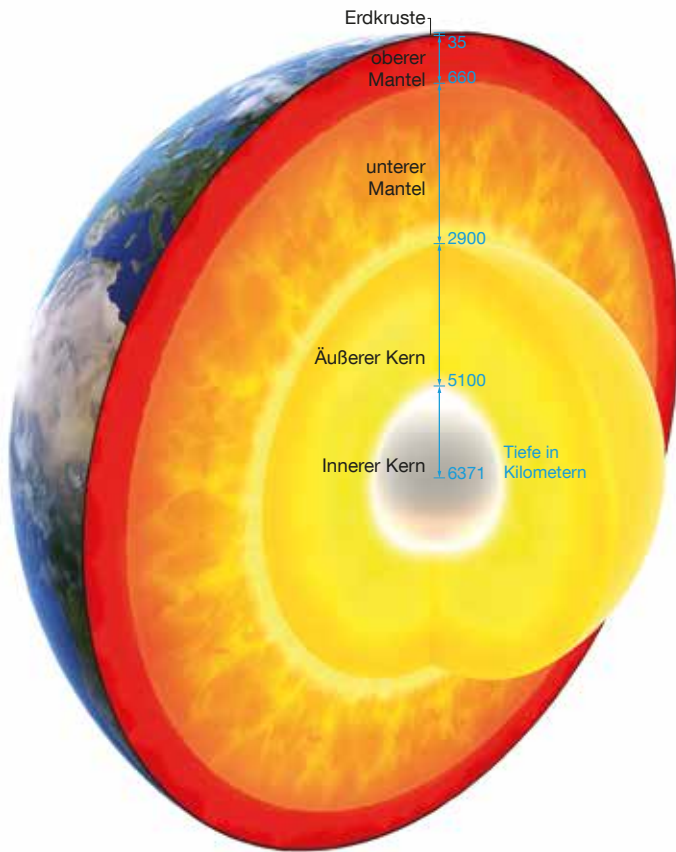
Hologrammtechnik misst extrem kurze Lichtpulse

Eine neue optische Technik kann ultrakurze Röntgenblitze im Attosekundenbereich analysieren. Eine Attosekunde ist ein Milliardstel einer milliardstel Sekunde, also 0,000 000 000 000 000 001 Sekunden (10^{-18} s). Attosekundenblitze sind kurz genug, um die extrem schnellen Bewegungen von Elektronen in Materie in Echtzeit zu erfassen. Eine Voraussetzung für solche Messungen ist jedoch, dass man die Eigenschaften der kurzen Blitze kennt.

Optische Verfahren, die normalerweise für solche Zwecke verwendet werden, lassen sich allerdings nicht ohne weiteres auf den Röntgenbereich ausdehnen. Hier bietet die Holographie einen Ausweg. Ein internationales Team, zu dem auch DESY-Forscherin Francesca Calegari gehört, hat auf diesem Weg die spektrale Intensität von zwei unbekanntem Attosekundenpulsen zusammen mit ihrer Überlagerung analysiert. Das Team zeigte dabei, dass sich die Summe dieser Beiträge wie ein Hologramm verhält, aus dem die zeitlichen Eigenschaften der beiden unbekanntem Pulse rekonstruiert werden können.

„Die Technik ist ein vielversprechendes Werkzeug, auch für die Charakterisierung anderer ultraschneller Lichtquellen“, sagt Calegari. Sie könne beispielsweise auf Freie-Elektronen-Laser erweitert werden und neue Möglichkeiten für die holographische Diagnostik ultrakurzer Ultraviolett- und Röntgenlaserpulse eröffnen.

Nature Photonics, 2019; DOI: 10.1038/s41566-018-0308-z



Die Erde im Querschnitt:
Illustration des inneren
Erdaufbaus

Neuer Blick ins Erdinnere

Eine innovative Röntgenmethode ermöglicht neue Hochdruck-untersuchungen von Proben unter den Bedingungen des tiefen Erdmantels. Für das Verfahren setzte ein Team um Georg Spiekermann von DESY, dem Deutschen Geoforschungszentrum (GFZ) und der Universität Potsdam Proben aus Germaniumdioxid einem Druck von bis zu 100 Gigapascal aus, rund eine Million Mal so viel wie der Luftdruck auf Meereshöhe. Dieser Druck entspricht einer Tiefe von 2200 Kilometern im unteren Erdmantel.

Die Röntgenuntersuchung zeigte, dass die Koordinationszahl von Germaniumdioxid selbst unter diesem extremen Druck nicht höher steigt als sechs. Das heißt, die Germaniumatome besitzen auch in der Hochdruckphase weiterhin je sechs Nachbaratome wie schon bei 15 Gigapascal. Dieses Ergebnis ist für die Erforschung des Erdinneren von großem Interesse, denn Germaniumdioxid hat dieselbe Struktur und verhält sich wie Siliziumdioxid, vermutlich der Hauptbestandteil des Magmas im unteren Erdmantel.

Da Schmelzen wie Magma im Allgemeinen eine geringere Dichte haben als die feste Form desselben Materials, ist es ein seit Langem untersuchtes Rätsel, warum Magmen in großer Tiefe über geologische Zeiträume nicht aufsteigen. Die neuen Untersuchungen stützen die Vorstellung, dass sich im Magma des tiefen Erdmantels schwere Elemente anreichern müssen, damit es dort stabil existieren kann.

Physical Review X, 2019; DOI: 10.1103/PhysRevX.9.0111025

Gammastrahlung aus der Superblase

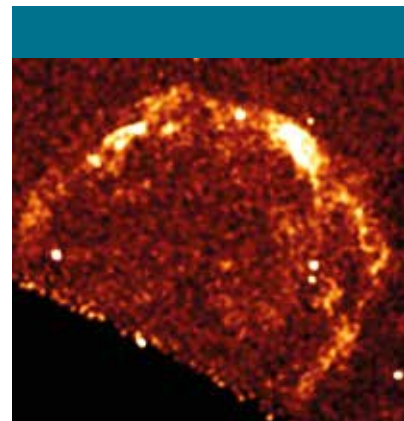
Ein internationales Forschungsteam hat den Produktionsprozess sehr energiereicher kosmischer Gammastrahlung aus einer sogenannten Superblase am Südhimmel aufgeklärt. Mit dem Röntgensatelliten „Chandra“ der US-Raumfahrtbehörde NASA konnten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler um Patrick Kavanagh vom Dublin Institute for Advanced Studies nachweisen, dass diese Gammastrahlung vor allem aus der Wechselwirkung schneller Elektronen mit dem Umgebungslicht stammt.

Die Superblase 30 Doradus C ist ein astronomisches Objekt in der Großen Magellanschen Wolke, einer Satellitengalaxie unserer Milchstraße. Die Große Magellansche Wolke produziert in hohem Tempo neue Sterne. Die

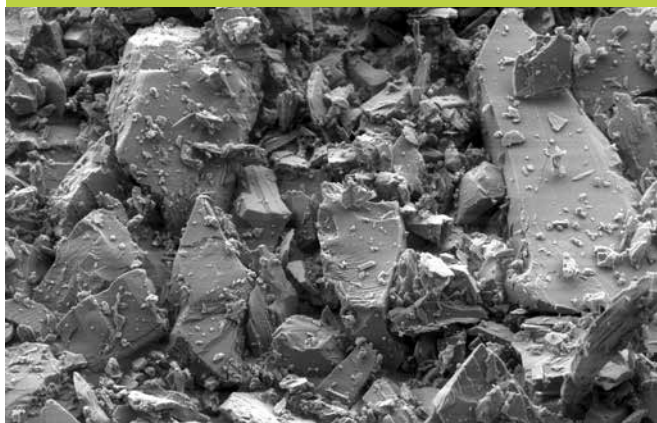
meisten davon sind große Riesensterne, dutzendfach massereicher als unsere Sonne. Diese schnellelebigen Riesensterne erzeugen starke Sternwinde, die in ihre kosmische Umgebung strömen, und beenden ihre relativ kurze Existenz in gewaltigen Supernova-Explosionen. Beide Phänomene zusammen erzeugen eine gigantische Blase im Gas der Satellitengalaxie.

„Aus der Superblase 30 Doradus C ist zwar sehr energiereiche Gammastrahlung nachgewiesen worden, welcher Prozess bei ihrer Entstehung dominiert, war bislang aber unbekannt“, erläutert Physiker Stefan Ohm von DESY.

Astronomy & Astrophysics, 2018;
DOI: 10.1051/0004-6361/201833659



Die Superblase 30 Doradus C, aufgenommen vom Satelliten „Chandra“



Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme des untersuchten Feldspatminerals. Die Bildweite beträgt ungefähr 0,036 Millimeter.

Meteoriteneinschläge im Labor

Ein deutsch-amerikanisches Forschungsteam hat Meteoriteneinschläge im Labor simuliert und die resultierenden Strukturänderungen in zwei weit verbreiteten Feldspatmineralien live mit Hilfe von Röntgenlicht verfolgt. Die Ergebnisse der Experimente bei DESY und am Argonne National Laboratory in den USA zeigen, dass diese Änderungen der atomaren Struktur je nach Kompressionsrate bei sehr unterschiedlichem Druck auftreten können.

Die Untersuchungen haben Bedeutung für die Rekonstruktion von Meteoriteneinschlägen anhand von Einschlagkratern auf der Erde und auf anderen erdähnlichen Planeten. Meteoriteneinschläge spielen eine wichtige Rolle bei der Entstehung und Entwicklung der Erde und anderer Himmelskörper in unserem Sonnensystem. Einschlagkrater können auch nach Hunderten bis Millionen Jahren noch Rückschlüsse auf Größe und Geschwindigkeit des jeweiligen Meteoriten sowie auf Druck und Temperatur während seines Einschlags erlauben. Forscherinnen und Forscher untersuchen dazu per Röntgenkristallographie Änderungen in der inneren Struktur des Kratermaterials und vergleichen die Beobachtungen mit Ergebnissen von Hochdruckexperimenten mit demselben Material im Labor. Um die Veränderungen der Kristallstruktur live verfolgen zu können, nutzte das Team unter anderem DESYs hochbrillante Röntgenlichtquelle PETRA III. Dabei kam ein empfindlicher und schneller Spezialdetektor zum Einsatz.

Earth and Planetary Science Letters, 2019;
DOI: 10.1016/j.epsl.2018.11.038

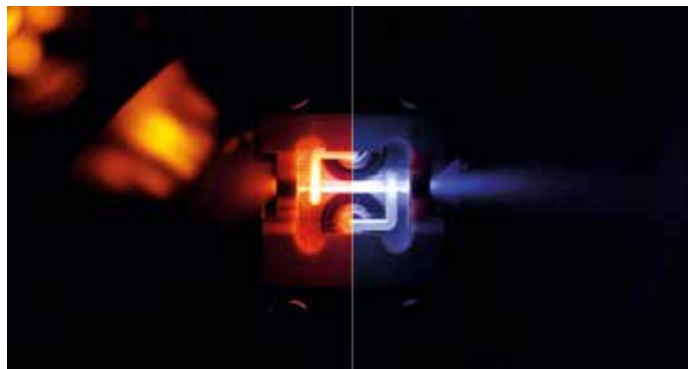
Neues Gas für Plasmalinsen

Mit einer Art Linse aus Plasma, einem ionisiertem Gas, lassen sich Teilchenstrahlen in Beschleunigern fokussieren. Ein internationales Team hat jetzt eine große Hürde beseitigt, die bisher den technischen Einsatz solcher Plasmalinsen in der Praxis verhindert hat.

In einer aktiven Plasmalinse sorgt ein starker elektrischer Strom für ein magnetisches Wirbelfeld, das einen Teilchenstrahl gleichzeitig in Höhe und Breite fokussieren kann. Diese Eigenschaft macht Plasmalinsen für den Einsatz in Teilchenbeschleunigern grundsätzlich sehr attraktiv. Eines der Hauptprobleme der Linsen war jedoch eine Fehlsichtigkeit, welche die Qualität der fokussierten Teilchenstrahlen während des Durchflugs durch die Plasmazelle zerstört.

Das Team von Forscherinnen und Forschern aus Oslo, Oxford, von DESY und CERN hat die Sorte des Gases, aus dem das Plasma erzeugt wird, vom üblicherweise verwendeten leichten Helium auf das schwerere Argon umgestellt. Dies verlangsamt die Wärmeleitung innerhalb des Gases so lange, dass sich direkt nach Zündung des Plasmas und Anschalten des Magnetstroms ein Teilchenpaket fokussieren lässt, ohne dass sich die Strahlqualität verschlechtert. Die Ergebnisse sind ein wichtiger Schritt, um aktive Plasmalinsen in Zukunft zu einer Standard-Beschleunigerkomponente zu machen.

Physical Review Letters, 2019; DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.194801



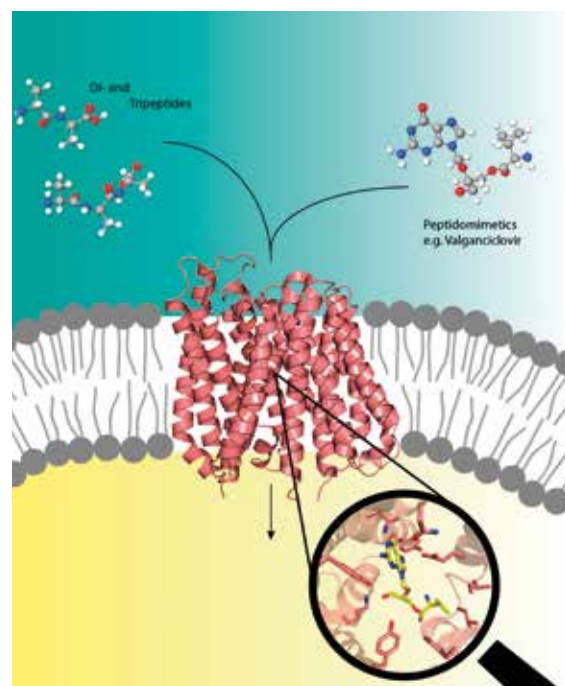
Das aus zwei Hälften zusammengesetzte Foto zeigt die Plasmalinse im Betrieb mit Helium (rot) und Argon (blau).

Medikamentenschleuse im Röntgenlicht

Untersuchungen an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III haben erstmals die Struktur eines biologischen Transportproteins in Verbindung mit einem Pro-Drug bestimmt. Pro-Drugs sind inaktive Medikamente, die erst im Körper in eine aktive, funktionelle Form umgewandelt werden. Sie können bestimmte körpereigene Transportproteine kapern, die in der Zellwand sitzen und normalerweise Peptide aus der Nahrung in die Zelle schleusen. Auf diesem Weg können Pro-Drugs direkt in die Zelle transportiert werden, was die Aufnahme des Wirkstoffs beschleunigt. Zwar ist das Pro-Drug-Konzept sehr effektiv, auf der molekularen Ebene ist aber wenig darüber bekannt, wie die Peptidtransporter im Detail aufgebaut sind und vor allem wie sie Pro-Drugs erkennen, binden und transportieren.

Ein Forschungsteam um Christian Löw und Jan Kosinski vom Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL), die am Hamburger Zentrum für Strukturelle Systembiologie (CSSB) forschen, einer Kooperation von zehn Forschungsinstitutionen einschließlich DESY, ist dabei einen wichtigen Schritt weitergekommen. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben die erste hochaufgelöste Struktur eines Komplexes aus einem Peptidtransporter und einem pharmakologisch relevanten Pro-Drug bestimmt: Valganciclovir, das gegen bestimmte Virusinfektionen eingesetzt wird. Die Ergebnisse könnten helfen, Medikamente und Pro-Drugs mit einer verbesserten Absorptionsrate zu entwickeln, um so die verabreichte Dosis zu verringern.

Journal of the American Chemical Society, 2019; DOI: 10.1021/jacs.8b11343



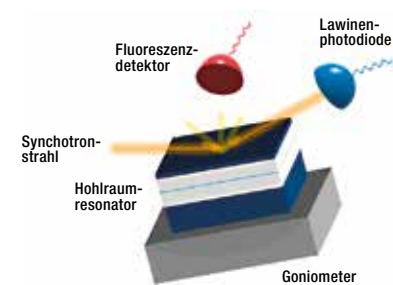
Medikamentenschleuse im Detail:
Durch die Peptidschleuse (Mitte) in der Zellmembran gelangen Nährstoffe (links oben) und Pro-Drugs (rechts oben) ins Zellinnere.

Kontrolle aus dem Nichts

Bestimmte optische Eigenschaften von Metallatomen lassen sich mit Hilfe virtueller Photonen steuern. Das zeigen Messungen an DESYs Röntgenquelle PETRA III. Virtuelle Photonen, die im klassischen Sinne gar nicht existieren, können im Vakuum gleichsam aus dem Nichts entstehen, um nach unvorstellbar kurzer Zeit wieder zu verschwinden. Wechselwirken diese Photonen während ihrer kurzen Existenz mit den Elektronen in einem Atom, verschieben sich dabei ganz leicht die Bindungsenergien der Elektronen.

Dieser fundamentale Effekt wurde erstmals 1947 von Willis Lamb an Wasserstoffatomen gemessen. Die nach ihm benannte Lamb-Verschiebung ändert sich allerdings grundlegend,

wenn daran viele gleichartige Atome beteiligt sind. Liegen diese räumlich sehr dicht beieinander, können virtuelle Photonen eine Wechselwirkung zwischen den Atomen verursachen. Diese 1973 vorhergesagte kollektive Lamb-



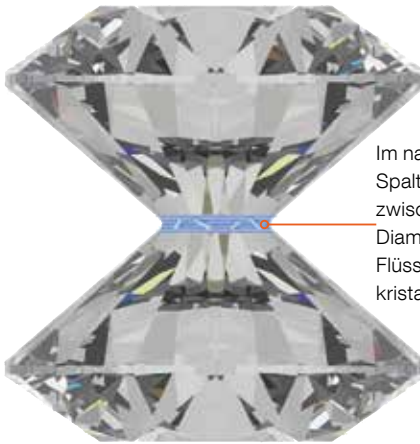
Experimenteller Aufbau zur Messung der kollektiven Lamb-Verschiebung am Metall Tantal

Verschiebung wurde erst 2010 durch die DESY-Gruppe von Ralf Röhlsberger nachgewiesen.

Einem Team um Röhlsberger ist es nun am Element Tantal gelungen, die kollektive Lamb-Verschiebung auch bei sogenannten Resonanzen der Elektronenhülle nachzuweisen. Dadurch ergeben sich vergleichsweise große Lamb-Verschiebungen, was einer deutlichen Veränderung der optischen Eigenschaften entspricht. Mit Hilfe der virtuellen Photonen lassen sich diese Eigenschaften kontrollieren, was neue Anwendungen beispielsweise in der Röntgenquantenoptik ermöglicht.

Physical Review Letters 2019; DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.123608

Flüssigkeiten kristallisieren in Nanometerspalten



Im nanometerfeinen Spalt beispielsweise zwischen zwei Diamanten können Flüssigkeiten teilweise kristallisieren.

In sehr schmalen Spalten können Flüssigkeiten teilweise kristallisieren. Röntgenuntersuchungen bei DESY zeigen, dass bei Spaltgrößen von wenigen Moleküldurchmessern Flüssigkeits- und Kristalleigenschaften eines Materials zugleich existieren. Das hat unter anderem Bedeutung für die Lehre von der Reibung (Tribologie). Es war bereits bekannt, dass an einer Grenzfläche, also etwa dem Boden oder der Wand eines Gefäßes, Flüssigkeiten atomar dünne Schichten bilden, sogenannte Layer. Unklar war, was passiert, wenn sich zwei Wände so nahe sind, dass sich ihre Layer überlappen. Das hat ein Team um die DESY-Forscher Milena Lippmann und Oliver Seeck nun untersucht. Die Wissenschaftler füllten einen wenige millionstel Millimeter (Nanometer) schmalen Spalt mit Tetrachlorkohlenstoff als Modellflüssigkeit. Die Röntgenanalyse zeigt eine Koexistenz von Flüssigkeitslayers und Kristallisation.

„Unsere Beobachtung hat direkte Konsequenzen für jegliche Art von Flüssigkeiten in sehr kleinen Hohlräumen“, betont Seeck. „Das kann beispielsweise für Katalyse oder andere chemische Reaktionen in Nanometeröffnungen von Bedeutung sein, aber auch für die Untersuchung von Reibung und das richtige Schmierdagegen.“

The Journal of Physical Chemistry Letters, 2019;
DOI: 10.1021/acs.jpcclett.9b00331

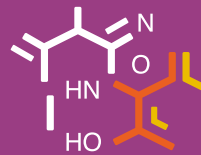
femtomenal

0,000 000 000 000 001 9 Sekunden ...

also 1,9 milliardstel Sekunden (Femtosekunden) – so kurz ist der kürzeste ultraviolette (UV) Laserpuls der Welt. Ein Team um DESY-Forscherin Francesca Calegari hat damit den Rekord von 2,8 Femtosekunden aus dem Jahr 2010 deutlich unterboten. Jeder Blitz ist nur knapp 600 Nanometer lang, also 0,0006 Millimeter, das ist in etwa doppelt so lang wie ein Wellenzug des verwendeten UV-Lichts.

Das ultrakurze Blitzlicht liegt im biologisch sehr relevanten Wellenlängenbereich der UVB- und UVC-Strahlung. Es eröffnet neue Perspektiven für die ultraschnelle Molekülspektroskopie – beispielsweise, um die ersten Momente durch UV-Licht ausgelöster biochemischer Prozesse, wie die Schädigung des Erbgutmoleküls DNA, in Echtzeit zu untersuchen.

Optics Letters, DOI: 10.1364/OL.44.001308



In **Pikosekunden** laufen chemische Reaktionen ab.



PIKOSEKUNDEN



In **Femtosekunden** ändern Biomoleküle während der Photosynthese ihre Form.

FEMTOSEKUNDEN



In rund einer **Attosekunde** legt das Licht eine Strecke zurück, die gerade mal so groß ist wie ein Wasserstoffatom.

ATTOSEKUNDEN

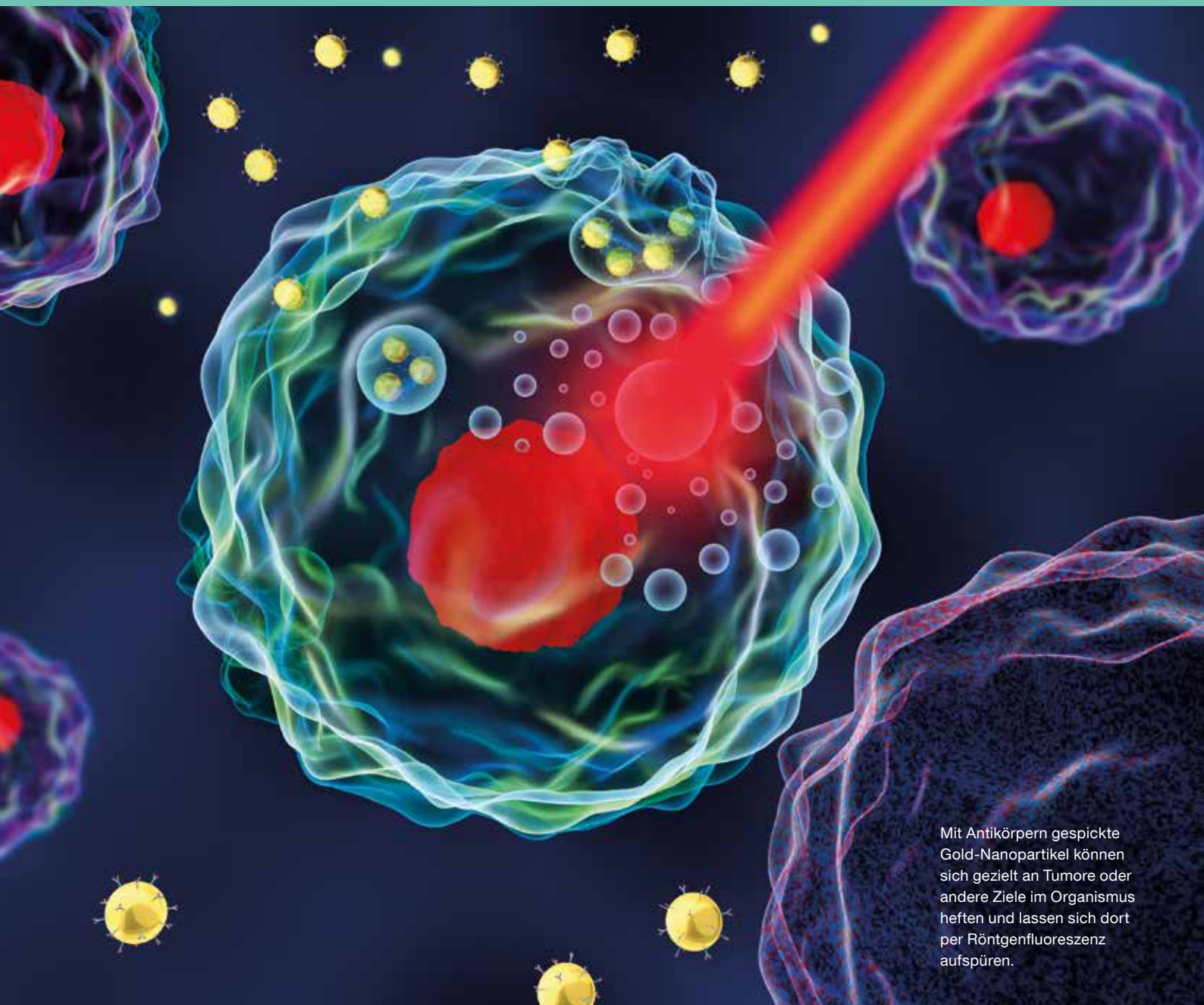
Mit Gold

Krankheiten aufspüren

Röntgenmethode eröffnet neue Diagnosemöglichkeiten in der Medizin

Ein Präzisions-Röntgenverfahren soll Krebs früher erkennen sowie die Entwicklung und Kontrolle von Medikamenten verbessern können. An DESYs Forschungslichtquelle PETRA III hat ein Team unter Leitung von Florian Grüner von der Universität Hamburg die sogenannte Röntgenfluoreszenz-Methode für

diesen Einsatz getestet. Die Technik bietet die Perspektive, derartige Röntgenuntersuchungen nicht nur genauer, sondern auch schonender als mit bisherigen Verfahren durchzuführen. Vor einem Einsatz in der Klinik muss die Methode allerdings noch zahlreiche Entwicklungsschritte durchlaufen.



Mit Antikörpern gespickte Gold-Nanopartikel können sich gezielt an Tumore oder andere Ziele im Organismus heften und lassen sich dort per Röntgenfluoreszenz aufspüren.

Die Idee hinter dem Verfahren ist einfach: Winzige Nanopartikel aus Gold mit einem Durchmesser von zwölf Nanometern (millionstel Millimetern) werden mit Hilfe von biochemischen Methoden mit Antikörpern gespickt. „Eine Lösung mit diesen Nanoteilchen würde man einem Patienten injizieren“, erläutert Grüner, der am Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) arbeitet, einer Kooperation von DESY, der Universität Hamburg und der Max-Planck-Gesellschaft. „Die Partikel wandern durch den Körper, wobei die Antikörper an eventuell vorhandenen Tumoren andocken.“ Scant man die entsprechenden Körperbereiche von Patienten dann mit einem haarfeinen Röntgenstrahl ab, fluoreszieren die Goldteilchen und senden charakteristische Röntgensignale aus, aufgenommen von einem speziellen Detektor. Dadurch könnte man – so die Hoffnung – kleinste Tumore aufspüren, die sich mit heutigen Methoden nicht finden lassen.

„Die Partikel wandern durch den Körper, wobei die Antikörper an eventuell vorhandenen Tumoren andocken“

Florian Grüner, CFEL

„Bei Brustkrebs werden Tumore häufig erst erkannt, wenn sie bereits größer als ein Zentimeter sind“, erläutert Grüner, der für diese Studie unter anderem mit der Gruppe von Christoph Hoeschen an der Universität Magdeburg zusammengearbeitet hat. „Unsere Methode hat das Potenzial, millimetergroße Tumore oder Metastasen zu entdecken, was die Heilungschancen stark erhöhen würde.“ Ein weiteres Anwendungsfeld der Methode könnte in der Medikamentenentwicklung liegen. Hier würde man die Nanoteilchen an neue potenzielle Wirkstoffe anhängen und anschließend per Röntgenfluoreszenz verfolgen, wie sich das Medikament im Körper verteilt und ob es den gewünschten Wirkort überhaupt erreicht. Dadurch ließen sich möglicherweise frühzeitiger als bislang aussichtsreiche von wirkungslosen Wirkstoffkandidaten unterscheiden.

Methodischer Durchbruch

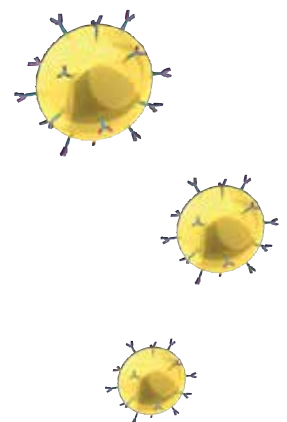
Zwar ist die Idee der Röntgenfluoreszenz bereits mehr als 30 Jahre alt, ließ sich bislang aber beim Menschen nicht umsetzen. Der Grund: Die Röntgenstrahlung wird im Inneren des Körpers vielfach gestreut. Das führt zu einem störenden Untergrund, aus dem sich die eigentlichen Signale nur schwer herauslesen lassen. „In dieses Thema hat sich mein Team eingegraben, und nun haben wir als erste Gruppe auf der Welt experimentell gezeigt, wie man dieses Problem lösen kann“, sagt Grüner. Dabei bestimmt ein Computeralgorithmus aus der räumlichen Verteilung der gemessenen Röntgenspektren genau die Bereiche, deren Signale in der Summe besonders wenig Störuntergrund enthalten.

Für einen ersten experimentellen Test durchleuchteten die Forschenden an PETRA III einen 30 Zentimeter dicken Kunststoffzylinder aus Polymethylmethacrylat (PMMA), mit dem sich die Bedingungen im menschlichen Gewebe simulieren lassen. Diese Messungen des Untergrunds bestätigten die vorangegangenen Simulationsrechnungen sehr gut. Im Vergleich zu einem Computertomogramm (CT) verspricht die Röntgenfluoreszenz demnach sogar eine deutlich geringere Strahlenbelastung: Während diese beim CT vier bis sieben Millisievert beträgt, würde die Röntgenfluoreszenz mit etwa einem Millisievert auskommen, wie Grüner vorrechnet. Wollte man mit einem normalen CT dieselbe Menge an Gold-Nanopartikeln lokalisieren, müsste zudem die Dosis auf nicht mehr tolerierbare Werte erhöht werden.

Für einen Einsatz in der medizinischen Diagnostik muss die Methode allerdings noch deutlich weiterentwickelt werden. So ist unter anderem die Wirkung von Gold-Nanopartikeln im menschlichen Körper noch Gegenstand von Untersuchungen. Eine weitere Hürde ist zudem die Verfügbarkeit entsprechender Röntgenlichtquellen. Große Teilchenbeschleuniger wie DESYs PETRA III mit einem Umfang von mehr als zwei Kilometern sind nicht für eine Klinik oder gar Arztpraxis geeignet. Innovative Beschleunigertechniken, die sich gerade in der Entwicklung befinden, könnten jedoch in Zukunft Röntgenlichtquellen möglich machen, die eine für diese Untersuchungen nötige Qualität liefern und noch in ein Labor passen.



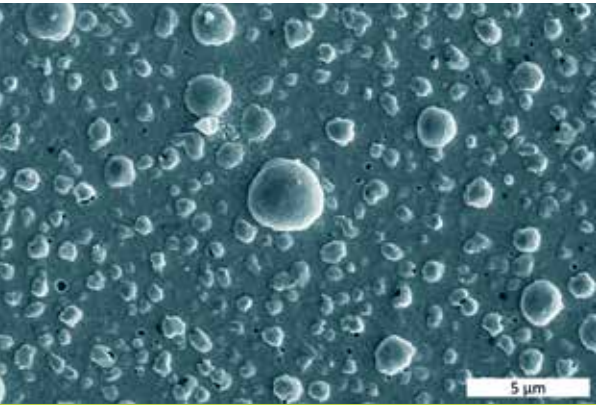
Florian Grüner leitet die Beschleunigerphysik an der Universität Hamburg.



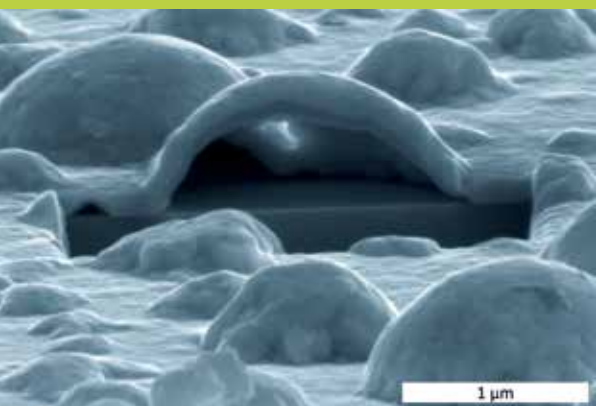
Scientific Reports, 2018; DOI: 10.1038/s41598-018-34925-3

Platin schlägt Nanoblasen

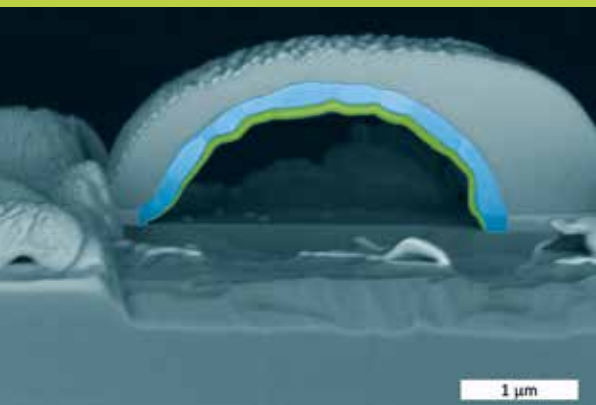
Technisch wichtiges Edelmetall oxidiert schneller als erwartet



Im Rasterelektronenmikroskop zeigt der Platinfilm nach dem elektrochemischen Experiment viele Blasen.



Elektronenmikroskopischer Blick in das Innere einer Platinblase. Der Querschnitt wurde mit einem fokussierten Ionenstrahl freigelegt. Unter der hohlen Platinblase ist der kantige YSZ-Kristall zu erkennen.



Die chemische Elementanalyse der mit einer schützenden Schicht versehenen Platinblase zeigt eine äußere metallische Schale aus Platin (blau eingefärbt) und eine innere Schale aus Platinoxid (grün eingefärbt).

Das Edelmetall Platin kann unter technisch relevanten Bedingungen schneller oxidieren als erwartet.

Platinhaltige Geräte wie beispielsweise Abgaskatalysatoren im Auto können durch diese Reaktion an Wirksamkeit einbüßen. „Platin ist ein technisch sehr wichtiges Material“, sagt der Hauptautor der Studie, Thomas Keller von DESY und der Universität Hamburg. „Es ist nicht umfassend geklärt, unter welchen Bedingungen Platin oxidieren kann. Diese Bedingungen genauer zu erkunden, ist für zahlreiche Anwendungen von Bedeutung.“

Die Forscherinnen und Forscher hatten eine dünne Platinschicht auf einem Yttrium-stabilisierten Zirkonkristall (YSZ-Kristall) untersucht, eine Kombination, die beispielsweise in der Lambda-Sonde zur Abgaskontrolle im Auto zum Einsatz kommt. Der YSZ-Kristall ist ein sogenannter Ionenleiter, das heißt, er leitet elektrisch geladene Atome (Ionen), in diesem Fall Sauerstoffionen. Die aufgedampfte Platinschicht dient als Elektrode. Mit der Lambda-Sonde wird der Sauerstoffgehalt des Abgases gemessen und in ein elektrisches Signal verwandelt, mit dem die Verbrennung im Motor elektronisch so gesteuert wird, dass die Schadstoffe in den Abgasen minimiert werden.

Im DESY-NanoLab legten die Forschenden eine elektrische Spannung von ungefähr 0,1 Volt an den platinbedampften YSZ-Kristall und erhitzen ihn auf rund 450 Grad Celsius – Bedingungen, wie sie im Betrieb vieler technischer Geräte herrschen. In der Folge sammelte sich der Sauerstoff unter der undurchlässigen Platinschicht bis zu einem Druck von maximal 10 bar, wie er beispielsweise in LKW-Reifen

herrscht. Unter Einfluss dieses Sauerstoffdrucks und der erhöhten Temperatur schlug die Platinschicht kleine Blasen, die typischerweise einen Durchmesser von 1000 Nanometern (1 Mikrometer bzw. 0,001 Millimeter) hatten. „Platinblasen sind ein weit verbreitetes Phänomen, das man gerne besser verstehen möchte“, erläutert Keller. „Unsere Untersuchung kann dabei auch stellvertretend für derartige elektrochemische Phänomene an verschiedenen Grenzflächen dienen.“

Mit einem fokussierten Ionenstrahl (Focused Ion Beam, FIB) schnitt das Team die Platinblasen wie mit einem ultrascharfen Skalpell der Länge nach auf, um das Innere genauer zu untersuchen. Dabei zeigte sich, dass die Bläschen auf der Innenseite von einer bis zu 85 Nanometer dicken Platinoxidschicht gesäumt waren, die damit viel dicker ausfiel als erwartet.

„Diese massive Oxidierung hat bereits unter Bedingungen stattgefunden, unter denen dies normalerweise nicht beobachtet wird“, berichtet Sergey Volkov, der dieses Thema im Rahmen seiner Doktorarbeit an der Universität Hamburg untersuchte. „Platin ist in der Regel ein hochstabiles Material und wird gerade deshalb für viele Anwendungen wie beispielsweise den Autokatalysator gewählt, weil es sich eben nicht so schnell verändert. Unsere Beobachtung ist daher wichtig für solche Anwendungen.“ Das Forschungsteam vermutet, dass der hohe Sauerstoffdruck innerhalb der Bläschen die Oxidation des Metalls beschleunigt. Dies müsse für die Funktion elektrochemischer Sensoren beachtet werden.

Solid State Ionics, 2019;
DOI: 10.1016/j.ssi.2018.11.009



Warum Gewitterwolken mehrfach blitzen

Blitze über LOFAR
(Montage)

Gewitter werden nicht nur von Hagel, Sturm, Blitz und Donner begleitet, sondern auch von allerlei Mythen, die einer wissenschaftlichen Prüfung zumeist nicht standhalten.

Warum auch sollte man, wenn sich ein Unwetter zusammenbraut, „vor Eichen weichen und Buchen suchen“? Weil es sich reimt? Ein Blitz sucht sich gern hohe, einzeln stehende Objekte und pfeift auf botanische Feinheiten. Auch dass Blitze nie zweimal an derselben Stelle einschlagen, gehört in das Reich der Mythen. Den besten Schutz gibt es nicht dort, wo der Blitz schon war, sondern im Auto (Faraday'scher Käfig) oder im Haus.

Warum Gewitterwolken mehrfach blitzen können, hat ein internationales Forschungsteam auf ungewöhnliche Weise entdeckt: mit dem Radioteleskop LOFAR, das aus tausenden einfachen Antennen besteht, die dezentral in verschiedenen europäischen Ländern aufgebaut, über Glasfasernetze miteinander verbunden und an Hochleistungsrechner angeschlossen sind. Diese Verbindung erlaubt es, die Antennen zusammenschalten und als ein riesiges, virtuelles Teleskop zu nutzen. LOFAR dient in erster Linie astronomischen Beobachtungen. Allerdings ist die Anlage sehr flexibel und eignet sich überraschenderweise auch dazu, ins Innere von Gewitterwolken zu schauen. Mit Hilfe der Radiowellen konnten die Forschenden Blitze so genau beobachten, dass einzelne physikalische Prozesse sichtbar wurden.

Die Beobachtungen enthüllen bisher unbekannte, nadelförmige Strukturen. Wenn Blitze sich

ausbreiten, entladen sie die Gewitterwolken nur an einigen Stellen. Die nun entdeckten Nadeln erlauben, dass elektrische Ladungen gespeichert werden, und ermöglichen damit, dass eine Gewitterwolke an der gleichen Stelle mehrfach entladen werden kann. Daher kommt es aus einer Wolke zu wiederholten Blitzeinschlägen auf dem Boden, und Gewitter liefern nicht nur einen Blitz, sondern viele spektakuläre, aber auch gefährliche Entladungen.

LOFAR erlaubt es, die Radiowellen, die ein Blitz aussendet, in ihrer ursprünglichen Form unverarbeitet zu speichern. Dies wiederum ermöglicht es, neue bildgebende Verfahren zu entwickeln, die aus den Rohdaten ein dreidimensionales Bild eines Blitzes zeichnen können – zehnmals besser als bisherige Messungen, bis zu einem Meter genau und dank Radiowellen innerhalb einer Wolke, die vom Teleskop bis zu 20 Kilometer entfernt sein kann.

„Die Messungen stammen ursprünglich aus unserer Forschungsgruppe, die sich mit kosmischer Strahlung beschäftigt“, berichtet DESY-Wissenschaftlerin Anna Nelles. „An der Schnittstelle zwischen Teilchenphysik und Astronomie war dieses Gebiet bereits recht exotisch für ein Radioteleskop. LOFAR wurde ja vor allem für die Astronomie gebaut. Dass wir nun das beste Blitz-Interferometer der Welt sind, kam für alle überraschend und zeigt, welche spannenden Möglichkeiten sich durch Grundlagenforschung mit herausragender Infrastruktur ergeben können.“

Nature, 2019; DOI: 10.1038/s41586-019-1086-6

Biegsame Schaltkreise für den 3D-Druck

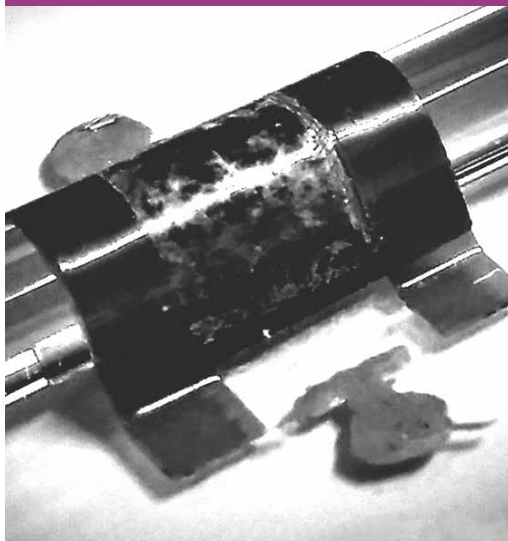
Neues Verfahren für flexible und transparente Elektronik

Eine Forschungsk Kooperation von DESY und der Universität Hamburg hat ein 3D-Druck-taugliches Verfahren entwickelt, mit dem sich transparente und mechanisch flexible elektronische Schaltkreise produzieren lassen. Die Elektronik besteht aus einem Geflecht von Silber-Nanodrähten, die sich in einer

„Mit unserem neuartigen Ansatz wollen wir Elektronik in vorhandene strukturelle Einheiten integrieren und platz- und gewichtsparend Komponenten intelligenter machen“

Michael Rübhausen, CFEL

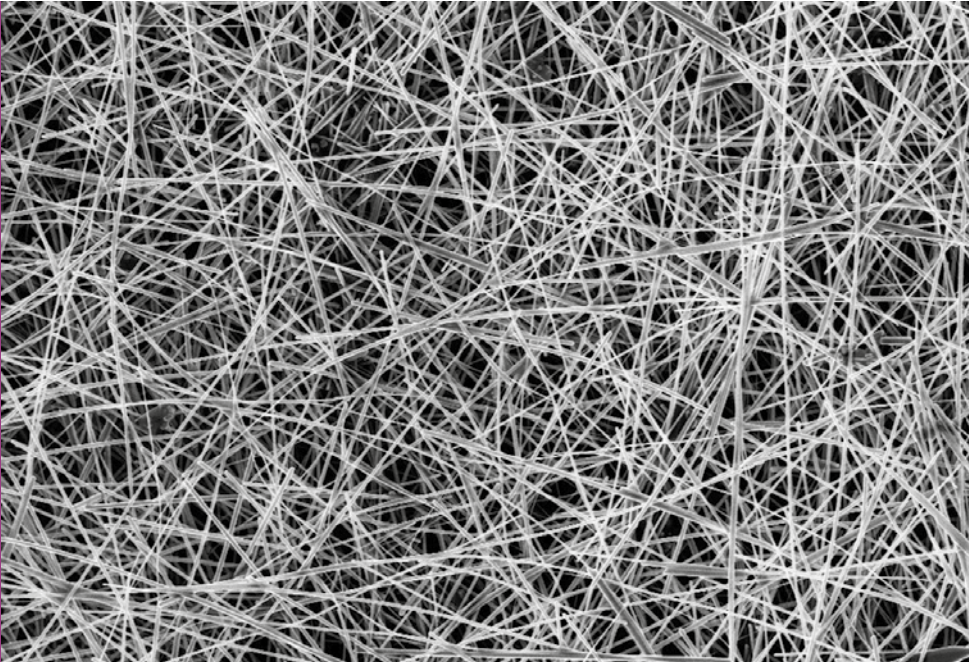
Beispiel für einen flexiblen und transparenten Elektronikbaustein: ein biegsamer Kondensator



Suspension drucken und in verschiedene flexible und durchsichtige Kunststoffe (Polymere) einbetten lassen. Diese Technik kann zahlreiche neue Anwendungen wie etwa druckbare Leuchtdioden, Solarzellen oder Werkzeuge mit integrierten Schaltkreisen ermöglichen. Das Forschungsteam um Tomke Glier von der Universität Hamburg demonstrierte das Potenzial des Verfahrens unter anderem mit einem biegsamen Kondensator.

„3D-druckbare Polymere für unterschiedliche Anwendungen zu funktionalisieren, war Ziel dieser Studie“, berichtet Michael Rübhausen vom Center for Free-Electron Laser Science (CFEL), einer Kooperation von DESY, der Universität Hamburg und der Max-Planck-Gesellschaft. „Mit unserem neuartigen Ansatz wollen wir Elektronik in vorhandene strukturelle Einheiten integrieren und platz- und gewichtsparend Komponenten intelligenter machen.“ Rübhausen hat das Projekt gemeinsam mit DESY-Forscher Stephan Roth geleitet. Mit dem hellen Röntgenlicht von DESYs Forschungslichtquelle PETRA III und anderen Messmethoden hat das Team die Eigenschaften der Nanodrähte im Polymer genau analysiert.

„Herzstück der Technik sind Silber-Nanodrähte, die ein leitendes Geflecht bilden“, erläutert Glier. Die Silberdrähte sind typischerweise einige zehn Nanometer (millionstel Millimeter) dick und 10 bis 20 Mikrometer (tausendstel Millimeter) lang. Die detaillierte Röntgenanalyse zeigt dabei, dass die Struktur der Nanodrähte im Polymer nicht verändert wird, sondern dass sich die Leitfähigkeit des Geflechts dank der Kompression durch das Polymer sogar verbessert, da sich das Polymer im Laufe des Aushärtungsprozesses zusammenzieht.



Ein Geflecht aus Silber-Nanodrähten bildet flexible Elektronik. Die Drähte sind typischerweise 0,01 bis 0,02 Millimeter lang und wenige Dutzend Nanometer (millionstel Millimeter) dick.

Nanodrähte aus Silber

Die Silber-Nanodrähte werden in einer Suspension auf ein Substrat aufgebracht und getrocknet. „Aus Kostengründen will man mit möglichst wenig Nanodrähten eine möglichst hohe Leitfähigkeit erreichen. Außerdem erhöht man dadurch die Transparenz des Materials“, erläutert Roth. „So lässt sich Schicht für Schicht eine Leiterbahn oder eine leitende Fläche herstellen.“ Auf die Leiterbahnen wird ein flexibles Polymer aufgetragen, auf das wiederum Leiterbahnen und Kontakte gebracht werden können. Je nach Geometrie und verwendetem Material lassen sich so verschiedene elektronische Bauteile drucken.

In der vorliegenden Arbeit produzierten die Forschenden einen biegsamen Kondensator. „Wir haben im Labor die einzelnen Arbeitsschritte noch in einem Schichtverfahren gemacht, in der Praxis können sie später jedoch komplett von einem 3D-Drucker übernommen werden“, erläutert Glier. „Wesentlich hierfür ist aber auch noch die Weiterentwicklung der konventionellen 3D-Drucktechnik, die in der Regel für einzelne Drucktinten optimiert ist. Bei inkjetbasierten Verfahren könnten die Druckdüsen durch die Nanostrukturen verstopfen“, merkt Rübhausen an.

In einem nächsten Schritt wollen die Forscherinnen und Forscher nun überprüfen, wie sich die Struktur der Leiterbahnen aus Nanodrähten unter mechanischer Belastung ändert. „Wie gut hält das Drahtgeflecht beim Biegen zusammen? Wie stabil bleibt das Polymer?“, nennt Roth typische Fragestellungen. „Dafür ist die Untersuchung mit Röntgenstrahlung sehr gut geeignet, weil wir nur damit in das Material hineinschauen und so die Leiterbahnen und -flächen der Nanodrähte analysieren können.“

Scientific Reports, 2019; DOI: 10.1038/s41598-019-42841-3

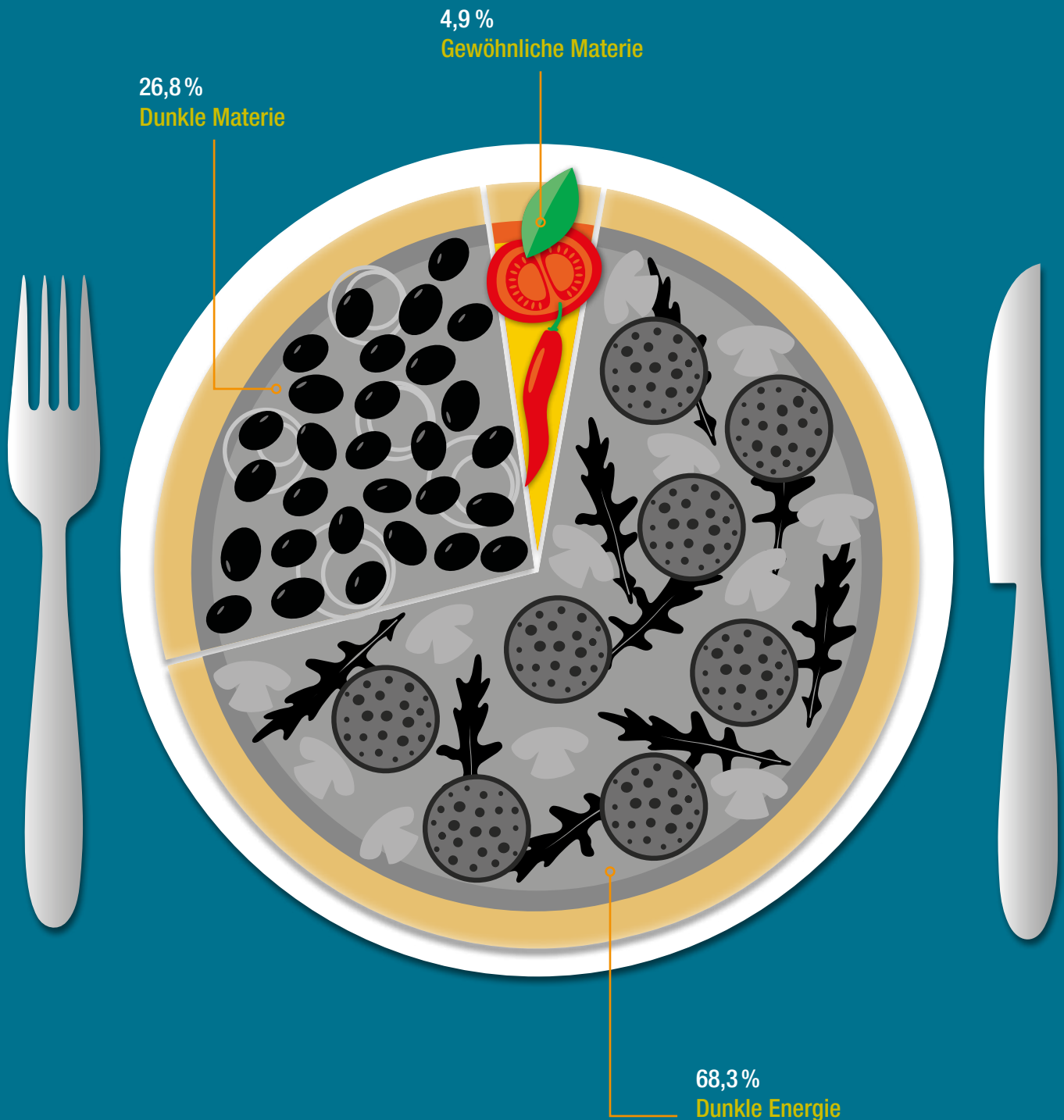
„Nur mit Röntgenstrahlung können wir in das Material hineinschauen und so die Leiterbahnen und -flächen der Nanodrähte analysieren“

Stephan Roth, DESY



Rezept für ein Universum

Das Universum rasch und beherzt circa 0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 01 Sekunden nach dem Urknall um mindestens das 100 000 000 000 000 000 000 000-Fache aufblasen. Achtung heiß! Anschließend 13 800 000 000 Jahre in Ruhe gehen lassen. Nach 300 000 000 bis 500 000 000 Jahren sollten sich die ersten Sterne bilden. Wichtig: Nicht stören, sonst verteilt sich die Materie nicht richtig. Klumpenbildung ist normal und erwünscht. Das Rezept reicht für mindestens 100 000 000 000 Galaxien mit je rund 100 000 000 000 Sternen.



Impressum

femto wird herausgegeben vom
Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY,
einem Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft

Redaktionsanschrift

Notkestraße 85, D-22607 Hamburg
Tel. +49 40 8998-3613, Fax +49 40 8998-4307
E-Mail: femto@desy.de
Internet: www.desy.de/femto
ISSN 2199-5184

Redaktion

Ute Wilhelmsen, Till Mundzeck (v.i.S.d.P.)

An dieser Ausgabe haben mitgewirkt

Frank Grotelüschen, Barbara Warmbein,
Britta Liebaug, Kristin Hüttmann

Schlussredaktion

Ilka Flegel

Gestaltung und Produktion

Ulrike Darwisch, Diana von Ilsemann

Bildbearbeitung und Herstellung

EHS, Hamburg

Redaktionsschluss

Mai 2019

femto

Das DESY-Forschungsmagazin

Abonnieren Sie
femto kostenlos!

www.desy.de/femto



