

# femto

Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 03/16

ZOOM

## Kosmische Teilchenbeschleuniger

Astrophysiker erkunden das Hochenergie-Universum

### Kunstkrimi

„Der Schrei“ und das Geheimnis  
der weißen Flecken

### Zikavirus

Biochemiker schaffen Grundlage  
für antivirale Medikamente

### Maßgeschneidert

Raffinierte Beschichtungstechnik  
für neue Magnetsensoren





fentoskop



# Inhalt



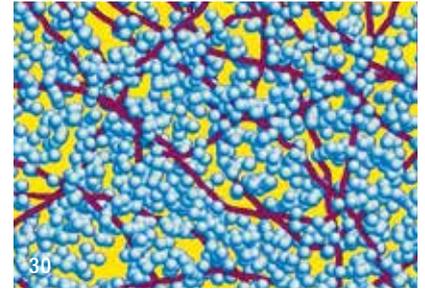
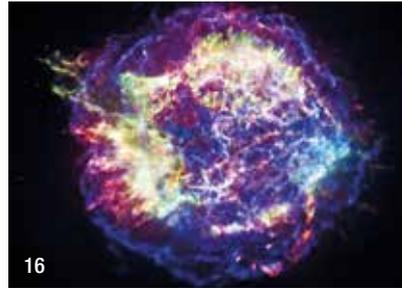
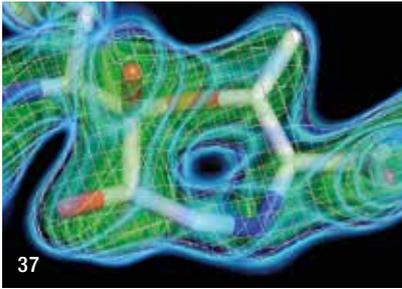
## ZOOM

# Die Entdeckung der kosmischen Teilchenbeschleuniger

**Astrophysiker erkunden  
das Hochenergie-Universum**

Aus dem Weltall prasselt ständig ein energiereicher Hagel subatomarer Teilchen auf die Erde. Jede Sekunde treffen rund 500 Billionen schnelle Atomkerne die Lufthülle unseres Planeten. Manche der kosmischen Teilchen haben dabei so viel Energie wie ein hart geschlagener Tennisball. Seit der Entdeckung dieser sogenannten Kosmischen Strahlung vor rund einem Jahrhundert rätseln Forscher, welche Prozesse die Teilchen derart beschleunigen – millionenfach stärker als die größten Teilchenbeschleuniger, die Menschen je gebaut haben. Nach und nach gelingt es Astrophysikern, die natürlichen Teilchenbeschleuniger im Weltall zu entsleiern.

Seite 14–29



## CAMPUS

- 06 Kunstkrimi**  
„Der Schrei“ und das Geheimnis der weißen Flecken
- 09 Kampf gegen das Zikavirus**  
Biochemiker schaffen Grundlage für antivirale Medikamente
- 12 Elektronenquelle im Streichholzschachtelformat**  
Neuentwicklung nutzt Terahertz-Strahlung
- 34 Magnetsensoren nach Maß**  
Raffinierte Beschichtungstechnik ermöglicht neue Anwendungen
- 37 Jedes Atom zählt**  
Wie Krebsmedikamente den zellulären „Abfalleimer“ blockieren
- 39 Arsen in Pflanzen**  
Röntgenuntersuchung zeigt Verteilung des giftigen Halbmetalls in Blättern

## ZOOM

- 14 Die Entdeckung der kosmischen Teilchenbeschleuniger**  
Astrophysiker erkunden das Hochenergie-Universum
- 17 Im Wasserstoffballon zum Nobelpreis**  
Der Kosmischen Strahlung auf der Spur
- 28 „Völlig neue Einblicke in unser Universum“**  
Christian Stegmann über das CTA-Observatorium

## SPEKTRUM

- 30 Forschung kurzgefasst**
- Verschleiß von Plastiksolarzellen
  - Pendelverkehr in der Zelle
  - Röntgenblick in den unteren Erdmantel
  - Neue Forschungshallen an Röntgenlichtquelle PETRA III
  - Explodierende Xenon-Nanopartikel
  - Flexible Geruchsstoffe
  - Photonische Kristalle in 3D

## RUBRIKEN

**02 femtoskop**  
So lockte die Bernstein-Gnitze

**33 femtomenal**  
2000 Kilometer Kabel und 20 Tonnen Niob

**36 femtopolis**  
Institut X

**40 femtofinale**  
Auf ein Bier mit Hamburgs Forscherinnen und Forschern

# „Der Schrei“ und das Geheimnis der weißen Flecken

Ein Kunstkrimi

**A**lles begann mit ein paar mysteriösen Spuren auf einem weltberühmten Gemälde: „Der Schrei“ von Edvard Munch. Die expressiven Pinselstriche des norwegischen Malers werden überlagert von Klecksen einer unbekanntesten weißen Substanz, um die sich verschiedene Spekulationen ranken. Populär bei den naturverbundenen Norwegern war die folgende Erklärung: Munch war dafür bekannt, dass er viel im Freien gearbeitet und sogar seine Bilder dort aufbewahrt hat, oft nur notdürftig vor der Witterung geschützt. „Der Schrei“ kam direkt aus dem Atelier des Malers in die Sammlung des Norwegischen Nationalmuseums und trug bereits damals die weißen Flecken. Diese Tatsachen führten zu der Vermutung, dass Munch auch den „Schrei“ im Freien aufbewahrt hatte, wo vorbeifliegende Vögel eine weitere Schicht auf das Meisterwerk aufgetragen haben könnten.

„Vogelkot kann eine nennenswerte Gefährdung für Denkmäler, Freiluftstatuen und neue Autos darstellen“, sagt Kunsthistoriker Geert Van der Snickt von der Universität Antwerpen, der den „Schrei“ umfassend untersucht hat. „Ich habe ihn aber bislang nicht mit Staffelei- gemälden in Zusammenhang gebracht und ganz bestimmt nicht mit bedeutenden Meisterwerken mit einem Wert von mehr als 100 Millionen Dollar.“ Auch Tine Frøysaker von

der Universität Oslo, die bei ihrer Arbeit als Konservatorin wiederholt mit Vogelekrementen an den berühmten norwegischen Stabkirchen zu tun hatte, war von der Vogelkot-Theorie wenig überzeugt – nicht zuletzt, weil die weißen Flecken unter dem Mikroskop keineswegs nach Ausscheidungen aussahen. Gemäldekonservator Thierry Ford aus dem Nationalmuseum hat ebenfalls seine Zweifel: „Vogelkot ist für seine zersetzende oder aufweichende Wirkung auf viele Materialien bekannt, was die meisten Autobesitzer sicherlich bestätigen können.“ Im Fall des Munch-Gemäldes scheint die weiße Substanz jedoch auf der Farboberfläche zu liegen. Darüber hinaus scheint sie an manchen Stellen im Laufe der Jahre abgeblättert zu sein, ohne hier Schäden zu hinterlassen.

## Vogelkot oder Farbspritzer?

Gegen die Vogelkot-Theorie spricht außerdem, dass Munch diese Version auf Pappe gemalt hat, die bei einer Lagerung im Freien vermutlich Schaden genommen hätte. „Es schien plausibel, dass die weißen Spritzer eher von weißer Farbe oder Kreide stammten, die versehentlich auf den ‚Schrei‘ getropft waren, während Munch in seinem Atelier an anderen Gemälden arbeitete“, sagt Frøysaker. Trotz dieser logischen Argumente hielt sich die Vogelkot-Theorie jedoch hartnäckig, möglicherweise auch deshalb, weil

sie einen Teil des norwegischen Nationalerbes auf charmante Weise mit der nationalen Liebe zur Natur verbindet.

*„Es schien plausibel, dass die weißen Spritzer von weißer Farbe stammten, die versehentlich auf den ‚Schrei‘ getropft war“*

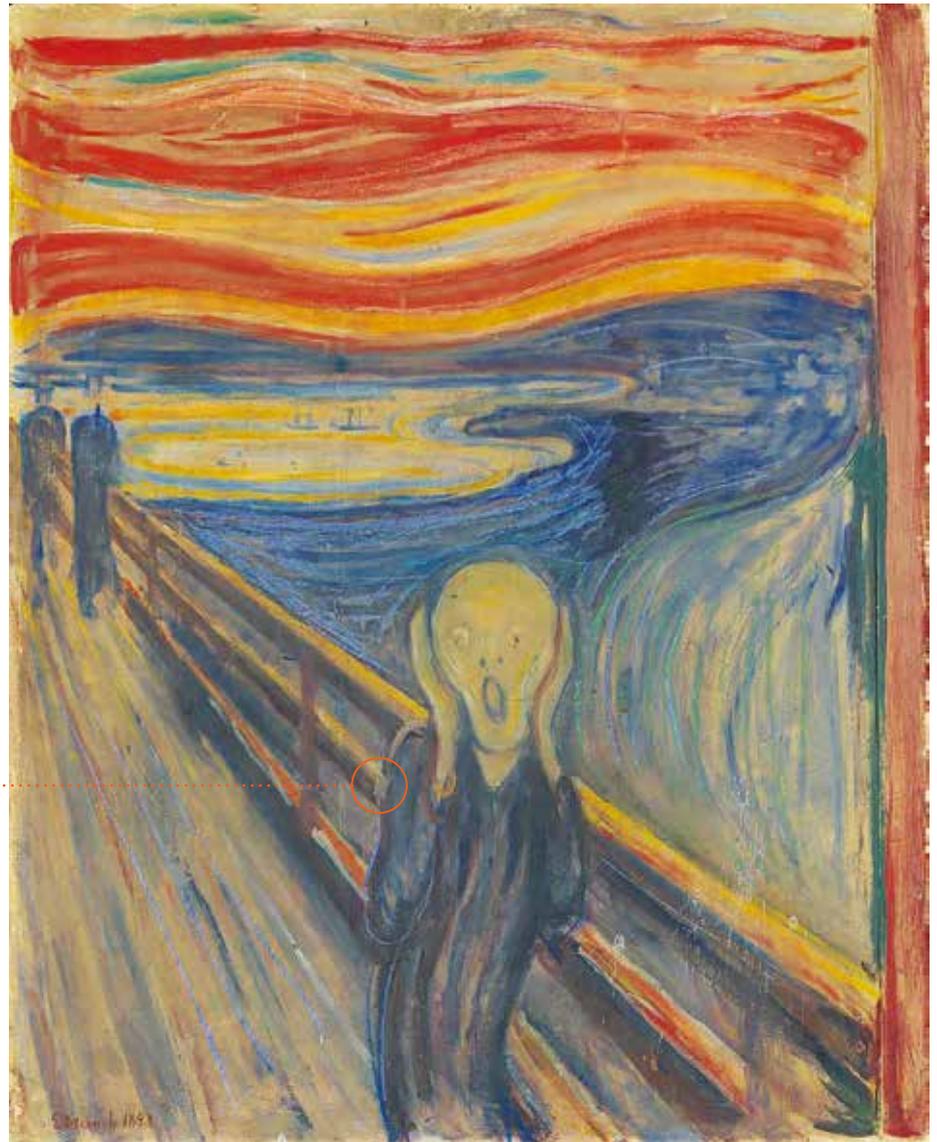
*Tine Frøysaker, Universität Oslo*

Im Mai 2016 lud Frøysaker die Antwerpener Kunsthistoriker nach Oslo ein, um die von Munch verwendeten Materialien und Techniken genauer zu charakterisieren. Der vermeintliche Vogelkot stand dabei zwar nicht im Zentrum des Interesses, wie Van der Snickt betont. „Es wäre jedoch ein Fehler gewesen, das moderne Antwerpener Equipment nicht zu nutzen, um den alten Konflikt um den Vogelkot zu lösen.“ Das Gemälde wurde mit einem mobilen, in Antwerpen entwickelten Röntgenscanner untersucht. Überraschenderweise schloss diese Untersuchung jedoch die Farbspritzertheorie aus, da sich in den

„Der Schrei“ von Edvard Munch (1863–1944) ist zu einem Symbol des europäischen Kunstkanons geworden. „In den letzten Jahren des 19. Jahrhunderts malte Edvard Munch vier Versionen des ‚Schreis‘, eines Gemäldes, das heute als entscheidend für die spätere Entwicklung des Expressionismus gilt“, erläutert der Direktor für Alte Meister und Moderne Kunst am Nationalmuseum in Oslo, Nils Ohlsen. Obwohl eines der vier Gemälde im Jahr 2012 für atemberaubende 119 Millionen US-Dollar (damals knapp 100 Millionen Euro) verkauft wurde, ist die berühmteste Version sicherlich das untersuchte Gemälde aus der Sammlung des Norwegischen Nationalmuseums. Dieses Werk unterscheidet sich von den anderen nicht nur dadurch, dass es als das älteste gilt, sondern auch durch eine Reihe rätselhafter weißer Spritzer auf der Oberfläche (Lupe).



Vogelkot oder Farbe?  
Ein Klecks in Großaufnahme.



rätselhaften Flecken keinerlei weiße Pigmente oder Kalzium entdecken ließen.

Die Forscher beschlossen daraufhin, dem Rätsel weiter auf den Grund zu gehen: Sie nahmen winzige Proben der weißen Flecken, um sie mit der brillanten Röntgenstrahlung von DESYs Forschungslichtquelle PETRA III zu analysieren. „Über das Streumuster, das bei der Durchleuchtung einer Probe entsteht, lässt sich unter anderem die innere Struktur der untersuchten Materialien auf atomarer Skala be-

„Die Einführung von Teilchenbeschleunigern hat unser Verständnis davon revolutioniert, wie sich historische Farbsysteme verhalten“

Koen Janssens, Universität Antwerpen

stimmen“, erläutert DESY-Forscher Gerald Falkenberg, Leiter der Messstation, an der die Untersuchungen stattfanden. An Teilchenbeschleunigern wie PETRA lässt sich besonders intensives Röntgenlicht mit speziellen Eigenschaften erzeugen.

„Die Einführung von Teilchenbeschleunigern für die Untersuchung von Farbmaterien hat unser Verständnis davon revolutioniert, wie sich historische Farbsysteme verhalten“, betont der Antwerpener Chemieprofessor Koen Janssens. „In den vergangenen Jahren konnten >>



Bild: Lutz &amp; Co., Berlin

Edvard Munch mit seinen Gemälden im Schnee (Ekely bei Oslo)

oder eine neue Leinwand auf die Rückseite einer verschlissenen aufzutragen. Im Fall des „Schreis“ ist die wahrscheinlichste Erklärung, dass es sich bei den weißen Flecken um Wachsspritzer handelt, die aus Versehen von einer Kerze in Munchs Atelier auf das Bild getropft sind.

## „Die Messdaten des Vogelkots passen nicht zu dem Material aus den weißen Flecken, dessen Messdaten sich jedoch mit Bienenwachs decken“

Gerald Falkenberg, DESY

Wir verschiedene chemische Abbauprozesse enträtseln, die Gemälde verfärben können oder abblättern lassen – Wissen, das letztlich zu einer besseren Konservierung führen wird.“

### Der Fall ist gelöst

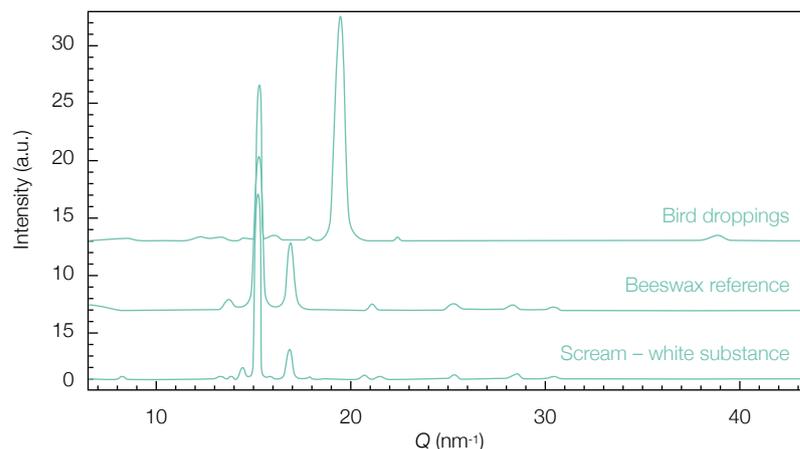
Bei der Analyse der DESY-Messdaten von Munchs „Schrei“ erlebte der Antwerpener Doktorand Frederik Vanmeert eine Überraschung: „Ich habe sofort das Streumuster von Wachskristallen erkannt, weil ich diesem Material bereits mehrere Male bei der Untersuchung von Gemälden begegnet bin.“ Instabile Gemälde wurden in der Vergangenheit oft mit Bienenwachs oder ähnlichen Materialien imprägniert, um abblätternde Farbe zu sichern

Und die Legende vom Vogelkot? „Ursprünglich wollte ich an meinem letzten Tag in Oslo etwas Sightseeing machen“, berichtet Van der Snickt. „Es kam jedoch so, dass ich die meiste Zeit damit verbracht habe, nach unten zu schauen auf der Suche nach Vogeldreck, der als Vergleichsmaterial dienen konnte. Nach einer Weile habe ich eine perfekte Probe direkt vor dem Opernhaus entdeckt. Ich muss zugeben, es war

etwas peinlich, das Material vor den Augen der ganzen Touristengruppen einzusammeln. Eine zweite Probe habe ich dann lieber an einem etwas ruhigeren Ort gesucht.“

Um sicherzugehen, wurden die Vogelkotproben ebenfalls bei PETRA III untersucht. „Dabei ist auf den ersten Blick zu erkennen, dass die Messdaten des Vogelkots nicht zu dem Material aus den weißen Flecken passen, dessen Messdaten sich jedoch mit Bienenwachs decken“, sagt Falkenberg. „Zwar hängt die Zusammensetzung von Vogelkot auch stark von den Ernährungsgewohnheiten des jeweiligen Vogels ab“, ergänzt Van der Snickt. „Ich bezweifle jedoch stark, dass Munchs Gemälde von Vögeln bekleckert wurde, die zufällig eine Vorliebe für Wachs hatten. Daher glaube ich, wir können den Fall des vermeintlichen Vogelkots jetzt schließen.“

Messdaten von Vogelkot, den untersuchten weißen Flecken und Bienenwachs, analysiert an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III



# Kampf gegen das Zikavirus

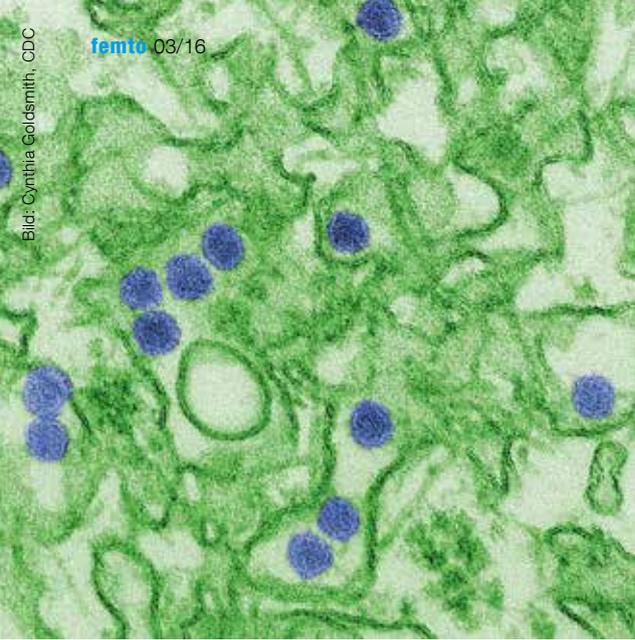
Biochemiker schaffen mit Röntgenstrukturanalyse eine entscheidende Grundlage für die Entwicklung eines antiviralen Medikaments



Die Ägyptische Tigermücke (*Aedes aegypti*) ist eine Stechmückenart der Tropen und Subtropen. Sie ist der hauptsächliche Überträger von Zika, Gelbfieber, Dengue-Fieber und einigen anderen Viruserkrankungen.

**V**iren sind unberechenbar – manche sind mehr, manche weniger gefährlich. Einige können ihre Struktur ändern, ihren Übertragungsweg oder ihre Verbreitungstaktik. Ein tückisches Verhaltensrepertoire, das sich auch beim Zikavirus zeigt. Das Virus selbst ist schon lange bekannt. Forscher isolierten es erstmals 1947 bei einem Affen im Zikawald Ugandas in Afrika. Seit über 60 Jahren beobachten Wissenschaftler das Virus, einige größere Ausbrüche beim Menschen gab es in Mikronesien und in an-

deren Inselstaaten im pazifischen Raum. Derzeit grassiert das Virus vor allem in Mittel- und Südamerika, hat sich inzwischen aber auch in den südlichen Bundesstaaten der USA ausgebreitet, vor allem in Florida. Und auch im zehntausende Kilometer entfernten Singapur bestätigten Experten eine lokale Übertragung und Ausbreitung des Zikavirus. Warum sich das Virus seit 2015 so stark ausbreitet, ist für Experten ein Rätsel. Umso dringlicher wird es, einen Impfstoff oder ein Medikament gegen das Virus zu entwickeln. >>



Elektronenmikroskopische Aufnahme (TEM) des Zikavirus. Die Viruspartikel, hier blau gefärbt, haben einen Durchmesser von 40 Nanometern (millionstel Millimetern).

- Während sich die ersten Impfstoffkandidaten bereits in klinischen Tests befinden, hat eine Arbeitsgruppe um Rolf Hilgenfeld von der Universität Lübeck nun eine entscheidende Grundlage für die Entwicklung eines antiviralen Medikaments geschaffen. Die Biochemiker konnten mit dem brillanten Röntgenlicht aus der Forschungslichtquelle PETRA III bei DESY die dreidimensionale Struktur eines Schlüsselenzyms des Zikavirus atomgenau aufklären. Dieses Enzym mit dem Namen NS2B-NS3-Protease benötigt das Zikavirus, um die für seine Vermehrung notwendigen Proteine und die Hüllbestandteile neuer Viruspartikel herzustellen.

#### Immer mehr Krankheitsfälle

Die Hauptüberträger des Zikavirus sind Stechmücken der *Aedes*-Familie. Eine Infektion verläuft häufig ohne oder nur mit milden grippeähnlichen Symptomen. Das ist auch der Grund, warum das Zikavirus bis 2015 kein Kandidat für Impfstoff- oder Medikamentenentwicklung war. Inzwischen häufen sich jedoch die Infektionen – mehr als eine Millionen Patienten mit einer Zikavirus-Infektion in 60 Ländern sind bereits registriert worden. Außerdem ist das Virus für Schwangere und ihre ungeborenen Babys gefährlich: Es kann bei den Ungeborenen Mikrozephalie auslösen, bisher kamen bereits Tausende Babys mit dieser Schädeldefektbildung zur Welt, durch die der Kopf deutlich zu klein bleibt.

Als Angriffsorte für Medikamente eignen sich laut Hilgenfeld vier Enzyme des Virus. Doch nur von der NS2B-NS3-Protease ist dank der Röntgenanalyse an PETRA III nun die dreidimensionale Struktur atomgenau aufgeklärt. „Bei den anderen möglichen Kandidaten ist man längst nicht so weit“, sagt der Virusforscher. Und die Protease ist ideal – sie ist so etwas wie der Motor für die Vermehrung des Zikavirus. Ist sie blockiert, hat der Erreger verloren. „Viren haben eine begrenzte Lebensdauer, daher müssen sie sich immer weiter vermehren“, sagt Hilgenfeld. „Wenn sie das nicht können, hat sich die Infektion erledigt.“

#### Strukturanalyse über Umwege

Um die molekulare Struktur des Zika-Schlüsselenzyms mit Hilfe der kurzweiligen Röntgenstrahlung aufzuklären, mussten Hilgenfeld und sein Team die NS2B-NS3-Protease zuerst kristallisieren – ein schwieriges Unterfangen, denn Biomoleküle lassen sich nur ungern in eine starre Kristallform zwingen. Die Kristalle bestrahlten die Forscher anschließend mit Röntgenlicht. Dabei entsteht ein charakteristisches Muster aus hellen Punkten, den Bragg-Peaks. Ein Computer ermittelt aus der Position und Intensität der hellen Punkte im Röntgenstreubild die Struktur des Kristalls und damit des Moleküls.

*„Auf der Basis dieser dreidimensionalen Strukturanalyse können wir verbesserte Hemmstoffe herstellen und hoffentlich bald ein Molekül haben, das sich zur Medikamentenentwicklung eignet“*

*Rolf Hilgenfeld, Universität Lübeck*

Tausende Versuche benötigten Hilgenfeld und sein Team, bis es ihnen erstmals gelang, das Zika-Schlüsselenzym mit Hilfe eines Roboters zu kristallisieren. Und damit nicht genug. Im hellen Röntgenlicht von PETRA III zeigte sich: „Die Kristalle wiesen ein seltenes Phänomen auf – sie waren verzwilligt“, berichtet Hilgenfeld. Das bedeutet, es liegen zwei Kristallgitter übereinander. „Das Schicksal war gegen uns – es ist nicht trivial, diese beiden Gitter mathematisch wieder auseinanderzurechnen.“ Aber schließlich hatten

die Forscher, was sie wollten: ein dreidimensionales Modell der Zikavirus-Protease.

Außerdem konnten die Wissenschaftler zusammen mit dem Enzym einen Hemmstoff kristallisieren, der die Zikavirus-Protease blockiert und damit ausschaltet. Diese sogenannte Boronsäure haben Forscher um Christian Klein von der Universität Heidelberg hergestellt. „Leider ist dieser Hemmstoff wenig spezifisch“, sagt Hilgenfeld. „Er blockiert nicht nur das Virusenzym, sondern auch andere Enzyme im menschlichen Körper.“ Deshalb ist der Hemmstoff nicht als Medikament geeignet. „Aber auf der Basis dieser dreidimensionalen Strukturanalyse können wir verbesserte Hemmstoffe herstellen und hoffentlich bald ein Molekül haben, das sich zur Medikamentenentwicklung eignet“, sagt Hilgenfeld.

### Suche nach dem universellen Hemmstoff

Die Forscher verfolgen dabei zwei Ansätze: Zum einen durchsuchen sie mit Computern Substanzbibliotheken von mehr als zwei Millionen kleinen Molekülen und filtern diejenigen heraus, die theoretisch in das aktive Zentrum der Protease passen könnten. „Die ersten 50 Passenden kaufen wir und testen sie auf ihre hemmende Wirkung gegen die Protease“, erläutert Hilgenfeld. Außerdem versuchen die Forscher in einem zweiten Ansatz einen neuen Hemmstoff zu entwickeln, indem sie passende Gegenstücke zu den Oberflächenbindestellen der Protease synthetisieren. Das ehrgeizige Ziel: „Wir suchen nach dem universellen Inhibitor, der virale Enzyme blockiert, aber keinerlei Wirkung auf menschliche Enzyme hat.“ Denn auch die Enzyme verwandter Flaviviren sollen mit dem Hemmstoff lahmgelegt werden, wie die Viren von Gelbfieber, Dengue- und Westnilfieber.

Beim Zikavirus gibt es noch eine weitere Schwierigkeit: Es ist extrem schwierig, ein Medikament zu entwickeln, das schwangere Frauen einnehmen können. Das Ziel ist daher, die Mittel vorbeugend an Kontaktpersonen von Schwangeren zu geben, um die Übertragungskette der Stechmücken zu unterbrechen. Auch die neurologischen Spätfolgen einer Zikavirus-Infektion soll ein solches Medikament vermeiden.

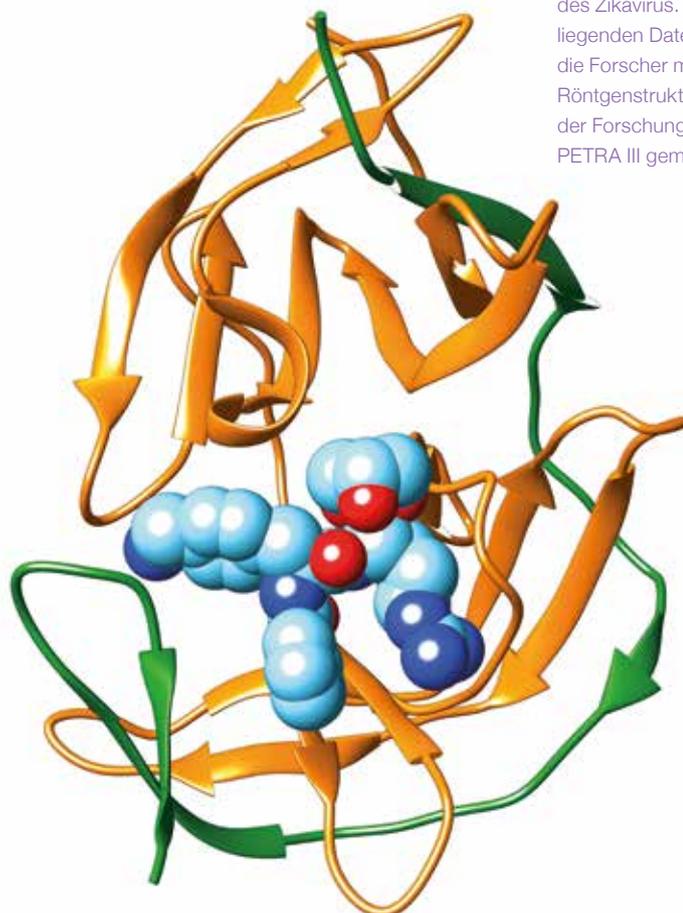
Nicht nur Hilgenfeld und sein Team nutzen die neuen Strukturdaten. „Das sehen wir an den vielen Anfragen, die wir haben“, sagt der Kristallograph. Schon jetzt fließen damit die Ergebnisse der Lübecker Forscher in die Wirkstoffentwicklung ein. Auch wenn Hilgenfeld optimistisch ist, dass es bald einen Hemmstoff für die Protease geben könnte – bis ein Medikament auf dem Markt ist, wird es noch dauern. Denn bevor ein Mittel

zugelassen wird, muss es erst in jahrelangen klinischen Tests erprobt werden. „Das wird Menschen, die jetzt mit dem Zikavirus infiziert sind, nicht helfen“, sagt Hilgenfeld. „Deswegen suchen wir ja auch ein antivirales Breitband-Mittel, welches dann hoffentlich gegen alle Flaviviren wirkt.“

### Neuer Ansatzpunkt für die Kristallzucht

Im Kampf gegen das Zikavirus und zukünftige Virenattacken arbeitet Hilgenfelds Arbeitsgruppe auch eng mit dem Biochemiker Lars Redecke zusammen, der an einem neuen Ansatz forscht, um Proteine zu kristallisieren. Für seine interdisziplinäre Forschung richteten die Universität Lübeck und DESY kürzlich eine Brückenprofessur ein. Redecke nutzt für seinen cleveren Ansatz die Fähigkeit lebender Zellen, Kristalle zu züchten. Aus dem Mund des Wissenschaftlers klingt das fast trivial. „Wir bringen einfach nur das Protein in Insektenzellen und warten ab“, erzählt Redecke. „Dann braucht es etwas Glück, und wenn die Mechanismen anlaufen, bildet sich ein Kristall, und den müssen wir einfach nur noch abernten.“ Dem Glück allein wollen die Forscher den Kristallisationsprozess künftig jedoch nicht >>

Dreidimensionale Struktur der NS2B-NS3-Protease des Zikavirus. Die zugrundeliegenden Daten haben die Forscher mit Hilfe der Röntgenstrukturanalyse an der Forschungslichtquelle PETRA III gemessen.



› überlassen. Wenn sie verstanden haben, wie die Insektenzellen die Proteine kristallisieren, wollen sie die Methode gezielt an verschiedene Proteine anpassen. Und so eine alternative Methode etablieren, mit der sich auch Proteine kristallisieren lassen, die sich den klassischen Methoden der Kristallographie widersetzen.

## „Wir könnten beim Auftreten eines neuen Virus in relativ kurzer Zeit die Kristallstruktur vieler Virusproteine aufklären“

Lars Redecke, Universität Lübeck

Das ehrgeizige Ziel: eine Art Fließbandproduktion für Proteinkristalle. „So könnten wir beim Auftreten eines neuen Virus in relativ kurzer Zeit die Kristallstruktur vieler Virusproteine aufklären“, sagt Redecke. Und damit die Wirkstoffentwicklung beschleunigen.

Mit Hilfe der Insektenzellen gelang es Redecke und seinem Team bereits, zwei weitere Zikaproteine zu kristallisieren, die neben der NS2B-NS3-Protease weitere potenzielle Angriffspunkte für Medikamente sind. „Wenn es uns gelingt, diese beiden Proteine in entsprechenden Mengen zu kristallisieren und dann ihre Struktur aufzuklären, ist das für die Forschung und die Entwicklung eines neuen Medikaments gegen das Zikavirus ein großer Fortschritt“, betont Redecke.

Science, 2016; DOI: 10.1126/science.aag2419

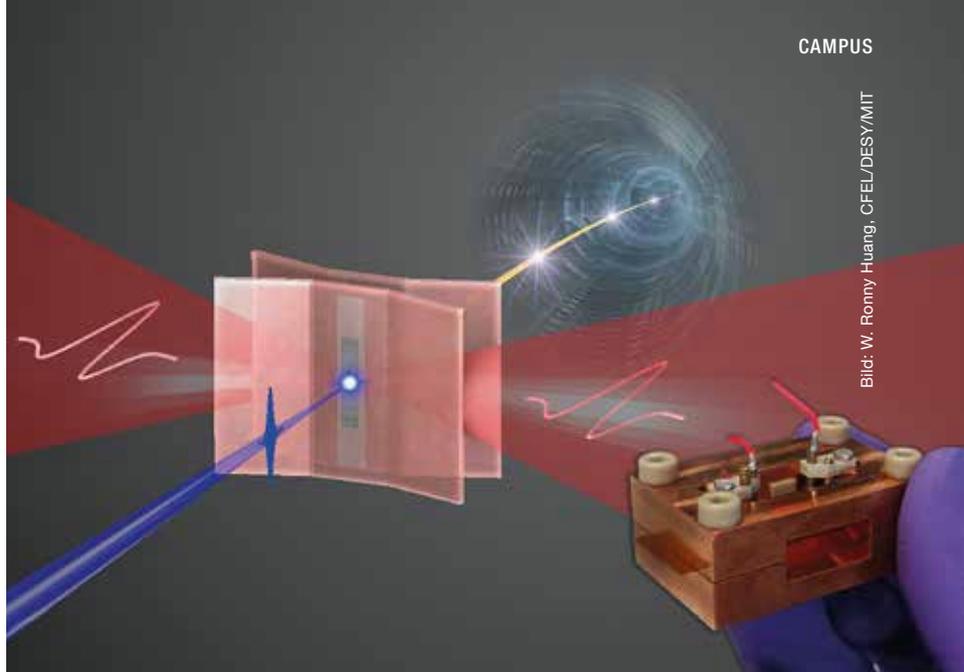


Bild: W. Ronny Huang, CFEL/DESY/MIT

# Elektronenquelle im Streichholzschachtelformat

**F**orscher von DESY und dem Massachusetts Institute of Technology (MIT) haben eine neuartige Elektronenquelle entwickelt, die kleiner ist als eine Streichholzschachtel. Die Miniquelle produziert kurze und stark gebündelte Elektronenstrahlen, die sich zur Untersuchung verschiedenster Materialien einsetzen lassen – von Biomolekülen bis hin zu Supraleitern. Außerdem kann sie die Teilchenbeschleuniger der nächsten Generation von Röntgenlasern mit maßgeschneiderten Elektronenpaketen versorgen. Heute eingesetzte Quellen, sogenannte Elektronenguns, können leicht die Größe eines Autos erreichen. Das Team um DESY-Wissenschaftler Franz Kärtner stellte seine Miniatur-Elektronen-Gun im Fachblatt *Optica* vor.

Die Neuentwicklung nutzt Terahertz-Strahlung statt der üblichen Hochfrequenzfelder, um Elektronen aus der Ruheposition zu beschleunigen.

Da Terahertz-Strahlung viel kürzere Wellenlängen hat als Hochfrequenz-Strahlung, können die Abmessungen des gesamten Aufbaus erheblich schrumpfen. So misst die neuartige Elektronenquelle nur 34 mal 24,5 mal 16,8 Millimeter – das ist kleiner als eine Standard-Streichholzschachtel.

„Terahertz-Elektronenquellen sind klein und effizient“, erläutert Hauptautor W. Ronny Huang vom MIT, der seine Arbeit am Hamburger Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) durchgeführt hat, einer Kooperation von DESY, Universität Hamburg und der Max-Planck-Gesellschaft. „Darüber hinaus können die verwendeten Terahertz-Wellenleiter viel höhere Feldstärken vertragen als bei Hochfrequenz-Wellenlängen, wodurch die Elektronen einen viel stärkeren Anschlag bekommen. So entstehen deutlich intensivere und kürzere Elektronenstrahlen.“ Die ultrakur-

Das Funktionsprinzip der Miniatur-Elektronenquelle auf Terahertz-Basis: Ein ultravioletter Blitz (blau) beleuchtet die Photokathode der Quelle von der Rückseite, wodurch eine kompakte Elektronenwolke auf der Innenseite des Geräts freigesetzt wird. Die Wolke wird unmittelbar von einem extrem intensiven Terahertz-Puls (rot) auf Energien nahe dem Kiloelektronenvolt-Bereich beschleunigt. Die schnellen Elektronen (gelb) können beispielsweise für ultraschnelle Elektronendiffraktionsexperimente oder für die Teilchenbeschleuniger einer künftigen Generation von Röntgenlasern genutzt werden.

zen Elektronenstrahlen mit minimaler Streuung der Energie der individuellen Teilchen, hoher Ladung und geringer zeitlicher Fluktuation können beispielsweise genutzt werden, um Phasenübergänge in Metallen, Halbleitern und Molekulkristallen mit Hilfe der Methode der ultraschnellen Elektronendiffraktion zu beobachten.

## „Das Beschleunigungsfeld ist fast doppelt so stark wie bei den modernsten konventionellen Quellen“

W. Ronny Huang, MIT

„Unsere Quelle besitzt einen Nanometer-dünnen Kupferfilm, aus dem ultraviolette Strahlungsblitze kompakte Elektronenwolken heraus schlagen“, erläutert Huang. „Eine maßgeschneiderte Mikrostruktur kanalisiert die eingespeiste Terahertz-Laserstrahlung dann so, dass sie die maximale Wirkung auf die Elektronen entfaltet.“ Auf diese Weise erreicht die Quelle einen Beschleunigungsgradienten von 350 Megavolt pro Meter. „Das Beschleunigungsfeld ist fast doppelt so stark wie bei den modernsten konventionellen Quellen“, sagt Huang.

„Wir konnten kompakte Pakete von je 250 000 Elektronen von 0 auf 500 Elektronenvolt beschleunigen, wobei die Energie der individuellen Teilchen kaum schwankt. Mit diesen Eigenschaften könnten die Elektronenstrahlen aus unserer Quelle bereits direkt für Untersuchungen mit Hilfe der niederenergetischen Elektronendiffraktion verwendet werden.“

Das CFEL verfügt über Hochleistungslaserlabore, in denen die erforderliche Laserstrahlung produziert werden kann. In dem neuartigen Aufbau erzeugt derselbe Laser sowohl die ultravioletten Strahlungsblitze zur Freisetzung der Elektronenwolke als auch das Terahertz-Feld zur anschließenden Beschleunigung der Teilchen. „Das sorgt für eine zuverlässige Synchronisierung und reduziert so die zeitliche Fluktuation erheblich“, erläutert Huang. Die Quelle arbeitet in den Versuchen der Forscher über mindestens eine Milliarde Elektronenstrahlschüsse stabil.

„Elektronenquellen sind unverzichtbare Geräte, etwa um chemische Reaktionen mit Hilfe der ultraschnellen Elektronendiffraktion in atomarer Auflösung zu filmen – eine Technik, der vor allem die Gruppe von Dwayne Miller am Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie im CFEL den Weg bereitet“, erläutert Franz Kärtner. „Mit kleineren und besseren Elektronenquellen können etwa Biologen bessere Einblicke in die Funktion der makromolekularen Maschinerie in der Photosynthese bekommen, und Physiker können zum Beispiel die fundamentalen Wechselwirkungsprozesse in komplexen Festkörpern besser verstehen.“

„Darüber hinaus sind Elektronenquellen wichtige Komponenten von Röntgenlaser-Anlagen“, erläutert Kärtner. Am CFEL werde bereits an der nächsten Generation von Terahertz-Elektronenquellen gearbeitet. Diese neuen Quellen soll dann ultrakurze und ultrahelle

Franz Kärtner leitet bei DESY die Abteilung für Ultrakurzzeit-Laser- und Röntgenphysik. Außerdem ist er Professor an der Universität Hamburg und leitet eine Forschungsgruppe am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in den USA.



## „Mit besseren Elektronenquellen können Biologen Einblicke in die Funktion der molekularen Maschinerie der Photosynthese bekommen“

Franz Kärtner, DESY

Elektronenstrahlen mit noch höheren, sogenannten relativistischen Energien und nur zehn Femtosekunden (billiardstel Sekunden) Dauer produzieren. „Diese Geräte sollen als Photoinjektoren für kompakte Attosekunden-Röntgenlaser dienen“, berichtet Kärtner. Eine Attosekunde ist eine tausendstel Femtosekunde. Bei DESY werden solche Elektronenquellen und Röntgenlaser im Rahmen des AXISIS-Programms (Frontiers in Attosecond X-ray Science: Imaging and Spectroscopy) entwickelt.

.....  
Optica, 2016; DOI: 10.1364/OPTICA.3.001209

ZOOM

# Die Entdeckung der kosmischen Teilchenbeschleuniger

Astrophysiker erkunden das Hochenergie-Universum

Aus dem Weltall prasselt ständig ein energiereicher Hagel subatomarer Teilchen auf die Erde. Jede Sekunde treffen rund 500 Billionen schnelle Atomkerne die Lufthülle unseres Planeten. Manche der kosmischen Teilchen haben dabei so viel Energie wie ein hart geschlagener Tennisball. Seit der Entdeckung dieser sogenannten Kosmischen Strahlung vor rund einem Jahrhundert rätseln Forscher, welche Prozesse die Teilchen derart beschleunigen – millionenfach stärker als die größten Teilchenbeschleuniger, die Menschen je gebaut haben. Nach und nach gelingt es Astrophysikern, die natürlichen Teilchenbeschleuniger im Weltall zu entschleiern.



Künstlerische Darstellung des Zentrums einer aktiven Galaxie: Um das zentrale Schwarze Loch, das sich bereits die Masse von rund einer Milliarde Sternen einverleibt hat, rotiert ein gigantischer Mahlstrom aus Materie, die in das Loch hineinstrudelt. Ein Teil der Materie wird dabei reflektiert und schießt in Form scharf gebündelter Materiestrahlen, sogenannter Jets, senkrecht ins All hinaus. Derartige kosmische Teilchenbeschleuniger können Atomkernen millionenfach höhere Energien verleihen als jede irdische Anlage.

**J**enseits des friedlich funkelnden Sternenhimmels liegt ein Hochenergie-Universum voller Extreme: Explodierende Sterne schicken Schockwellen durch die Galaxis, gigantische Mahlströme ziehen ganze Sonnen in Schwarze Löcher, exotische Doppelsterne schießen scharf gebündelte Teilchenstrahlen weit ins All hinaus. „Das Universum ist voller natürlicher Teilchenbeschleuniger“, sagt der Leiter des DESY-Standorts in Zeuthen, Christian Stegmann.

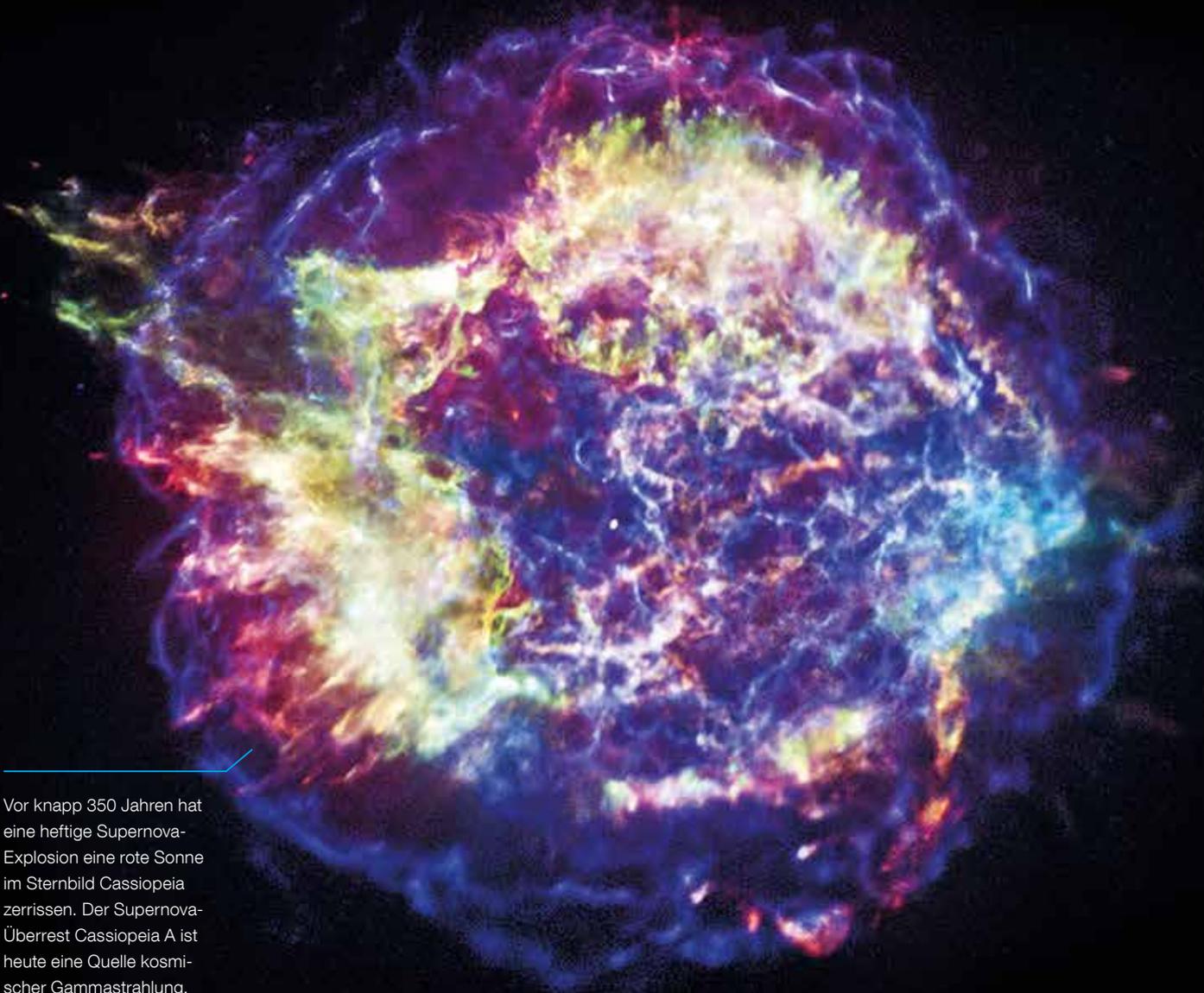
## „Das Universum ist voller natürlicher Teilchenbeschleuniger“

Christian Stegmann, DESY

„Bisher kennen wir etwa 150 dieser Objekte und haben ein erstes physikalisches Verständnis dieser faszinierenden Systeme.“ Mit neuen Metho-

den und Instrumenten durchforsten die Forscher immer detaillierter den Hochenergie-Kosmos.

Dabei geht es um mehr als das Verständnis des Phänomens der Kosmischen Strahlung selbst. „Eine wichtige Frage lautet: Welche Rolle spielt die Kosmische Strahlung bei der Entwicklung unserer Milchstraße und des gesamten Universums?“, sagt Stegmann. „So sorgt beispielsweise erst die Kosmische Strahlung dafür, dass die Scheibe der Milchstraße nicht kollabiert.“ Grund für den großen Einfluss der schnellen Teilchen ist ihre hohe Energie. Die Energiedichte der Kosmischen Strahlung ist vergleichbar mit der Energiedichte der optischen Photonen im Weltall oder mit derjenigen kosmischer Magnetfelder. Die Teilchen stabilisieren aber nicht nur unsere Heimatgalaxie, sie können auch zur Entstehung neuer Sterne beitragen, wie DESY-Forscher Stefan Ohm betont. „Die Kosmische Strahlung dringt in interstellare Molekülwolken ein und initiiert dort komplexe astrochemische Prozesse.“



Vor knapp 350 Jahren hat eine heftige Supernova-Explosion eine rote Sonne im Sternbild Cassiopeia zerrissen. Der Supernova-Überrest Cassiopeia A ist heute eine Quelle kosmischer Gammastrahlung.

# Im Wasserstoffballon zum Nobelpreis



Bild: VF Hess Society, EchoPhysica, Schloss Pöllaau/Österreich

Victor Hess in einem Ballonkorb im Jahr 1911 oder 1912

**A**ls der österreichische Physiker Victor Franz Hess am 7. August 1912 gegen Mittag mit seinem Wasserstoffballon im brandenburgischen Bad Saarow landete, hatte er eine Entdeckung im Gepäck, deren weitreichende Konsequenzen ihm sicherlich noch nicht bewusst waren. Bei seiner siebten Ballonfahrt in diesem Jahr hatte er in 5300 Metern Höhe über dem Schwieblichsee im Südosten Brandenburgs mit drei Ionisationsmessgeräten die Existenz einer durchdringenden Höhenstrahlung nachgewiesen. Erst viele Jahre später stellte sich heraus, dass es sich bei dieser sogenannten Kosmischen Strahlung vor allem um einen Hagel energiereicher, elektrisch geladener Atomkerne und anderer Teilchen handelt. Die Entdeckung brachte Hess 24 Jahre später den Nobelpreis ein.

„Der Nachweis der Kosmischen Strahlung war eine Jahrhundertentde-

ckung, die uns völlig neue Einblicke ins Universum gebracht hat“, betont Christian Stegmann. „Darüber hinaus wurde sie auch zu einem Eckpfeiler der frühen Teilchenphysik. Vor der Entwicklung irdischer Teilchenbeschleuniger wurden mit Hilfe der Kosmischen Strahlung mehrere wichtige Elementarteilchen entdeckt, etwa das Antiteilchen des Elektrons – das Positron – sowie das Myon und das Pion.“

Im Gegensatz zur Röntgenstrahlung, deren zufällige Entdeckung sofort weltweit gefeiert wurde und die nach wenigen Jahren eine Revolution in der medizinischen Diagnostik bewirkte, benötigte die Kosmische Strahlung mehr als 15 Jahre, um wissenschaftlich allgemein anerkannt zu werden. Erst in der zweiten Hälfte der 1920er Jahre begann die Erforschung der Eigenschaften der kosmischen Teilchen. Dabei zeigte sich schnell, dass die Kosmische Strahlung im Gegensatz zu bisherigen

Annahmen eine Teilchenstrahlung ist, die in der Atmosphäre Kaskaden von Folgeteilchen erzeugt, sogenannte Luftschauer.

Die Entdeckung des Positrons läutete 1932 den Beginn der Elementarteilchenphysik ein. In den folgenden 15 Jahren bis zur Inbetriebnahme des ersten Teilchenbeschleunigers in Berkeley wurden die Erkenntnisse der Teilchenphysik mit kosmischen Teilchen gewonnen. Mit Beginn der 1950er Jahre verlagerte sich die Elementarteilchenphysik zu Experimenten an Beschleunigern. Die Astroteilchenphysik konzentrierte sich zunächst auf die Untersuchung hochenergetischer Luftschauer. Die Herkunft der Kosmischen Strahlung ist aber auch heute noch nicht abschließend enträtselt.

Wie wir heute wissen, besteht der Teilchenhagel aus dem All zu knapp 90 Prozent aus Wasserstoff-Atomkernen, den Protonen. Den Rest machen vor allem Helium-Atomkerne aus, die sogenannten Alphateilchen. Alle schwereren Atomkerne stellen zusammen nur einen Anteil von etwa einem Prozent. Obwohl Astrophysiker die Zusammensetzung der Kosmischen Strahlung inzwischen recht gut kennen, ist die Frage nach dem Ursprung der schnellen Teilchen nicht abschließend geklärt. Das Problem bei der Fahndung nach den Quellen der Kosmischen Strahlung: Die Protonen und andere schnelle Atomkerne sind elektrisch geladen und werden von den zahlreichen Magnetfeldern im Weltall abgelenkt. Die Richtung, aus der sie schließlich auf die Erdatmosphäre treffen, zeigt daher nicht mehr zu ihrem Ursprung zurück.

Zwei Ausnahmen helfen den Forschern: Die kosmischen Teilchenbeschleuniger erzeugen fast immer auch energiereiche Gammastrahlung

sowie schnelle Neutrinos. Weder das Gammastrahlung noch die elektrisch neutralen Elementarteilchen werden von den kosmischen Magnetfeldern abgelenkt. Ihre Ankunftsrichtung weist also direkt zu ihrer Quelle. „Die Erkundung der Kosmischen

## „Die Erkundung der Kosmischen Strahlung hat zu neuen Forschungszweigen geführt“

Sir Arnold Wolfendale, ehemaliger königlich-britischer Hofastronom

Strahlung hat zu neuen Forschungszweigen geführt, insbesondere zu neuen Formen der Astronomie, und diese haben eine leuchtende Zukunft“, betont der ehemalige königlich-britische Hofastronom Sir Arnold Wolfendale. „Die Neu- >>

trinoastronomie begibt sich gerade an den Start, und die Gammaastronomie hat bereits ernsthaft begonnen.“

Allerdings sind beide Arten von Himmelsboten schwer zu beobachten. Neutrinos reagieren nur extrem selten mit anderen Teilchen – und das ist für einen Nachweis nötig. Rund 60 Milliarden der scheuen Elementarteilchen rauschen pro Sekunde durch jeden Quadratzentimeter der Erdoberfläche, fast alle folgenlos. Ein internationales Konsortium, an dem DESY maßgeblich beteiligt ist, hat am Südpol den größten Teilchendetektor der Welt gebaut, um kosmische Neutrinos zu jagen. Mehr als 5000 empfindliche Nachweisgeräte, sogenannte Photomultiplier, spähen unterirdisch in einem Kubikkilometer ewigem Eis nach den seltenen Lichtblitzen, die den Zusammenstoß eines Neutrinos mit einem Teilchen im Eis verraten.

Auf diese Weise hat der IceCube getaufte Detektor bereits Neutrinos mit spektakulär hohen Energien aus den Tiefen des Weltalls nachgewiesen. Noch lässt sich die Herkunftsrichtung dieser Teilchen allerdings nur grob einkreisen. „Nach den ersten Entdeckungen mit IceCube wollen wir möglichst bald den Schritt zu Präzisionsmessungen in der Neutrinoastronomie gehen“, sagt DESY-Forscher Markus Ackermann. Die Wissenschaftler erwägen zu diesem Zweck bereits mögliche Erweiterungen des internationalen Observatoriums.

### Überlichtschnelle Teilchenschauer

Die Gammaastronomie ist auf ihrem Entwicklungsweg schon weiter fortgeschritten. Sie macht nicht so scharfe Bilder wie die optische Astronomie. Bei den interessanten Energien erreicht sie aber eine Auflösung von zwei bis drei hundertstel Grad. Das ist immerhin rund ein Zwanzigstel des

Vollmonddurchmessers am irdischen Himmel. Die Herausforderung bei der Gammaastronomie lautet, die vergleichsweise wenigen Gammaquanten von den Myriaden Atomkernen der Kosmischen Strahlung zu unterscheiden.

Treffen energiereiche Atomkerne oder Gammaquanten aus dem All auf die Erdatmosphäre, stoßen sie mit den Luftteilchen zusammen und zerschmettern diese. Die Trümmer sind so schnell, dass sie weitere Teilchen zerschlagen, deren Bruchstücke wiederum Teilchen zerstören. So entwickelt sich eine Kaskade von Folgeteilchen, die Physiker als Luftschauer bezeichnen. Die Teilchen in diesem Luftschauer sind so schnell, dass sie sich schneller bewegen, als das Licht es in der Luft kann. Die Luftschauerteilchen verletzen damit aber nicht Albert Einsteins universelle Geschwindigkeitsbegrenzung, denn die liegt bei der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, und in Luft ist die Lichtgeschwindigkeit etwas niedriger.

Die überlichtschnelle Bewegung der Teilchenschauer erzeugt eine Art optisches Äquivalent zum Überschallknall: einen bläulichen Lichtblitz, die sogenannte Cherenkov-Strahlung, benannt nach ihrem sowjetischen Entdecker Pavel Cherenkov. Irdische Gammastrahlenteleskope beobachten daher nicht das Weltall, sondern die Erdatmosphäre – sie ist quasi Teil des Observatoriums. Der typische Luftschauer eines kosmischen Gammaquants sieht dabei geringfügig anders aus als der eines schnellen Atomkerns. Mit den Cherenkov-Teleskopen der Observatorien H.E.S.S. in Namibia, MAGIC auf den Kanarischen Inseln und VERITAS in den USA gelingt diese Unterscheidung inzwischen so gut, dass ein internationaler Zusammenschluss von Forschungsinstituten jetzt das Gammaobservatorium der nächsten Generation baut: das Cherenkov Telescope Array (CTA).



DESY-Forscher  
Markus Ackermann  
arbeitet in der  
IceCube-Gruppe.



Das Cherenkov Telescope Array (CTA) wird aus drei verschiedenen Teleskoptypen bestehen. DESY hat die Verantwortung für Design und Bau der mittelgroßen Teleskope übernommen.

Cherenkov-Teleskope wie bei CTA registrieren das bläuliche Leuchten, das überlichtschnelle Teilchenschauer in der Erdatmosphäre auslösen.

„Das Cherenkov Telescope Array wird Tausende kosmische Beschleuniger mit bisher unerreichter Empfindlichkeit beobachten können und unser Verständnis des Universums grundlegend erweitern“, schwärmt Stegmann. „Es wird damit das Observatorium der Zukunft in der Gammaastronomie sein.“ CTA wird aus mehr als 100 einzelnen Cherenkov-Teleskopen dreier unterschiedlicher Typen bestehen, die an je einem Standort auf der Süd- und auf der Nordhalbkugel aufgebaut werden. Mehr als 1000 Wissenschaftler und Ingenieure aus über 30 Ländern haben sich in dem 400-Millionen-Euro-Projekt zusammengeschlossen, um die Anlage in den nächsten fünf Jahren aufzubauen und anschließend mindestens zwei Jahrzehnte lang zu betreiben. DESY hat unter anderem die Verantwortung für Design und Bau von einem der drei CTA-Teleskoptypen übernommen.

## „Wir erwarten durch CTA ein tiefes Verständnis der Rolle hochenergetischer Prozesse in der Entwicklung unseres Universums“

Werner Hofmann, Max-Planck-Institut für Kernphysik Heidelberg

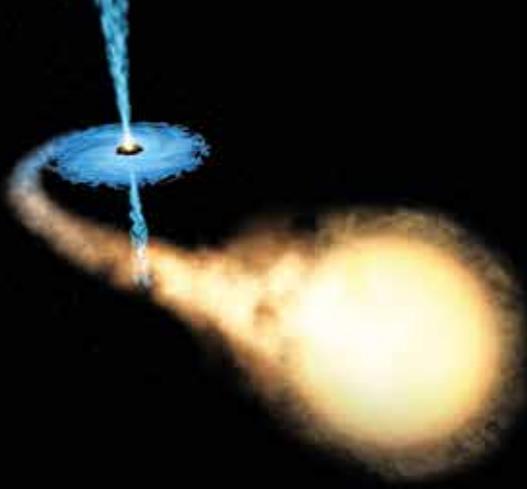
Das wissenschaftliche CTA-Zentrum wird bei DESY in Zeuthen angesiedelt, der Verwaltungssitz entsteht im italienischen Bologna. „Wir sind sehr froh, dass wir uns im internationalen Bieter-

prozess durchsetzen und die wissenschaftliche Koordination von CTA nach Deutschland holen konnten“, sagt Beatrix Vierkorn-Rudolph vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). „Deutschland hat eine lange und erfolgreiche Tradition in der Gammastrahlungsastronomie, die wir sehr gut in die wissenschaftliche Koordination von CTA einbringen können“, ergänzt CTA-Sprecher Werner Hofmann vom Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik. „CTA wird diesen Bereich der Astronomie revolutionieren. Wir erwarten durch CTA ein tiefes Verständnis der Rolle hochenergetischer Prozesse in der Entwicklung unseres Universums und viele wissenschaftliche Überraschungen.“

### Überraschungen garantiert

Überraschungen sind nahezu garantiert. So haben Forscher mit dem Gammaobservatorium High Energy Stereoscopic System (Stereoskopisches Hochenergie-System; H.E.S.S.) in Namibia kürzlich den stärksten Teilchenbeschleuniger der Milchstraße identifiziert. Er sitzt im Zentrum der Galaxis und schleudert Protonen mit einer Energie von bis zu einem Petaelektronenvolt ins All, das ist rund hundertmal mehr als der stärkste irdische Beschleuniger erreichen kann, der Large Hadron Collider (LHC) am Genfer Forschungszentrum CERN. Das galaktische Zentrum ist damit eine der wichtigsten Quellen der Kosmischen Strahlung in unserer Galaxie.

H.E.S.S. hat die Mehrheit der bislang bekannten rund 150 Quellen höchstenergetischer kosmischer Gammastrahlung entdeckt. Darunter waren immer wieder Überraschungen. „So hat H.E.S.S. >>



Künstlerische Illustration eines Neutronensterns, der von einem Begleiter Materie absaugt und dabei Materiejets ins All schießt.

# Beispiele kosmischer Teilchenbeschleuniger

In Starburst-Galaxien wie M82 entstehen nicht nur viele neue Sterne, es gibt auch viele Supernova-Explosionen. Kombinationsaufnahme im Infrarot-, sichtbaren und Röntgenlicht.

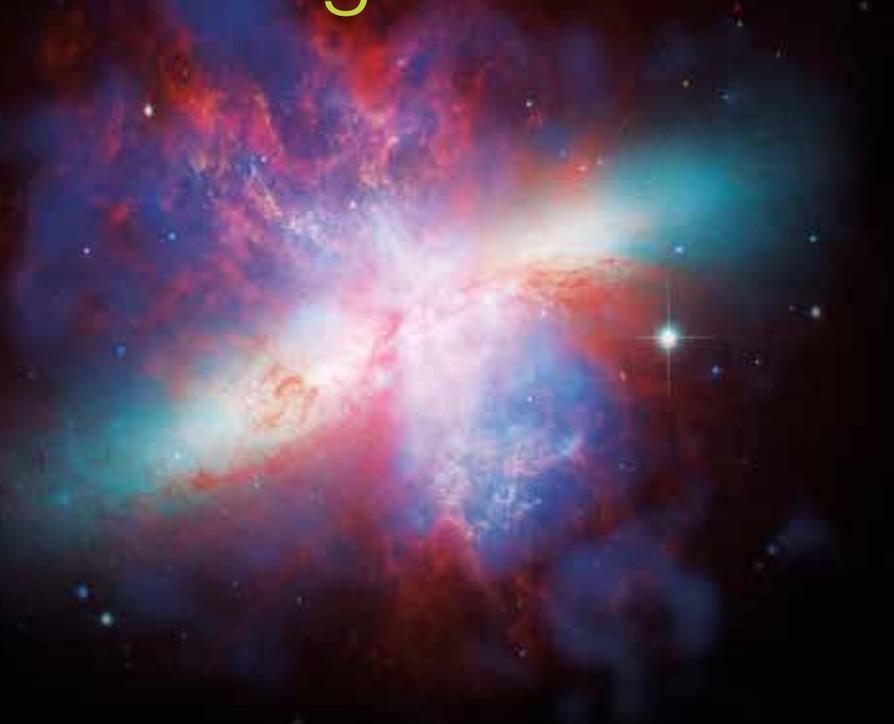


Bild: NASA/JPL-Caltech/STScI/CXC/UCofA/ESA/AURA/JHU

Röntgenaufnahme der Explosionswolke von „Tycho's Supernova“, einem 1572 explodierten Stern, die heute stark im Gammalicht leuchtet.

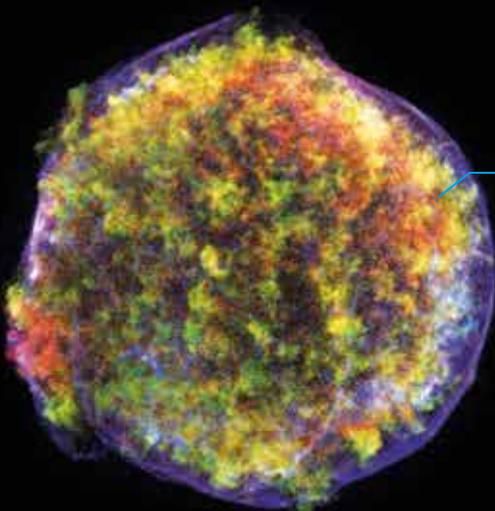
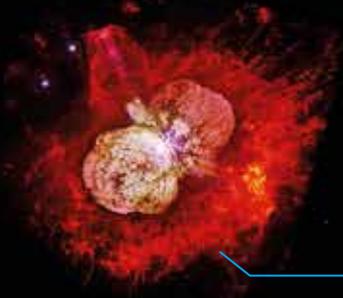


Bild: NASA/HST/J. Morse/K. Davidson

Das Doppelsternsystem Eta Carinae im Inneren des Homunkulusnebels erzeugt Gammastrahlung über die Sternwinde, die miteinander kollidieren.



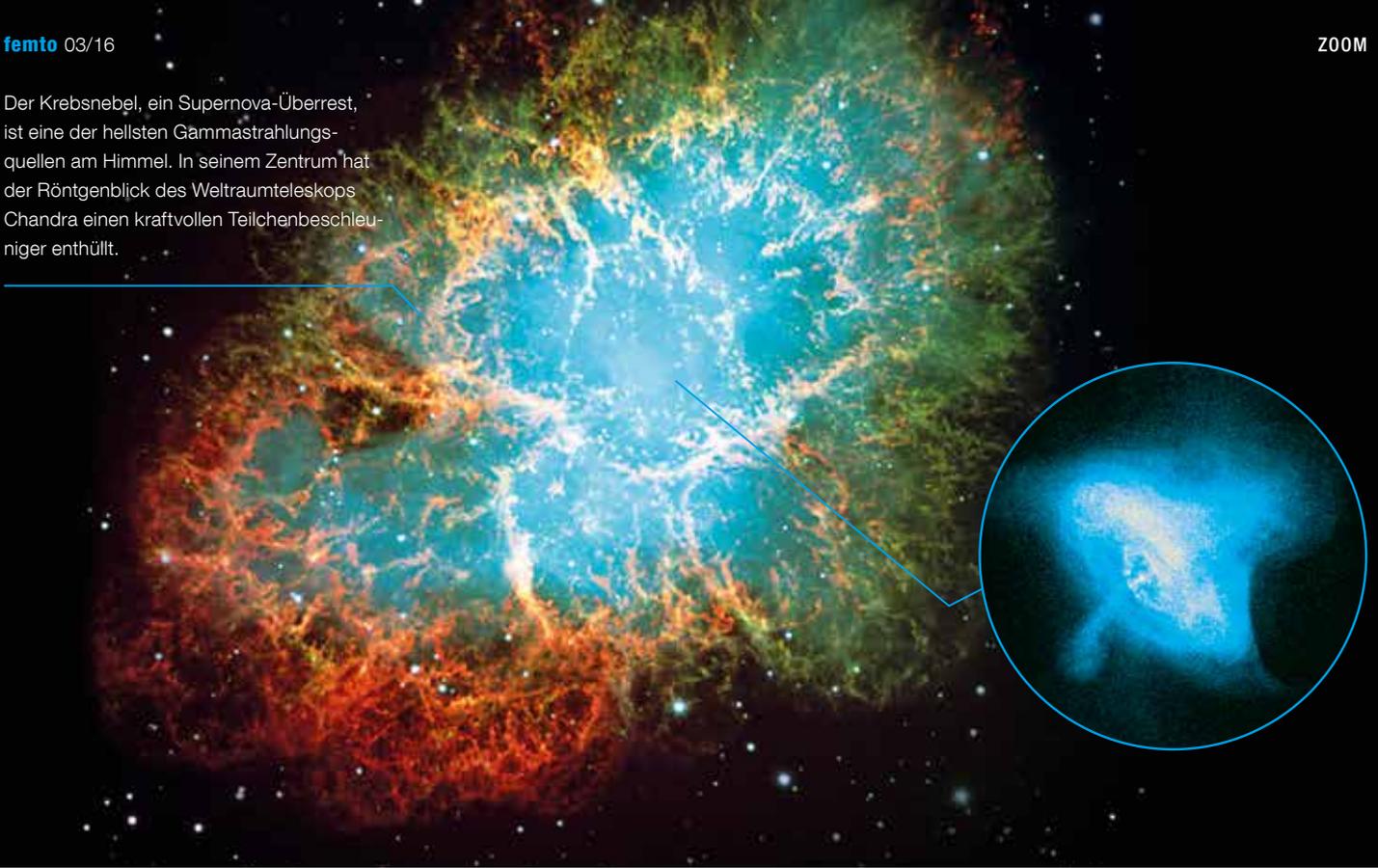
Supermassives Schwarzes  
Loch im Zentrum einer akti-  
ven Galaxie (Illustration)

Mosaik der Großen Ma-  
gellanschen Wolke, einer  
Satellitengalaxie der Milch-  
straße. Links oberhalb des  
Zentrums haben Forscher  
eine sogenannte Super-  
schale aufgespürt, die im  
Gammalicht strahlt.

Das Zentrum der Milchstraße  
im Radiolicht. Dort haben  
Astronomen den stärksten  
Teilchenbeschleuniger unse-  
rer Galaxie identifiziert.

Kollidierende Neutro-  
nensterne und zu einem  
Schwarzen Loch kollabie-  
rende Riesensonnen können  
kurze, extrem energiereiche  
Gammablitzes aussenden,  
sogenannte Gamma Ray  
Bursts, wie in dieser künstle-  
rischen Darstellung.

Der Krebsnebel, ein Supernova-Überrest, ist eine der hellsten Gammastrahlungsquellen am Himmel. In seinem Zentrum hat der Röntgenblick des Weltraumteleskops Chandra einen kraftvollen Teilchenbeschleuniger enthüllt.



> etwa den Supernova-Überrest Monoceros beobachtet und dabei zufällig eine Gamma-Punktquelle entdeckt“, berichtet DESY-Forscher Gernot Maier. Das US-Teleskopsystem VERITAS konnte diese Quelle bei Folgebeobachtungen rund zwei Jahre später allerdings nicht entdecken. „Ein weiteres Jahr später hat jedoch auch VERITAS dieses Objekt im Gammalicht gesehen. Es musste also eine variable Quelle sein“, sagt Maier. „Inzwischen haben wir Beobachtungsdaten aus mehr als zehn Jahren, und heute wissen wir, dass es sich um ein Doppelsternsystem mit einer Periode von 320 Tagen handelt, das zwischenzeitlich im Gamma- und Röntgenbereich komplett dunkel wird. Wir stellen uns vor, dass es sich um ein Doppelsternsystem aus einem Pulsar und einem massiven Stern mit ungefähr zehn Sonnenmassen handelt. Aber wir verstehen noch nicht genau, wie diese Quelle funktioniert.“

In unserer direkten kosmischen Nachbarschaft, der Großen Magellanschen Wolke, stieß H.E.S.S. zudem auf einen neuen Typ von Gammastrahlungsquelle, eine sogenannte Superschale. Dabei handelt es sich um ein 270 Lichtjahre großes schalenförmiges Gebilde, das von mehreren Supernova-Explosionen und starken Sternwinden aufgeblasen worden ist. Den Beobachtungen zufolge ist die Superschale mit energiereichen Teilchen gefüllt und produziert zusätzlich zu den einzelnen Supernova-Überresten kosmische Gammastrahlung.

Die Superschale mit der Katalognummer 30 Dor C liegt im Tarantelnebel, der größten Sternfabrik in der Großen Magellanschen Wolke. Dort beobachtete H.E.S.S. noch zwei weitere Gammaquellen: Den Pulsarwindnebel N157B und den Supernova-Überrest N132D. Pulsare sind schnell rotierende Sternleichen, sogenannte Neutronensterne, mit einem starken Magnetfeld. Sie senden einen Wind extrem schneller Teilchen aus, die eine Art Nebel bilden können.

*„Die Ergebnisse bestätigen die Vermutung, dass Supernova-Überreste wesentlich leuchtstärker sein können als bisher angenommen“*

*Stefan Ohm, DESY*

Der Supernova-Überrest N132D war bereits als helles Objekt im Radiowellen- und Infrarotbereich bekannt. Die H.E.S.S.-Beobachtungen deuten jedoch darauf hin, dass dieses Objekt einer der ältesten und stärksten Supernova-Überreste ist, die noch im höchstenergetischen Gammalicht leuchten. Die Trümmerwolken explodierter



Stefan Ohm erforscht den Hochenergie-Kosmos mit dem H.E.S.S.-Observatorium.

Sterne erzeugen Gammastrahlung durch ihre Explosionsschale, die mit extremer Geschwindigkeit in das umgebende interstellare Gas rast. Dort wird sie abgebremst, und es entsteht eine sogenannte Schockfront mit starken Magnetfeldern. Die Felder lassen elektrisch geladene Teilchen mehrfach von einer zur anderen Seite der Front kreuzen, wobei sie auf sehr hohe Energien beschleunigt werden. Treffen die schnellen Teilchen dann beispielsweise auf ein Lichtteilchen oder auf ein langsames Proton aus dem interstellaren Gas, können sie ein Teilchen namens Pion erzeugen. Das Pion zerfällt in zwei Gammaquanten, die sich dann an der Erde nachweisen lassen.

Da die Explosionsschale durch das umgebende interstellare Gas stark gebremst wird, kommt die Teilchenbeschleunigung nach kosmisch kurzer Zeit weitgehend zum Erliegen. Offensichtlich jedoch nicht ganz so schnell wie gedacht. Denn N132D ist bereits 2500 bis 6000 Jahre alt und strahlt immer noch mehr Gammalicht aus als die hellsten Supernova-Überreste in der Milchstraße. „Die Ergebnisse bestätigen die Vermutung aus bisherigen Beobachtungen mit H.E.S.S., dass Supernova-Überreste wesentlich leuchtstärker sein können als bisher angenommen“, erläutert DESY-Forscher Ohm, der maßgeblich an der Interpretation und Modellierung der Beobachtungsdaten von der Großen Magellanschen Wolke mitgearbeitet hat.

### Erster robuster Nachweis

Supernova-Überreste wie N132D sind bislang die einzigen Objekte, die wissenschaftlich robust als Quellen Kosmischer Strahlung nachgewiesen sind. Beim Zerfall des Pions wird seine gesamte Masse nach Einsteins berühmter Äquivalenz  $E=mc^2$  in Energie umgewandelt, beide Gammaquanten bekommen davon die Hälfte. Das heißt aber auch, dass unterhalb einer Energie, die der halben Masse des Pions entspricht, keine Gammastrahlung mehr zu finden sein sollte, wenn das beschriebene Modell korrekt ist.

Mit dem Gammastrahlen-Satellit Fermi der US-Raumfahrtbehörde NASA haben Forscher genau diesen sogenannten Pion-Cut-off bei zwei Supernova-Überresten mit den Katalognummern IC443 und W44 in unserer Milchstraße beobachtet. „Im vergangenen Jahrhundert haben wir viel Neues über die auf die Erde auftreffende Kosmische Strahlung erfahren. Wir waren uns sogar ziemlich sicher, was die Quellen ihrer Beschleunigung angeht, aber erst jetzt haben wir den eindeutigen Beweis“, sagt Stefan Funk, der an der Universität Stanford die Analyse geleitet hat und heute an der Universität Erlangen arbeitet.

„Der nächste Schritt ist nun, den Beschleunigungsprozess genauer zu studieren, um zu verstehen, bis zu welchen Energien diese Teilchen beschleunigt werden“, sagt DESY-Forscher Rolf Bühler aus dem Fermi-Team. „Wir wissen heute, dass es fast unmöglich ist, einen Stern explodieren zu lassen, ohne Protonen und andere Atomkerne zu beschleunigen“, ergänzt Maier. „Die Frage lautet: Wie viele und wie lange?“

## „Im vergangenen Jahrhundert haben wir viel Neues über die auf die Erde auftreffende Kosmische Strahlung erfahren“

Stefan Funk, Universität Erlangen

Neben Supernova-Überresten, Pulsarwindnebeln, Doppelsternen und der Superschale haben Astrophysiker auch bestimmte Sternentstehungsregionen, sogenannte Starburst-Galaxien, und vor allem die gigantischen Schwarzen Löcher im Zentrum aktiver Galaxien als Quellen kosmischer Gammastrahlung identifiziert. Bei allen diesen Quellentypen gehen die Forscher davon aus, dass sie auch extrem energiereiche Teilchen ins All schleudern. „Die Quellen der Kosmischen Strahlung sind extrem unterschiedlich: Es gibt welche, die nur zehn Kilometer Durchmesser haben, und andere sind tausende Lichtjahre groß“, betont Bühler, der auch in der CTA-Gruppe bei DESY arbeitet.

Oft spielen dabei scharf gebündelte Materiestrahlen eine Rolle, sogenannte Jets, die aus vielen Objekten oben und unten ins All hinauschießen. So wird etwa ein Teil der Materie, die in den gigantischen Strudeln Schwarzer Löcher eingesogen wird, vor Erreichen des Schwarzen Lochs senkrecht nach oben und unten wieder ins All hinausgeschleudert. Trifft dieser schnelle Materiestrahl auf das umgebende Gas, bildet sich auch hier eine Schockfront aus, die Protonen und andere Atomkerne auf extrem hohe Energien beschleunigen kann.

„Jets sieht man auf allen Skalen – von einzelnen Sternen über Doppelsternsysteme bis hin zu Schwarzen Löchern mit Millionen Sternenmassen“, erläutert Maier. „Und immer sind das kosmische Teilchenbeschleuniger.“ So hat etwa der Röntgensatellit Chandra im Herz des Krebsnebels, einer der hellsten Gammastrahlungsquellen am >>

Himmel, einen derartigen Beschleuniger enthüllt: Auch der zentrale Neutronenstern dieses Supernova-Überrests schießt gebündelte Materiestrahlen ins All.

## „Es ist erstaunlich, wie normal Teilchenbeschleuniger im All sind“

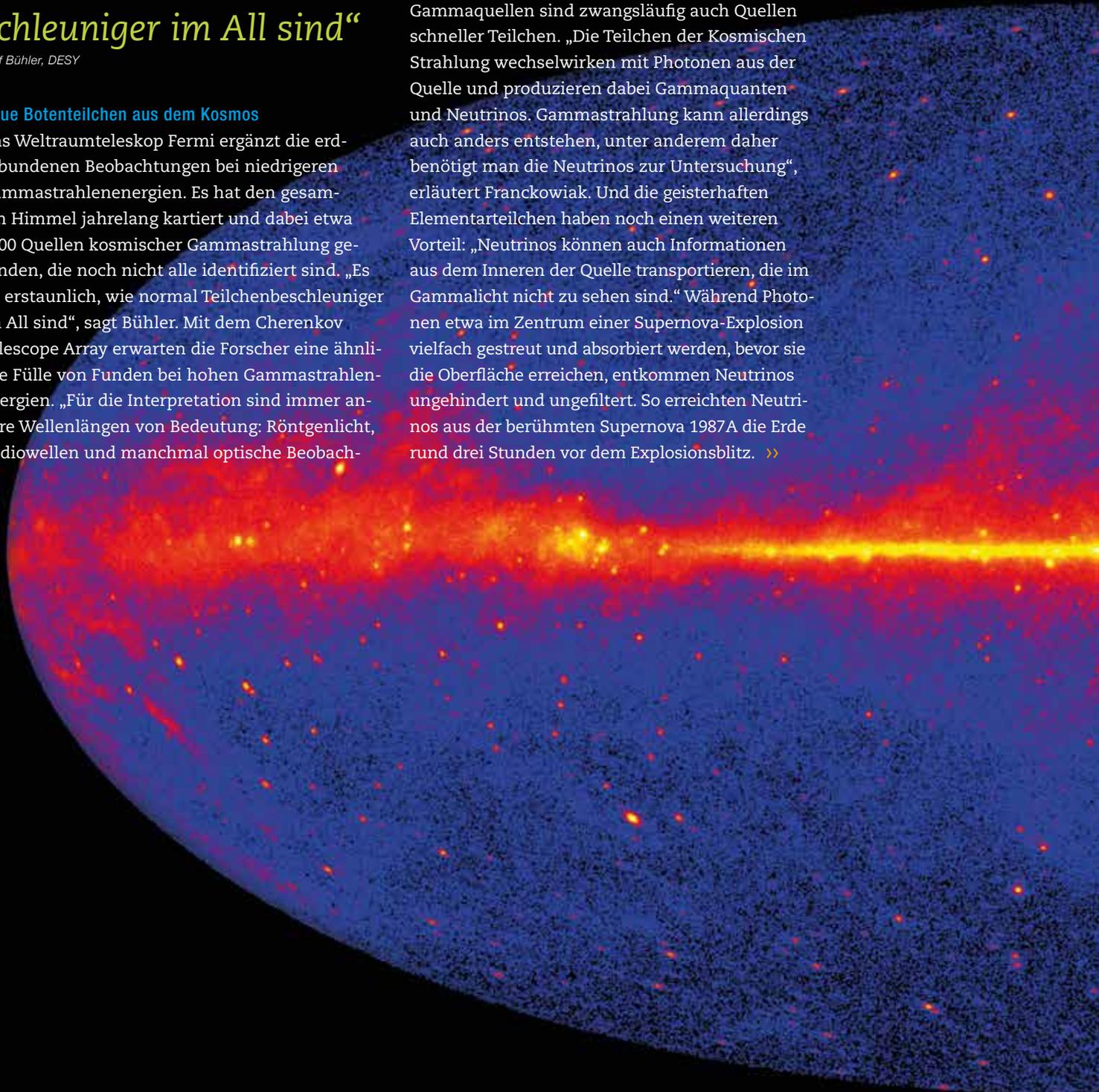
Rolf Bühler, DESY

### Neue Botenteilchen aus dem Kosmos

Das Weltraumteleskop Fermi ergänzt die erdgebundenen Beobachtungen bei niedrigeren Gammastrahlenenergien. Es hat den gesamten Himmel jahrelang kartiert und dabei etwa 3000 Quellen kosmischer Gammastrahlung gefunden, die noch nicht alle identifiziert sind. „Es ist erstaunlich, wie normal Teilchenbeschleuniger im All sind“, sagt Bühler. Mit dem Cherenkov Telescope Array erwarten die Forscher eine ähnliche Fülle von Funden bei hohen Gammastrahlenenergien. „Für die Interpretation sind immer andere Wellenlängen von Bedeutung: Röntgenlicht, Radiowellen und manchmal optische Beobach-

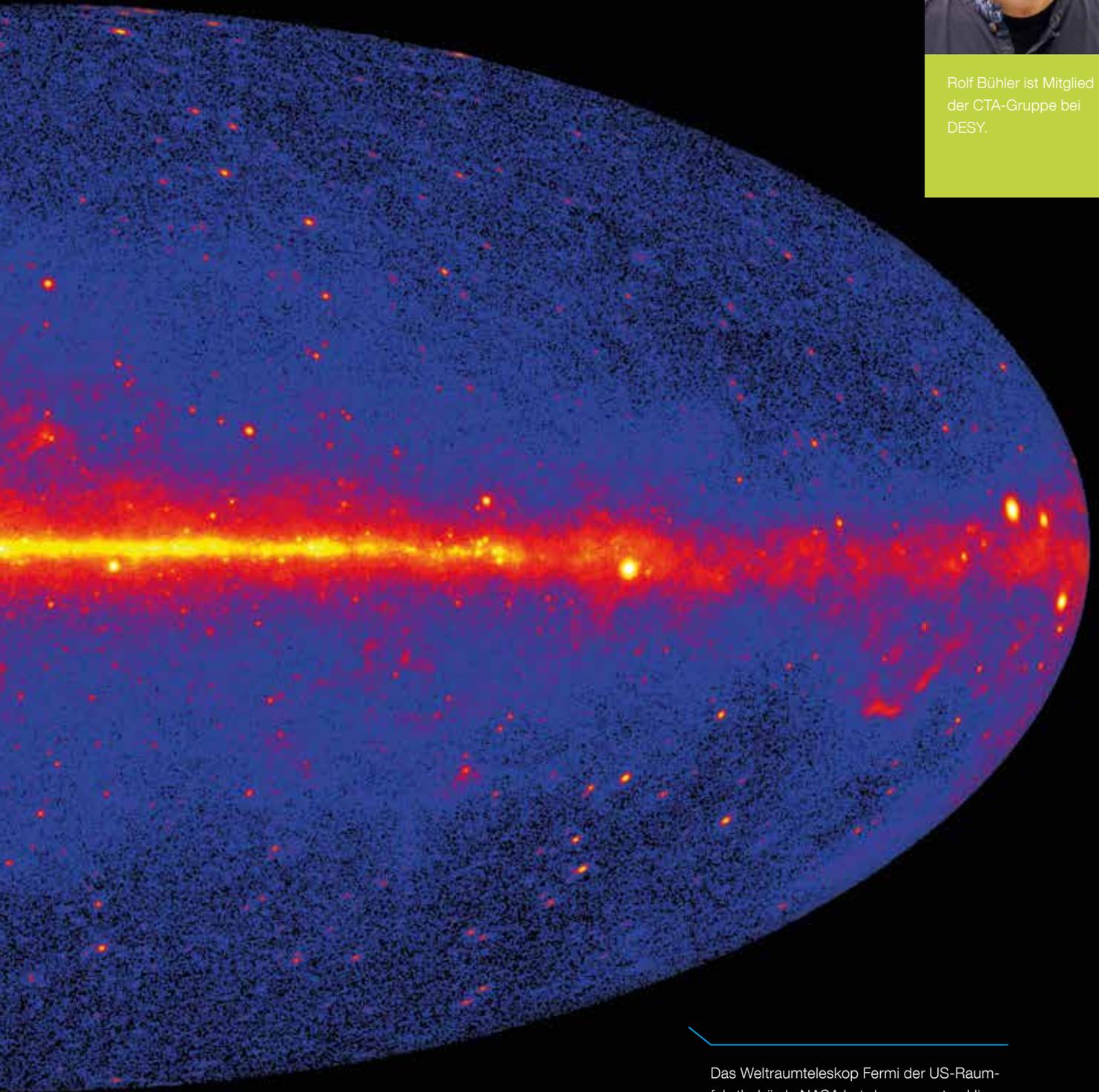
tungen“, betont Maier. Eine wichtige Rolle dürften dabei künftig auch Neutrinos spielen.

„Wir sehen natürlich die Gammaquellen, aber es ist nicht gesagt, dass diese die einzigen Quellen der Kosmischen Strahlung sind“, erläutert IceCube-Forscherin Anna Franckowiak, die eine von der Helmholtz-Gemeinschaft geförderte Nachwuchsgruppe bei DESY leitet. Und nicht alle Gammaquellen sind zwangsläufig auch Quellen schneller Teilchen. „Die Teilchen der Kosmischen Strahlung wechselwirken mit Photonen aus der Quelle und produzieren dabei Gammaquanten und Neutrinos. Gammastrahlung kann allerdings auch anders entstehen, unter anderem daher benötigt man die Neutrinos zur Untersuchung“, erläutert Franckowiak. Und die geisterhaften Elementarteilchen haben noch einen weiteren Vorteil: „Neutrinos können auch Informationen aus dem Inneren der Quelle transportieren, die im Gammalicht nicht zu sehen sind.“ Während Photonen etwa im Zentrum einer Supernova-Explosion vielfach gestreut und absorbiert werden, bevor sie die Oberfläche erreichen, entkommen Neutrinos ungehindert und ungefiltert. So erreichten Neutrinos aus der berühmten Supernova 1987A die Erde rund drei Stunden vor dem Explosionsblitz. >>





Rolf Bühler ist Mitglied der CTA-Gruppe bei DESY.



Das Weltraumteleskop Fermi der US-Raumfahrtbehörde NASA hat den gesamten Himmel im Gammalicht kartiert und dabei etwa 3000 Quellen dieser Strahlung aufgespürt, von denen bislang nur ein Teil identifiziert worden ist. Bei hohen Gammaenergien, wie sie mit erdgebundenen Teleskopen beobachtet werden, sind etwa 150 Quellen zu sehen.

Das IceCube-Labor befindet sich in der Amundsen-Scott-Forschungsstation in der Antarktis.

Bild: Sven Lidstrom, IceCube/NSF

Mit dem Südpol-Observatorium IceCube haben die Forscher bereits gezeigt, dass sich sogenannte astrophysikalische Neutrinos aus den Tiefen des Weltalls auf der Erde beobachten lassen, deren Ursprung jenseits unseres eigenen Sonnensystems liegen muss. „Kosmische Neutrinos sind der Schlüssel zu bisher unerforschten Bereichen unseres Universums und enthüllen möglicherweise die Herkunft der extrem hochenergetischen Kosmischen Strahlung“, erklärt IceCube-Sprecherin Olga Botner von der Universität Uppsala. „Die Entdeckung astrophysikalischer Neutrinos deutet auf den Beginn einer neuen Ära der Astronomie hin.“

**„Neutrinos können auch Informationen aus dem Inneren der Quelle transportieren, die im Gammalicht nicht zu sehen sind“**

Anna Franckowiak, DESY

Die bisherigen Beobachtungsdaten erlauben auch eine erste Analyse der Rate, mit der diese geisterhaften Elementarteilchen in verschiedenen Energiebereichen auf die Erde treffen. „Dank der Kombination mehrerer unabhängiger Datensätze

können wir jetzt nicht nur sagen ‚Hurra, wir haben Neutrinos gesehen!‘, sondern auch mit hoher Genauigkeit vermessen, wie das Energiespektrum dieser Teilchen aussieht und wie hoch der relative Anteil verschiedener Arten von Neutrinos ist, die aus dem Weltraum zu uns kommen“, sagt Ackermann. „Dies gibt uns Hinweise auf ihren Ursprung und die physikalischen Prozesse, welche die Neutrinos im Universum erzeugen“, ergänzt DESY-Forscher Lars Mohrmann, der die Kombination der Datensätze bearbeitet hat.

IceCube registriert jährlich rund hunderttausend Neutrinos. Die meisten davon entstehen jedoch in der Erdatmosphäre durch die Wechselwirkung mit der Kosmischen Strahlung. Milliarden sogenannter atmosphärischer Myonen, die bei denselben Wechselwirkungen entstehen, hinterlassen ebenfalls ihre Spuren in dem Detektor. In all diesen Spuren suchen Forscher nach einigen Dutzend astrophysikalischen Neutrinos. Eine bewährte Strategie von Neutrino-Teleskopen dabei: Man schaut auf das Universum durch die Erde hindurch, hierbei filtert unser Planet die umfangreiche Hintergrundstrahlung der atmosphärischen Myonen heraus.

Bei den höchsten gemessenen Energien, oberhalb von etwa 100 Teraelektronenvolt, kann die beobachtete Zahl der Teilchen nicht mehr ausschließlich mit Neutrinos erklärt werden, die in der Erdatmosphäre entstanden sind, sondern weist auf eine astrophysikalische Herkunft hin.



Nachwuchsgruppenleiterin Anna Franckowiak aus der IceCube-Gruppe bei DESY.

Die Herkunftsrichtung der schnellen Teilchen lässt sich mit IceCube sogar auf wenige Grad genau identifizieren. Allerdings ließ sich unter den bislang registrierten kosmischen Neutrinos noch keine Anhäufung aus einer bestimmten Richtung feststellen, die auf eine bestimmte astrophysikalische Quelle hindeuten würde. Der durch IceCube gemessene Neutrinofluss der nördlichen Hemisphäre hat dabei die gleiche Intensität wie der astrophysikalische Fluss der südlichen Hemisphäre. Dies deutet auf die Existenz zahlreicher extragalaktischer Quellen hin, da sonst die Quellen in der Milchstraße den Fluss um die galaktische Ebene dominieren würden.

## „Die Entdeckung astrophysikalischer Neutrinos deutet auf den Beginn einer neuen Ära der Astronomie hin“

Olga Botner, Universität Uppsala

Mit der Frage nach der Herkunft der kosmischen Neutrinos beschäftigt sich Franckowiaks Nachwuchsgruppe mit Hilfe sogenannter Multi-Messenger-Beobachtungen. Dafür werden die Neutrinodaten mit Beobachtungen von optischen und Gammastrahlungsobservatorien kombiniert, um nach Neutrino-Emissionen möglicher Quellen wie zum Beispiel Supernova-Explosionen zu suchen. Eine wichtige Rolle für die optischen Beobachtungen wird dabei die Zwicky Transient Facility (ZTF) spielen, ein neues Weitwinkelteleskop, das sich gerade mit Beteiligung von DESY im Aufbau befindet und 2017 erste Daten nehmen soll. „Die Entdeckung der ersten Neutrinoquellen würde ein neues Fenster zum hochenergetischen Universum öffnen“, sagt Franckowiak.

Auf diese Weise sollen Neutrino-Observatorien wie IceCube der Astronomie ein ganz neues Botenteilchen zur Beobachtung des Universums erschließen. „Die Gamma- und die Neutrinoastronomie haben einen zeitlichen Versatz. Mit der Neutrinoastronomie machen wir in Zukunft hoffentlich das, was wir mit der Gammaastronomie heute machen“, sagt Stegmann. „Auf beiden Wegen erwarten wir spannende Einblicke in die natürlichen Teilchenbeschleuniger des Universums, die neues Licht in die verbliebenen Rätsel der Kosmischen Strahlung bringen werden.“

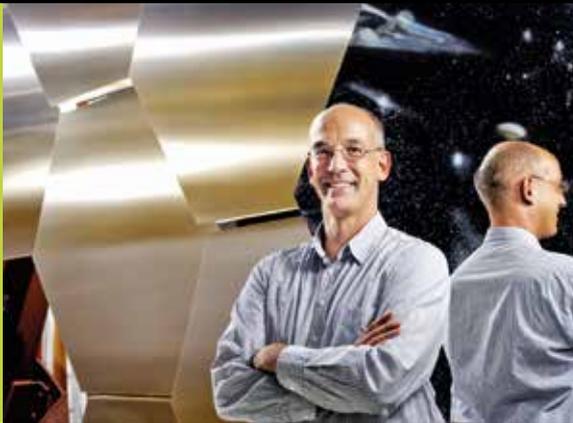


Für den IceCube-Detektor wurden über 5000 empfindliche sogenannte Photomultiplier bis zu 2,5 Kilometer tief im ewigen Eis versenkt.

# „Völlig neue Einblicke in unser Universum“

Christian Stegmann über das CTA-Observatorium

Der Astroteilchenphysiker Christian Stegmann leitet den DESY-Standort in Zeuthen.



Das CTA-Observatorium wird in klaren Nächten das Cherenkov-Licht auffangen, das entsteht, wenn energiereiche Gammastrahlung auf die irdische Atmosphäre trifft. Es wird aus etwa 100 Cherenkov-Teleskopen auf der Südhalbkugel und etwa 20 auf der Nordhalbkugel der Erde bestehen, um den gesamten Nachthimmel beobachten zu können. Als südlicher Standort wurde der Andengipfel Paranal in Chile ausgewählt, als Standort der nördlichen Hemisphäre die spanische Kanareninsel La Palma.

DESY stellt die größte Gruppe innerhalb des internationalen Projekts und ist unter anderem für Design und Bau der mittelgroßen Teleskope mit einem Spiegeldurchmesser von rund zwölf Metern verantwortlich. Insgesamt kommen drei unterschiedlich große Typen von Teleskopen zum Einsatz. Außerdem wird das wissenschaftliche CTA-Zentrum bei DESY in Zeuthen angesiedelt, das damit zu einem wichtigen Drehkreuz für die Gammaastronomie wird, wie der

Leiter des DESY-Standorts in Zeuthen, Christian Stegmann, betont.

**femto:** Was sind die nächsten Schritte für CTA?

**Christian Stegmann:** Nächste Schritte gibt es auf vielen Ebenen gleichzeitig. Auf der einen Seite sind jetzt die internationalen Geldgeber am Zuge. Sie werden eine verlässliche Vereinbarung für die Finanzierung des Observatoriums unterschreiben – Deutschland hat hier gemeinsam mit Italien eine Führungsrolle übernommen, wobei aber auch die Rolle weiterer Partnerländer, wie beispielsweise Spanien, Japan, Frankreich, Schweiz, nicht unterschätzt werden darf. Vor allem aber wird in den nächsten Monaten am Standort des CTA-Hauptquartiers in Bologna ein leistungsfähiges Projektbüro aufgebaut, das den Bau des gesamten Observatoriums organisiert. Hier werden die vielen Beiträge der Partnergruppen koordiniert – von gan-

zen Teleskopen bis hin zu zentralen Infrastrukturen wie Rechenzentren. Hier bei uns in Zeuthen laufen die Vorbereitungen für den Bau der Komponenten, die wir zu CTA beitragen wollen, bereits auf vollen Touren. Das sind insbesondere die mittleren Teleskope sowie Computing und Software. Das alles wird in den nächsten Monaten auch unter großem Einsatz von DESY-Mitarbeitern auf den Weg gebracht. Anschließend werden wir in Zeuthen gemeinsam mit CTA mit dem Aufbau des Science Management Centers beginnen.

**femto:** Warum erwarten Sie, so viel mehr Details am Gammahimmel mit CTA zu sehen?

**Christian Stegmann:** Wir erwarten nichts weniger als eine Revolution unseres Bilds vom Kosmos bei sehr hohen Energien. Die vergangenen Jahre haben gezeigt, dass hochenergetische Strahlung in unserem Universum eine viel größere Rolle spielt als bisher vermutet. Es ist aber offensichtlich, dass wir mit den bestehenden Geräten nur einen Bruchteil des vollständigen Bildes sehen können. So haben die laufenden Experimente gerade mal ein Viertel unserer Milchstraße auf der Suche nach Gammastrahlungsquellen durchsucht – wir kennen nur die Spitze des Eisberges. Außerdem ist die Schärfe der Bilder bisher nicht gut genug, um zweifelsfrei Schlüsse auf die zugrundeliegenden

Beschleunigungsmechanismen zu ziehen. Mit CTA werden wir nicht nur jeden in Gammastrahlung leuchtenden Supernova-Überrest – die wahrscheinlichen Quellen der Kosmischen Strahlung in unserer Milchstraße – entdecken können, wir werden auch in der Lage sein, die Quellen im Detail zu untersuchen. So können wir verstehen, welche Prozesse für die Erzeugung von Gammastrahlung verantwortlich sind. CTA wird mit hoher Empfindlichkeit und Messgenauigkeit einen völlig neuen Einblick in unser Universum ermöglichen. Und ich bin fest davon überzeugt, dass wir mit CTA auch vollkommen überraschende Dinge entdecken werden.

**„Wir erwarten nichts weniger als eine Revolution unseres Bilds vom Kosmos bei sehr hohen Energien.“**

**femto:** Was bedeutet CTA für den DESY-Standort in Zeuthen?

**Christian Stegmann:** CTA ist für den Standort in Zeuthen eine riesige Chance, auch in Zukunft als Forschungszentrum in der Metropolregion Berlin-Brandenburg, in Deutschland und international eine führende Rolle zu spielen. Die Ansiedlung des Science Management Centers von CTA markiert einen Meilenstein auf dem Weg des Standorts hin zu einem internationalen Zentrum für Astroteilchenphysik. Gemeinsam mit unseren Partnern in der Region, der Universität Potsdam, der Humboldt-Universität zu Berlin, dem Astrophysikalischen Institut Potsdam und dem Albert-Einstein-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, sind wir auf dem Weg, zu einer der führenden Regionen für Astronomie, Astrophysik und Astroteilchenphysik zu werden.

Wir leben in einer Zeit, in der bahnbrechende Entdeckungen in der Astronomie unser Bild vom Universum auf den Kopf stellen. Die Entdeckung von Gravitationswellen unter Beteiligung des Albert-Einstein-Instituts oder die Entdeckung von hochenergetischen kosmischen Neutrinos mit IceCube unter Beteiligung der IceCube-Gruppe von DESY in Zeuthen sind nur zwei Beispiele dafür. Der Standort in Zeuthen wird durch den Bau eines so leistungsfähigen Observatoriums wie CTA und die Ansiedlung der wissenschaftlichen Koordination von CTA ein Anlaufpunkt für Wissenschaftler aus aller Welt sein.

**femto:** Welche wissenschaftlichen Schwerpunkte verfolgt der Standort in Zeuthen?

**Christian Stegmann:** Der Standort in Zeuthen wird seit einigen Jahren konsequent zu einem Zentrum für Astroteilchenphysik ausgebaut. Wir fokussieren uns dabei auf die Erforschung des Universums bei hohen Energien mit Gammastrahlung und Neutrinos. Beide Botenteilchen, sowohl Gammastrahlungsphotonen als auch Neutrinos, sind elektrisch neutral und zeigen daher direkt auf ihren Entstehungsort zurück – wir können mit diesen Botschaftern Astronomie machen und direkt etwas über die hochenergetischen Prozesse an ihren Wirkungsstätten lernen. Durch den gleichzeitigen Aufbau einer Forschungsgruppe im Bereich der theoretischen Astroteilchenphysik in Zeuthen verbinden wir direkt Ergebnisse aus Experiment und Theorie. Wir bieten so ein rundes und vollständiges Forschungsprofil und schaffen dadurch ein international attraktives Forschungszentrum.

**femto:** Welche Chancen bieten sich für junge Nachwuchsforscher?

**Christian Stegmann:** Der DESY-Standort in Zeuthen ist ein besonderes Sprungbrett für junge Menschen,



Bild: H.E.S.S. Collaboration

Die Facettenspiegel eines Cherenkov-Teleskops des High Energy Stereoscopic Systems (H.E.S.S.) in Namibia

die im Bereich der Astroteilchenphysik arbeiten wollen. Zeuthen ist gerade vor kurzem von zwei jungen Wissenschaftlerinnen als Sitz für ihre Nachwuchsgruppen ausgewählt worden. Beide wollen hier die Suche nach den Quellen hochenergetischer kosmischer Neutrinos beziehungsweise nach Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik mit CTA mit einer eigenen Gruppe durchführen. Wir erleben in den letzten Jahren, dass der Standort in Zeuthen eine immer größere Attraktivität besonders für junge Wissenschaftler aus aller Welt hat, die im Bereich der Astroteilchenphysik forschen. Sicherlich spielt dabei auch die Lage in der Nähe von Berlin eine Rolle. Aber vor allem entwickelt sich am Standort in Zeuthen ein wissenschaftliches Umfeld, das eine besondere Atmosphäre für junge Wissenschaftler bietet.

# Verschleiß von Plastiksolarzellen

**E**in Forscherteam um Peter Müller-Buschbaum von der Technischen Universität München hat den Verschleiß von Plastiksolarzellen mit DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III beobachtet. Die Untersuchung liefert einen Ansatz für eine verbesserte Herstellung, um die Langzeitstabilität solcher organischen Solarzellen zu erhöhen.

Anders als bei konventionellen Solarzellen aus Silizium wird der Strom in organischen Solarzellen in einer aktiven Mischschicht aus zwei kohlenstoffbasierten Materialien

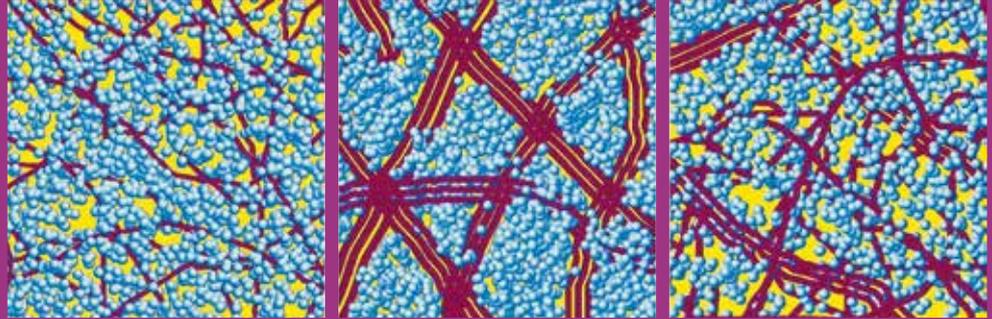


Bild: Christoph Schaffer, TU München

Die innere Struktur der aktiven Schicht der untersuchten Solarzelle ohne Lösungsmittel (links), mit Lösungsmittel (Mitte) und nach Lösungsmittelverlust im Betrieb (rechts)

erzeugt. Ist eines davon ein Polymer, spricht man oft von Plastiksolarzellen. Diese sind besonders vielversprechend, weil ihre Herstellung sehr kostengünstig und einfach ist. Organische Solarzellen sind in der Regel allerdings weniger effizient und haben bisweilen eine kürzere Lebensdauer als siliziumbasierte.

Mit PETRA III haben die Forscher den Verschleiß sogenannter Low-bandgap-Plastiksolarzellen untersucht, die besonders viel Licht absorbieren. Sie benötigen oft während der Herstellung einen Lösungsmittelzusatz, um hohe

Wirkungsgrade zu erreichen. Doch Strukturveränderungen durch Lösungsmittelverlust im Betrieb führen zu einem Effizienzverlust der Solarzelle, wie die Forscher herausfanden. „Es ist daher unabdingbar, nach Strategien zur Verfestigung der Struktur zu suchen. Dies könnte etwa durch chemische Vernetzung der Polymerketten oder durch maßgeschneiderte Verkapselungsmaterialien bewerkstelligt werden“, erläutert Müller-Buschbaum.

*Advanced Energy Materials*, 2016;  
DOI: 10.1002/aenm.201600712

# Pendelverkehr in der Zelle

**B**akterielle Infektionserreger haben ausgefeilte Mechanismen entwickelt, um das Immunsystem des Menschen so zu entwaffnen, dass sie sich weitgehend ungehindert im Körper ausbreiten können. Wichtige Mechanismen einer solchen bakteriellen Infektionsstrategie hat ein Forscherteam des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf, der Universität Hamburg und des Europäischen Molekularbiologie-Laboratoriums (EMBL) entschlüsselt. Die Forscher untersuchten dazu Yersinien, zu denen auch der Erreger der Beulenpest *Yersinia pestis* gehört. Diese Bakterien verfügen über eine besonders wirksame Infektionsstra-

Die Struktur des YopM/DDX3-Komplexes haben die Forscher mittels Röntgenkleinwinkelbeugung und Kristallographie bestimmt.

ategie: Ihnen gelingt es, eines ihrer eigenen Proteine in den Zellkern einzuschleusen. Dort kann das YopM genannte Protein direkt die Expression von Genen stimulieren, die das Immunsystem abschalten, und somit immunsuppressiv wirken.

Das Forscherteam hat ein Protein entdeckt, das YopM aus dem Zellkern transportiert, und konnte dann zeigen, dass der so ermöglichte Pendelverkehr die Menge von YopM im Zellkern exakt einstellt. Martin Aepfelbacher vom Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf erläutert: „Der identifizierte Kernexportmechanismus kontrolliert die Wirkung von YopM und somit den Erfolg der Bakterien, eine Infektion aus-

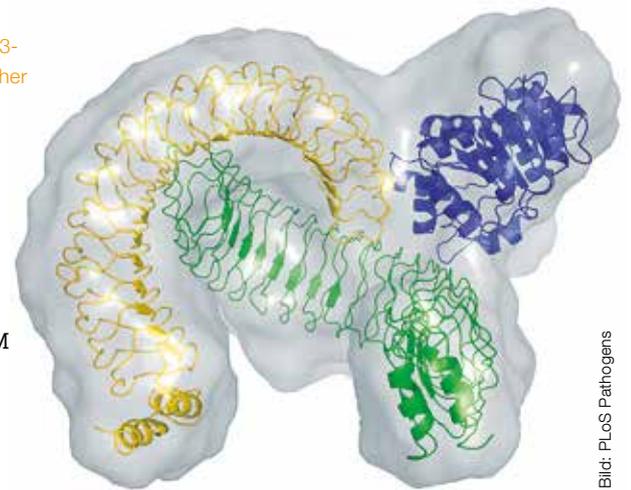


Bild: PLoS Pathogens

zulösen.“ Mit Hilfe spezieller Röntgenmethoden an DESYs Lichtquelle PETRA III gelang es den Forschern, die dreidimensionale Struktur der beteiligten Proteine aufzuklären – grundlegendes Wissen für die Entwicklung neuer Wirkstoffe für die Behandlung von Yersinieninfektionen.

*PLoS Pathogens*, 2016; DOI: 10.1371/journal.ppat.1005660

Kristallstruktur von Eisen-Bridgmanit mit der Eisen-Phase (gelb) und der Silizium-Sauerstoff-Phase (blau)

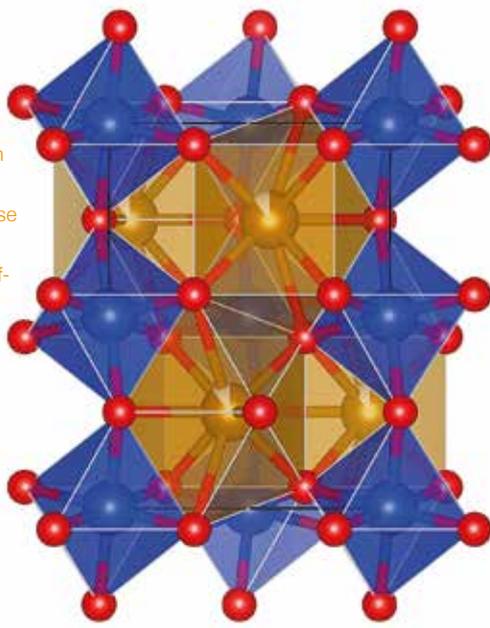


Bild: Leyla Ismailova, Universität Bayreuth

## Röntgenblick in den unteren Erdmantel

Forscher durchleuchten bei DESY das häufigste Mineral der Erde

**M**it DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III haben Forscher ein überraschendes Verhalten des häufigsten Minerals der Erde beobachtet. Das Mineral Bridgmanit nimmt fast ein Drittel des Volumens der Erde ein und ist die Hauptkomponente des unteren Erdmantels. Daher sind seine physikalischen Eigenschaften ein wichtiger Faktor für die Dynamik unseres Planeten und haben damit direkten Einfluss auf das Leben an der Oberfläche – etwa über die Ausbreitung tiefer Erdbeben oder über geochemische Zyklen, durch die Mineralienvorkommen entstehen. Bridgmanit ist allerdings nicht leicht unter seinen „Normalbedingungen“ zu untersuchen, da im Erdmantel hoher Druck und extreme Temperaturen herrschen. Seine physikalischen Eigenschaften werden daher innerhalb der Wissenschaft kontrovers diskutiert.

Die neue Studie zeigt, dass Bridgmanit unter einem Druck von 45 Gigapascal eine bislang unbekannte eisenhaltige Variante formen kann. Diese erstmals im Labor synthetisierte Variante kann im gesamten unteren Erdmantel existieren. Die Beobachtung hat große Bedeutung für die Eigenschaften unseres Planeten sowie sein Verhalten tief unterhalb der Oberfläche, berichtet das Forscherteam unter Leitung von Leonid Dubrovinsky von der Universität Bayreuth im Fachjournal *Science Advances*. Die Wissenschaftler haben außerdem beobachtet, dass sich innerhalb des Kristallgitters von Bridgmanit unerwartet viele Defekte auch unter hohem Druck finden lassen, die Einfluss auf die Eigenschaften des Materials haben.

*Science Advances*, 2016; DOI: 10.1126/sciadv.1600427

## Neue Forschungshallen an Röntgenlichtquelle PETRA III

**Z**wei neue Experimentierhallen erweitern die Forschungsmöglichkeiten an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III. Namensgeber für die Hallen sind die israelische Nobelpreisträgerin Ada Yonath, die wichtige Arbeiten zur Strukturforschung an Ribosomen, den „Eiweißfabriken“ lebender Zellen, bei DESY durchgeführt hat, und einer der Pioniere der Röntgenstrukturforschung, Paul P. Ewald.

Die beiden neuen Experimentierhallen werden mit ihren hochspezialisierten Experimentierstationen Wissenschaftlern aus aller Welt exzellente Bedingungen bieten, um Materialien und Strukturen mit atomarer Auflösung zu erforschen und für künftige Anwendungen zu optimieren. Drei der Strahlführungen in der neuen PETRA III-Halle „Ada Yonath“ wurden in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern aus den Ländern Indien, Schweden und Russland gebaut.

„Hamburg schätzt sich glücklich, den hohen Erwartungen an unseren Forschungsstandort mit den zwei neuen Experimentierhallen gerecht werden zu können“, betonte Hamburgs Erster Bürgermeister Olaf Scholz anlässlich der Feierlichkeiten. „Die Wissenschaft braucht ein geeintes Europa. Nur fest eingebunden in die europäische Gemeinschaft konnte Hamburg sich zu einem bedeutenden internationalen Zentrum für Wissenschaft und Innovation entwickeln. Insbesondere die Erfolgsgeschichte des Forschungscampus in Bahrenfeld, die wir heute fortschreiben, ist ohne diesen Aspekt nicht denkbar.“



Bild: DESY, Gesine Born

# Flexible Geruchsstoffe

**D**er Geruchssinn gibt bis heute Rätsel auf. Klar ist: Die Funktion eines bestimmten Biomoleküls ist unmittelbar davon abhängig, wie dieses Molekül in den jeweiligen biologischen Rezeptor „hineinpasst“ – so wie ein Schlüssel, der nur ein bestimmtes Türschloss schließt. Um genaueren Aufschluss über diese Mechanismen zu erhalten, haben Forscher des Max-Planck-Instituts für Struktur und Dynamik der Materie am Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) und des Hamburg Centre for Ultrafast Imaging (CUI) unter der Leitung von Melanie Schnell ein duftendes Biomolekül entschlüsselt: Citronellal ist ein vielseitiger biochemischer Ausgangsstoff, der in vielen ätherischen Ölen natürlich auftritt.

Anhand einer hochaufgelösten rotationsspektroskopischen Untersuchung fanden die Forscher heraus, dass dieses Molekül eine beachtliche Zahl von Formen, sogenannte Konformationen, annehmen kann, allein durch Rotationen um fünf verschiedene Kohlenstoff-Kohlenstoff-Einfachbindungen. Diese miteinander abgestimmten Rotationen führen zu einer überraschend großen Zahl stabiler Formen des Moleküls. „Die außergewöhnliche Fähigkeit dieses Duftmoleküls, seine Form zu verändern, erlaubt besondere Einblicke in die Beziehung zwischen Struktur und Funktion eines Biomoleküls. Wir haben nicht nur fünfzehn Schlüssel gefunden, sondern haben nun auch ein besseres Verständnis, welche von ihnen besser in das Schloss passen könnten“, erläutert Gruppenleiterin Melanie Schnell.

Struktur der stabilsten, kugelähnlichen Form von Citronellal

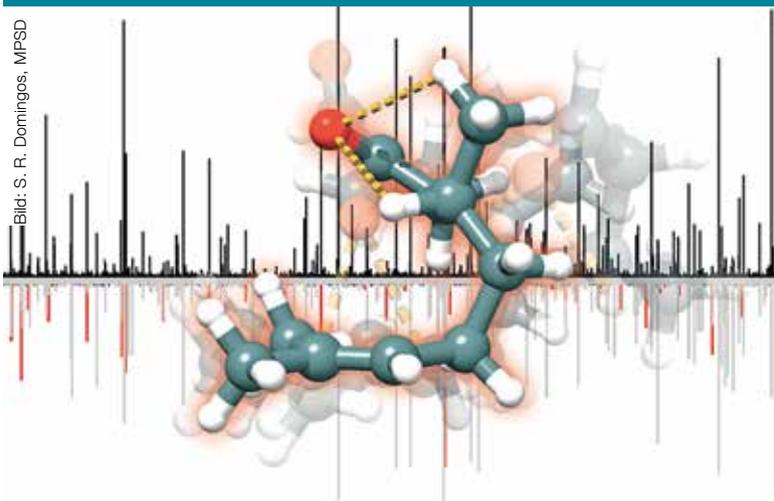


Bild: S. R. Domingos, MPD

Explodierender Xenon-Cluster mit freigesetzten Elektronen (blau)

## Explodierende Xenon-Nanopartikel

**M**it DESYs Röntgenlaser FLASH haben Forscher um Daniela Rupp von der Technischen Universität Berlin die ultraschnelle lichtgetriebene Explosion von Nanopartikeln aus Xenon beobachtet. Die Untersuchung dieser sogenannten Xenon-Cluster liefert neue Einblicke in die fundamentale Wechselwirkung von intensivem Licht mit Materie.

Die Forscher beschossen etwa 400 Nanometer (millionstel Millimeter) kleine Xenon-Nanopartikel mit den ultrakurzen, intensiven FLASH-Laserblitzen, die für einige milliardstel Sekunden eine Intensität von bis zu 500 Billionen Watt pro Quadratcentimeter erreichten. Zum Vergleich: Sonnenlicht hat auf dem Erdboden eine Intensität von etwa 0,1 Watt pro Quadratcentimeter. Der helle Strahlungsblitz entriss den Xenon-Atomen im Cluster zahlreiche Elektronen, so dass sich ein Plasma bildete – ein heißes Gas aus elektrisch geladenen Atomen, sogenannten Ionen, und darum herum flitzenden Elektronen.

Die Physiker konnten in ihrer Versuchsanordnung die Entwicklung individueller Xenon-Cluster verfolgen und deren Größe sowie die genaue Energie bestimmen, mit der sie getroffen wurden. Unter anderem identifizierten die Wissenschaftler eine bislang nicht beachtete Heizung in dem Plasma: „Jedes Mal, wenn sich ein Elektron wieder mit einem Xenon-Atom verbindet, gibt es Energie an das umgebende Plasma ab“, erläutert Rupp. „Dadurch bekommen am Ende solche Xenon-Ionen, die nicht mit Elektronen rekombinieren, prozentual mehr Energie – die Elektronen heizen diese Ionen quasi auf.“

*Physical Review Letters*, 2016; DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.153401

Elektronenmikroskop-Aufnahme  
eines kolloidalen Kristalls aus  
Polystyrol-Kügelchen

Bild: Sören Jalias, Universität Hamburg

femtomenal

## 2000 Kilometer Kabel und 20 Tonnen Niob

## Photonische Kristalle in 3D

**E**ine bei DESY entwickelte neue Methode zeigt die individuelle innere Struktur sogenannter photonischer Kristalle und verwandter Materialien in 3D. Die Technik liefert die genauen Positionen der einzelnen Bausteine eines solchen Kristalls, ohne dass dafür Annahmen über die erwartete Struktur gemacht oder Strukturmodelle aufgestellt werden müssen. Ein Team um DESY-Forscher Ivan Vartaniants stellt die Entwicklung im Fachblatt *Physical Review Letters* vor. Photonische Kristalle finden breite Anwendung in der Informationstechnologie, Chemie und Physik.

Photonische Kristalle sind regelmäßige Anordnungen von 200 bis 400 Nanometer (millionstel Millimeter) kleinen Partikeln. Die innere Struktur dieser Kristalle ist damit größer als diejenige klassischer Kristalle und bewegt sich in der Größenordnung der Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Damit eignen sich diese Strukturen gut, um optische Photonen zu leiten und zu manipulieren – daher der Name photonische Kristalle.

Die Wissenschaftler nutzten die extrem brillante Röntgenstrahlung von DESYs Forschungslichtquelle PETRA III, um die innere Struktur künstlicher photonischer Kristalle zu analysieren. „Unsere Methode eröffnet neue Wege, um die innere, dreidimensionale Struktur mesoskopischer Materialien wie photonischer Kristalle mit kohärentem Röntgenlicht zu visualisieren“, unterstreicht Vartaniants.

*Physical Review Letters*, 2016; DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.138002

**I**m Oktober wurden die letzten Schrauben festgezogen: Der weltgrößte Röntgenlaser European XFEL wird nun schrittweise in Betrieb genommen. Ein gigantisches Bauvorhaben findet seinen Abschluss – allein der Tiefbau dauerte 2183 Tage. Insgesamt mussten 543 348 Kubikmeter Boden abgetragen oder ausgehoben werden. In der gesamten Röntgenlaseranlage stecken 180 474 Kubikmeter Beton und 30 392 Tonnen Betonstahl.

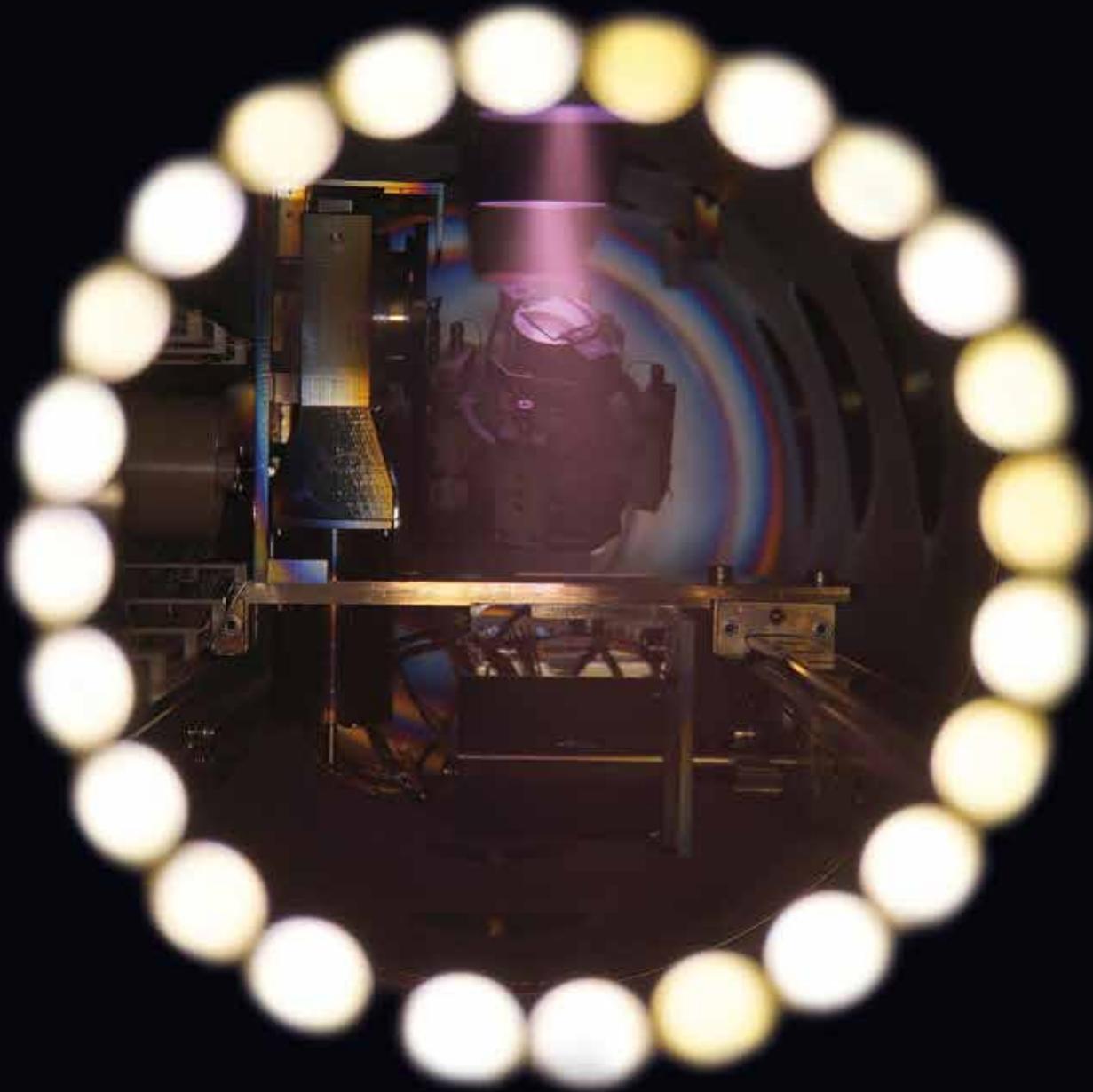
Gigantische Dimensionen, die ihre Fortsetzung in der Installation der hochkomplexen Beschleunigertechnik fanden. Der 1,7 Kilometer lange Linearbeschleuniger besteht aus 96 Modulen, die 768 Beschleunigungselemente aus Niob enthalten. Insgesamt 20 Tonnen dieses seltenen supraleitenden Metalls stecken im European XFEL – das ist die weltweit höchste Konzentration von hochreinem Niob überhaupt. Außerdem enthält der Beschleunigertunnel mehr als 2000 Kilometer Kabel, 800 Magnete und etwa 20 000 Vakuumflansche, die mit 160 000 Schrauben verschraubt sind.

Die Inbetriebnahme der hochkomplexen Röntgenlaseranlage wird mehrere Monate in Anspruch nehmen. Der gesamte supraleitende Beschleuniger wird mit Hilfe von 4,5 Tonnen Helium auf seine Betriebstemperatur von minus 271 Grad Celsius abgekühlt. Anschließend werden Schritt für Schritt die Komponenten der Anlage eingeschaltet, justiert und kalibriert.



Bild: Heiner Müller-Elsner, European XFEL

# Magnetsensoren nach Maß



Blick in die eigens konstruierte Vakuumanlage zur Herstellung der Sensorschichtsysteme. Das spiegelartige Schichtsubstrat befindet sich auf einer Drehhalterung zur Einstellung der Beschichtungswinkel und wird für definierte Zeitintervalle unter verschiedene Beschichtungsquellen gefahren.

**D**ESY-Forscher haben die Grundlage für eine neue Generation von Magnetosensoren entdeckt. Die Entwicklung der Wissenschaftler ermöglicht es, die bei der herkömmlichen Produktionsweise limitierten Funktionen stark zu erweitern und somit Sensoren individuell für eine Vielzahl von neuen Anwendungen maßzuschneidern.

Magnetosensoren – oder genauer Magnetowiderstandssensoren – sind winzige, hochempfindliche und leistungsstarke Begleiter unseres täglichen Lebens. Sie messen im Auto die Rotationsgeschwindigkeit der Räder für das Bremssystem ABS und die elektronische Stabilitätskontrolle ESP, stecken in jedem Handy, lesen Daten in Festplatten und dienen der Sicherheit durch das Aufspüren von Mikrorissen in Metallbauteilen. Diese Vielfalt an Einsatzgebieten erfordert jeweils eine entsprechend individuelle Funktion.

Die Sensoren bestehen aus mikrostrukturierten Stapeln von abwechselnd magnetischen und nichtmagnetischen Schichten, die jeweils nur wenige Nanometer dünn sind. Unter dem Einfluss eines äußeren Magnetfeldes ändert sich der elektrische Widerstand dieser Schichtstapel. Obwohl der Riesenmagnetowiderstandseffekt (giant magneto-resistance, GMR), für dessen Entdeckung Albert Fert und Peter Grünberg im Jahr 2007 den Nobelpreis für Physik erhielten, die Sensorik revolutioniert hat, bleibt ein Problem: Die Magnetfeldstärke, bei der der Widerstand schaltet, ist im Wesentlichen vorgegeben.

### Kontrollierte Eigenschaften

DESY-Forscher haben nun ein Herstellungsverfahren entwickelt, das es erstmalig ermöglicht, gezielt Kontrolle über die Magnetowiderstandseigenschaften in den Sensorschichtsystemen zu erlangen. Mit diesem Verfahren kann in jeder magnetischen Einzelschicht der winzigen Schichtstapel die Feldstärke

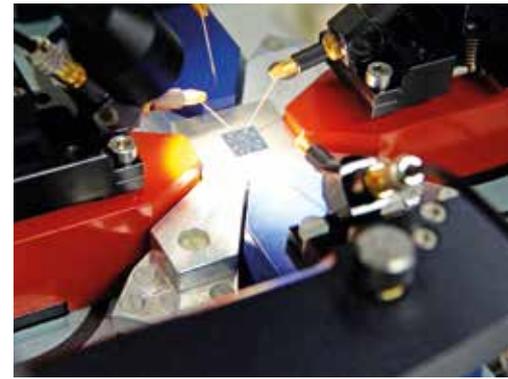
des Schaltens flexibel und präzise eingestellt werden. Darüber hinaus können magnetische Vorzugsrichtungen von einzelnen Schichten beliebig zueinander orientiert werden. Somit kann auf einfache Weise eine Fülle von neuen Sensoreigenschaften realisiert werden. „Bisher war es häufig so, dass die Anwendung auf den Sensor angepasst werden musste, mit unserer Technik können wir den Sensor für die gewünschte Anwendung maßschneidern“, erklärt DESY-Forscher Kai Schlage.

„Mit unserer Technik können wir den Sensor für die gewünschte Anwendung maßschneidern“

*Kai Schlage, DESY*

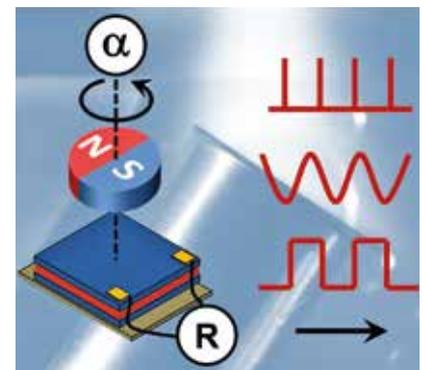
Grundlage der verbesserten Sensortechnologie ist die Beschichtung im schrägen Einfall (engl. Oblique Incidence Deposition, OID). Das für Einzelschichten bereits bekannte OID-Verfahren erlaubt es, beliebige magnetische Materialien auf beliebigen Substraten magnetisch in Form zu bringen. So kann man über die präzise Variation des Beschichtungswinkels in einfacher Weise entscheiden, ob eine magnetische Schicht bei einem äußeren Magnetfeld von 0,5 Millitesla oder erst bei der hundertfachen Magnetfeldstärke schalten soll. Zum Vergleich: Dies entspricht in etwa dem Unterschied zwischen dem 10- bzw. 1000-fachen des Erdmagnetfelds.

Die DESY-Forscher haben herausgefunden, dass dieses Verfahren nicht nur bei Einzelschichten, sondern auch in ausgezeichneter Weise bei einer großen Anzahl von Vielschichtsystemen zur Anwendung kommen kann, und damit die Möglichkeiten des konventionellen Designs und der Funktion magnetischer Schichtstapel deutlich



Apparatur zur Charakterisierung der Messeigenschaften der mikrostrukturierten Sensorschichtsysteme. Die Spezialapparatur ermöglicht es, ein magnetisches Drehfeld definierter Stärke zu erzeugen und über die Messspitzen die Widerstandsänderung in den winzigen Schichtstapeln zu detektieren.

erweitert. Die Herstellung ihrer Vielschichtsysteme führten die Forscher in hierfür eigens entwickelten Vakuumanlagen durch. An DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III konnten die Physiker die magnetischen Eigenschaften jeder Einzelschicht in solchen Schichtstapeln exakt vermessen und so nachweisen, dass mittels OID-Beschichtung beliebig komplexe und vor allem neue Magnetisierungsstrukturen mit höchster Genauigkeit in ausgedehnte Schichtstapel eingepreßt werden können. >>



Die Beschichtungstechnologie im schrägen Einfall ermöglicht es, Messeigenschaften von Magnetosensoren erstmalig präzise einzustellen und vollkommen neue Funktionalitäten zu verwirklichen. Die Abbildung zeigt einen Dünnschichtdrehfeldsensor und eine Auswahl von Messsignalen, wie sie mittels des neuen Verfahrens realisiert werden können.

### Patente Lösung

Für die Magnetosensoren bedeutet dies, dass in mikrostrukturierten Schichtstapeln mit identischer Materialkombination und Dicke unterschiedlichste und vor allem neue Sensorcharakteristiken in einfacher Weise realisiert werden können.

„Das von uns entwickelte Verfahren erlaubt es, magnetische Sensoren herzustellen, deren Signale wesentlich präziser sind, mehr Informationen enthalten und sich zudem wesentlich leichter verar-

beiten lassen als die Signale von herkömmlichen Sensoren“, erklärt der Leiter der Arbeitsgruppe, Ralf Röhlsberger. „Damit lassen sich beispielsweise Rotationsbewegungen erheblich genauer überwachen als dies bisher möglich war, wodurch die Sicherheit von Motoren, Antriebsaggregaten und Triebwerksteuerungen, insbesondere unter extremen Betriebsbedingungen, wesentlich verbessert werden kann.“

Die Gruppe hat das Verfahren bereits zum Patent angemeldet und will in einer Kooperation mit Indus-

trieunternehmen seine Verwertbarkeit unter Beweis stellen. Dazu wird eine neue Anlage errichtet und der Einsatz der Sensoren im industriellen Umfeld getestet. In den kommenden beiden Jahren wird dieses Projekt vom Helmholtz-Validierungsfonds (HFV) gefördert, der besonders vielversprechende Vorhaben dabei unterstützt, Erkenntnisse aus der Forschung in die Anwendung zu bringen.

*Advanced Functional Materials*, 2016;  
DOI: 10.1002/adfm.201603191

femtopolis

## Institut X

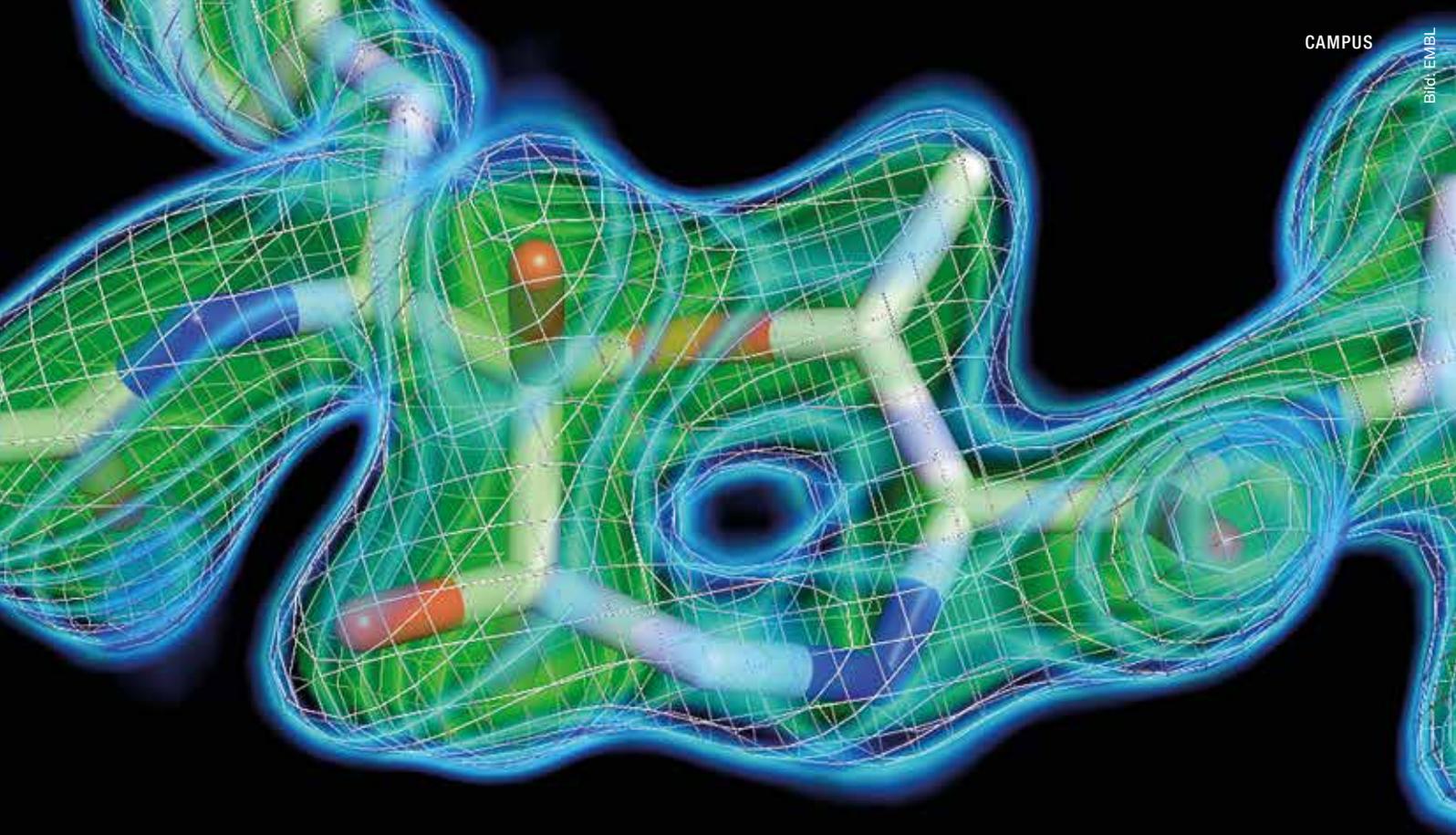
**D**er DESY-Standort in Zeuthen blickt auf eine überaus bewegte Geschichte zurück. Seine Wurzeln reichen bis ins Jahr 1939, als das Reichspostministerium in Zeuthen ein kernphysikalisches Labor einrichtete – das Amt für physikalische Sonderfragen. Ein Jahr zuvor hatte Otto Hahn die Kernspaltung entdeckt. In Zeuthen wollte man unter anderem herausfinden, inwieweit sich die „Atomzertrümmerung“ als neue Energiequelle eignen könnte, aber auch für die Herstellung von Bomben mit ungeheurer Sprengkraft. Besonders weit kam die Reichspost jedoch nicht. Im Mai 1945 besetzten sowjetische Truppen das Institut und demontierten die technischen Einrichtungen. Um 1950 begann sich die gerade

gegründete DDR für die Kernphysik zu interessieren und gründete auf dem Zeuthener Gelände das Institut Miersdorf. In internen Dokumenten wurde es auch als Institut X bezeichnet – wobei das „X“ auch für Kernphysik stand, ein damals für Deutschland noch unerlaubtes Forschungsgebiet. Die Mission des neuen Instituts: Die Forscher sollten die Grundlagen für Kernkraftwerke schaffen. Doch 1957 ging in Rossendorf bei Dresden der erste Forschungsreaktor der DDR in Betrieb. Damit hatte sich der Schwerpunkt der ostdeutschen Kernforschung verschoben, und die Physiker in Zeuthen wandten sich der Teilchenphysik zuerst unter dem Namen Forschungsstelle für Physik hoher Energien zu, ab 1968 dann als Institut für Hochenergiephysik IfH. Da die DDR keinen eigenen Großbeschleuniger besaß, arbeiteten die Zeuthener am Vereinigten Institut für Kernforschung, dem osteuropäischen Beschleunigerzentrum im russischen Dubna mit, waren aber auch regelmäßig im Westen an Versuchen am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN in Genf beteiligt. Ab 1986 konnte das IfH offiziell bei H1 mitmachen, einem der beiden großen Teilchendetektoren, die gerade für den HERA-Speicherring bei DESY gebaut wurden. Dann, im November



Rückblende 1974: Vermessung von Aufnahmen aus Blasenkammer-Experimenten im damaligen Institut für Hochenergiephysik IfH

1989, fiel die Mauer. Jetzt sollte sich rentieren, dass es den Zeuthener Physikern gelungen war, trotz zum Teil widriger Bedingungen den Kontakt zu westlichen Teilchenphysikzentren aufrechtzuerhalten und in internationalen Spitzenprojekten mitzuarbeiten. Als 1990 unabhängige Experten die wissenschaftliche Qualität des Instituts begutachteten, kamen sie zu einer überaus positiven Beurteilung und empfahlen, es dauerhaft zu erhalten. Vor 25 Jahren, am 11. November 1991, wurde ein Staatsvertrag zwischen der Bundesrepublik Deutschland und den Ländern Brandenburg und Hamburg unterzeichnet, der das IfH Zeuthen mit DESY vereinte, das nunmehr zwei Standorte mit jeweils hochkarätigem Forschungsprofil hat.



# Jedes Atom zählt

## Wie Krebsmedikamente den zellulären „Abfalleimer“ blockieren

Bösartige Krebszellen wachsen schneller als die meisten unserer Körperzellen. Sie produzieren deshalb auch mehr „Abfall“, beispielsweise ausgediente oder fehlerhafte Proteine. Daher sind Krebszellen besonders abhängig von dem wichtigsten zellulären Müllverwerter, dem Proteasom, das den Molekül-Müll in seine Bausteine zerlegt. Bei der Behandlung mancher Krebsarten, etwa dem Multiplen Myelom, einem Tumor des Knochenmarks, macht man sich das zunutze: Patienten werden unter anderem mit sogenannten Inhibitoren behandelt, die das Proteasom gezielt blockieren. Der darauffolgende Entsorgungsstau stürzt die Krebszelle ins Chaos und führt schließlich dazu, dass sie stirbt. Ein Forscherteam aus Göttingen und Hamburg hat das Proteasom in zuvor unerreichter Detailschärfe in 3D sichtbar gemacht und den genauen Mechanismus entschlüsselt, mit dem Inhibitoren das Proteasom hemmen. Die neuen Erkenntnisse sind wegweisend, um effektivere Proteasom-Inhibitoren für die Krebstherapie zu entwickeln.

Wie genau zelluläre Maschinen wie das Proteasom funktionieren, lässt sich nur verstehen, wenn man ihren räumlichen Aufbau im Detail kennt. Mit seinen mehr als 50 000 Atomen ist der tonnenförmige Müllverwerter für Strukturbiologen allerdings eine echte Herausforderung. Wissenschaftlern um Ashwin Chari vom Göttinger Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie und Gleb Bourenkov vom Europäischen Molekularbiologie-Laboratorium (EMBL) in Hamburg ist es nun mit Hilfe des brillanten Röntgenlichts aus der Forschungslichtquelle PETRA III bei DESY

gelingen, die dreidimensionale Struktur des menschlichen Proteasoms mit einer Trennschärfe von bis zu 1,8 Ångström (0,18 millionstel Millimeter) aufzuklären – und damit die einzelnen Atome des Müllverwerter sichtbar zu machen.

Im nächsten Schritt bestimmten die Forscher außerdem die Struktur des Proteasoms gebunden von vier verschiedenen Inhibitoren, die bereits klinisch im Einsatz sind oder derzeit in Studien getestet werden. „Dank der stark verbesserten Auflösung im Vergleich zu früheren Proteasom-Strukturen konnten wir erstmals den >>

genauen chemischen Mechanismus ermitteln, mit dem die Inhibitoren das Proteasom blockieren“, erklärt Chari. „Dieses Wissen ermöglicht es, das Design der Inhibitoren und damit deren Wirksamkeit zu optimieren. Denn nur maßgeschneiderte Inhibitoren hemmen die Aktivität des Proteasoms perfekt und können es komplett stilllegen“.

## „Dank der stark verbesserten Auflösung im Vergleich zu früheren Proteasom-Strukturen konnten wir erstmals den genauen chemischen Mechanismus ermitteln, mit dem die Inhibitoren das Proteasom blockieren“

Ashwin Chari, Max-Planck-Institut Göttingen

Ein wichtiges Detail entdeckten die Wissenschaftler im sogenannten aktiven Zentrum des Proteasoms. Dort wird der zelluläre Müll abgebaut, und dort werden Inhibitoren angelagert. Anders als bisher gedacht, entsteht bei der chemischen Reaktion von Inhibitor und Proteasom eine 7-Ring-Struktur, die eine zusätzliche sogenannte Methylengruppe enthält – mit weitreichenden Folgen für die Wirksamkeit und den chemischen Mechanismus des Inhibitors. „Auch wenn es sich bei der Methylengruppe um nur ein Kohlenstoffatom samt zweier benachbarter Protonen unter mehr als 50 000 Atomen im Proteasom handelt, beeinflusst diese ganz wesentlich, wie der Inhibitor chemisch beschaffen sein muss, um das Proteasom optimal zu blockieren“, sagt Thomas Schneider, Gruppenleiter am EMBL. Das chemische Verfahren, mit dem sich Inhibitoren entsprechend designen lassen, haben die Forscher bereits zum Patent angemeldet. „Da einer möglichen medizinischen Anwendung immer das Erkennen vorausgeht, sind es solche Details, bei denen jedes Atom zählt, die den Unterschied ausmachen“, erklärt Bourenkov.

### Großer Aufwand zeigt den kleinen Unterschied

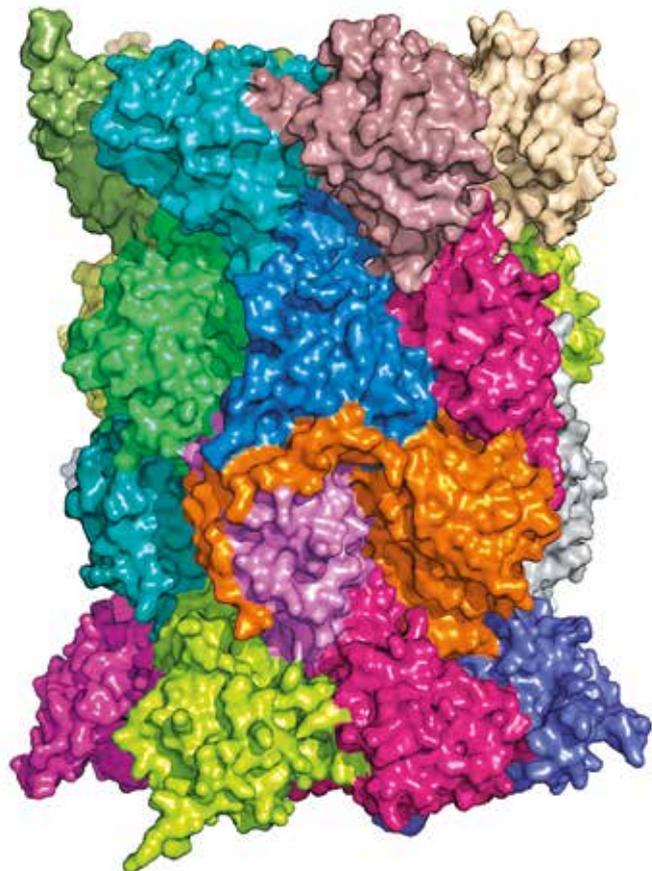
Um die Struktur eines Moleküls mit Hilfe von Röntgenkristallographie zu bestimmen, züchten Wissenschaftler von diesem Molekül Kristalle,

die sie dann mit Röntgenlicht bestrahlen. Die Röntgenstrahlen werden am Kristall gebeugt und erzeugen ein charakteristisches Muster, anhand dessen sich schließlich die Struktur des Moleküls bestimmen lässt. Doch in der Praxis ist dies weit schwieriger, als es klingt, und erfordert spezielle Verfahren. Die besondere Reinheit der Proben und die Qualität der Kristalle waren eine entscheidende Voraussetzung, um die räumliche Struktur des Proteasoms derartig detailliert aufklären zu können.

Eine zweite entscheidende Voraussetzung für den Erfolg war die Brillanz des Röntgenlichts von PETRA III. „Die DESY-Strahlenquelle generiert Röntgenstrahlen von herausragender Qualität. Mit Hilfe der Hochleistungs-Röntgenoptiken konnten wir die Röntgenstrahlen für das kristallisierte Proteasom maßschneiden und diese hohe Detailschärfe erreichen“, sagt Bourenkov.

*Science, 2016; DOI:10.1126/science.aaf8993*

Mit Röntgenstrahlen, die maßgeschneidert auf die Abmessung der Proteinkristalle passen, haben Wissenschaftler die Struktur des Proteasoms in bisher unerreichtem Detail aufgeklärt.



# Arsen in Pflanzen

## Röntgenuntersuchung zeigt Verteilung des giftigen Halbmetalls in Blättern

**D**as hochgiftige Arsen ist weltweit ein wachsendes Umwelt- und Gesundheitsproblem. Durch menschliche Aktivitäten steigt die Arsenkonzentration in Böden, und in vielen Ländern – insbesondere auf dem indischen Subkontinent – ist die Arsenkonzentration im Grundwasser problematisch. Bei Menschen kann Arsen unter anderem zu Krebs, Absterben ganzer Körperregionen sowie akutem Nieren- und Kreislaufversagen führen. Auch für Pflanzen ist das Halbmetall giftig. Es wird vom selben Transportmechanismus aufgenommen wie der lebenswichtige Phosphor und hemmt schon weit unterhalb der tödlichen Dosis das Pflanzenwachstum und damit den Ertrag von Nutzpflanzen.

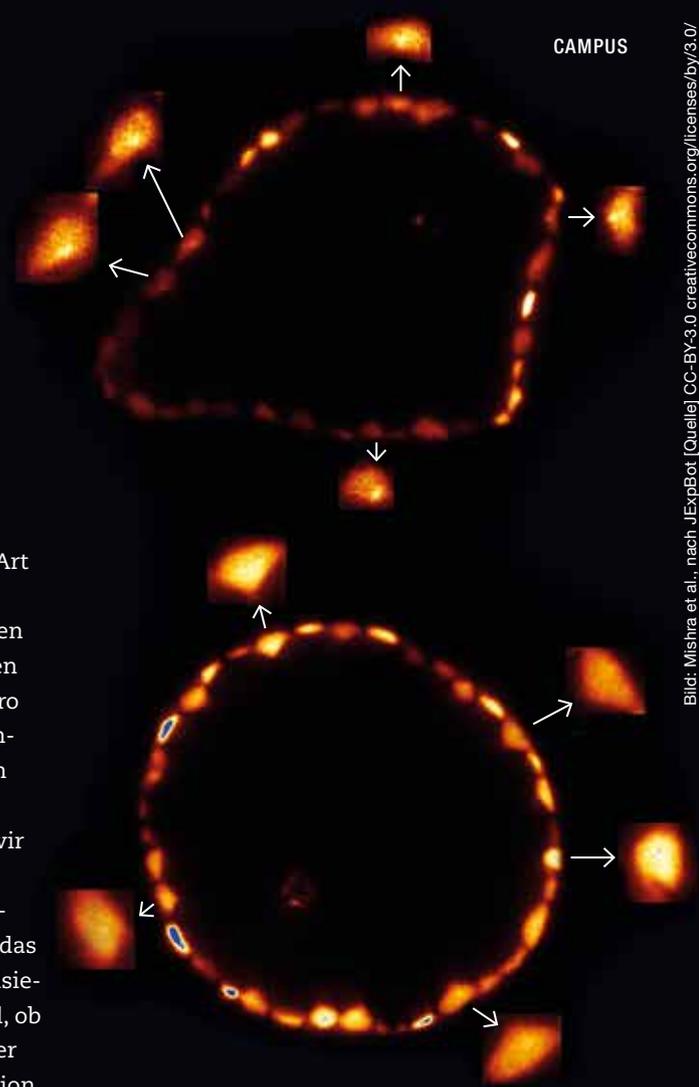
„Außerdem essen natürlich auch Menschen Pflanzen und verfüttern sie an Nutztier, so dass sich das Arsen anreichert und am Ende irgendwann beim Menschen landet“, erläutert Hendrik Küpper von der Tschechischen Akademie der Wissenschaften und der Südböhmischen Universität in Budweis (Tschechien), der zusammen mit Kollegen die Auswirkungen des giftigen Halbmetalls untersucht. „Mit unserer Analyse wollten wir genauer untersuchen, wie die Arsenvergiftung in Pflanzen abläuft“, ergänzt Gerald Falkenberg von DESY, der die Experimentierstation an der Röntgenlichtquelle PETRA III leitet, an der die Versuche stattfanden. Als Untersuchungsobjekt wählten die Forscher die Wasserpflanze Raus Hornblatt (*Ceratophyllum demersum*),

die sich als geeignete Indikator-Art für Metalle erwiesen hatte.

Küpper und sein Team setzten die Pflanze Arsenkonzentrationen von einem und fünf Mikromol pro Liter Wasser aus und durchleuchteten anschließend mit dem feingebündelten Röntgenstrahl die Blätter. „Mit PETRA III konnten wir zum ersten Mal in die einzelnen Pflanzenzellen hineinschauen“, berichtet Küpper. „So konnten wir das Arsen in der Zelle genauer lokalisieren – schließlich ist es nicht egal, ob es etwa in der Zellwand sitzt oder in der Vakuole.“ Eine Konzentration von einem Mikromol Arsen pro Liter Wasser ist für die Pflanze noch tolerabel. Die Pflanze lagert das Gift dabei zunächst in der Blatthaut, der Epidermis. „Überraschenderweise stellen wir fest, dass sich das Arsen zunächst in den Zellkernen sammelt“, berichtet Küpper. Erst wenn die Konzentration auf fünf Mikromol pro Liter steigt, was die Pflanze nicht dauerhaft überleben kann, findet sich das Arsen in der Vakuole und damit quasi in der gesamten Zelle.

„Damit ist die Kapazität der Epidermis erschöpft, die Pflanze kann nicht mehr entgiften, jetzt geht es ans Eingemachte“, beschreibt Küpper. Das Arsen wandert nun auch in das sogenannte Mesophyll, das Grundgewebe der Blätter, wo die Photosynthese stattfindet, die Pflanze Licht aufnimmt und Zucker produziert. Diese Änderung der Verteilung ist in der Röntgentomographie der Blätter deutlich zu sehen.

In künftigen Untersuchungen wollen die Forscher nun heraus-



Arsenverteilung in der Blatthaut (Epidermis) des Raus Hornblatts bei einer Konzentration von 1 Mikromol (oben) und 5 Mikromol (unten) Arsen pro Liter Wasser. An den einzelnen Zellen ist deutlich zu erkennen, dass sich das giftige Halbmetall bei geringer Konzentration im Zellkern sammelt und bei höherer Konzentration nahezu die gesamte Zelle überschwemmt.

finden, was das Arsen im Zellkern bewirkt. „Vermutlich gibt es Erbgutschäden“, erläutert Küpper. So könnte Arsen im Erbgut den Phosphor ersetzen. Während die jetzige Röntgenuntersuchung zeigt, dass Arsen bereits bei niedrigen Konzentrationen im Zellkern angereichert wird, planen die Forscher, in weiteren Experimenten die chemische Bindung des Arsens im Zellkern im Vergleich zu anderen Orten der Zelle zu untersuchen.

Journal of Experimental Botany, 2016; DOI: 10.1093/jxb/erw238

femtofinale

# Wie LAUT WAR DER Urknall?

WISSEN  
vom  
FASS

Was läuft im MOLEKÜL Kino



Wie laut war der Urknall? Jan Louis, Physikprofessor an der Universität Hamburg, präsentierte die Antwort auf diese Frage mal ganz ohne Powerpoint und Tafelkreide in lockerer Kneipenatmosphäre beim Bier im Hadleys.



Die Idee zu „Wissen vom Fass“ brachte Louis aus Israel mit, in Hamburg veranstalten DESY und die Universität Hamburg das ungewöhnliche Format. Schirmherrin ist die Hamburger Senatorin für Wissenschaft, Forschung und Gleichstellung, Katharina Fegebank.



Alarm auf dem Salatteller? Julia Kehr, Professorin für Molekulare Pflanzengenetik an der Universität Hamburg, ging im EierCarl, einer Kneipe am Fischmarkt, unter anderem der Frage nach: Merkt Salat, dass er gegessen wird?



Ziel von „Wissen vom Fass“ ist es, Menschen in einer unkonventionellen, entspannten Atmosphäre für Naturwissenschaft zu begeistern – und dabei ganz nebenbei aufzuzeigen, wie faszinierend, aber auch wie wichtig Forschung für die Kultur und Gesellschaft ist.



Auch der Schellfischposten stand einen Abend lang im Dienste der Wissenschaft: „Unser Erbgut soll Müll enthalten?“ Ob uns diese Frage beruhigen muss, klärte der Chemieprofessor Ulrich Hahn ebenso wortgewandt wie gestenreich.



Im Elbwerk auf St. Pauli zeigte Robin Santra die Faszination von Licht. In seinem Forscherleben beschäftigt sich der leitende Wissenschaftler bei DESY und Professor an der Universität Hamburg mit ultraschnellen Prozessen in intensiven Strahlungsfeldern.

# 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

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

## An dieser Ausgabe haben mitgewirkt

Kristin Hüttmann, Rosemary Wilson

## Gestaltung und Produktion

Diana von Ilseemann

## Bildbearbeitung und Herstellung

EHS, Hamburg

## Redaktionsschluss

November 2016

# femto

Das DESY-Forschungsmagazin

Abonnieren Sie  
femto kostenlos!

[www.desy.de/femto](http://www.desy.de/femto) oder 040 8998-3613



## Titelbild:

Das zentrale Schwarze Loch der aktiven Galaxie Centaurus A schießt Materiejets weit ins All hinaus. Im Röntgenlicht (blau) werden die Schockfronten sichtbar, die sich dabei ausbilden. Das Bild ist aus den Aufnahmen bei Infrarot-, sichtbaren und Röntgenwellenlängen zusammengesetzt. Das Weltall ist voller solcher kosmischen Teilchenbeschleuniger. Mit modernen Methoden und Instrumenten enträtseln Astrophysiker diese Quellen energiereicher Teilchen.

## Das Forschungszentrum DESY

DESY zählt zu den weltweit führenden Beschleunigerzentren. Mit den DESY-Großgeräten erkunden Forscher den Mikrokosmos in seiner ganzen Vielfalt – vom Wechselspiel kleinster Elementarteilchen über das Verhalten neuartiger Nanowerkstoffe bis hin zu jenen lebenswichtigen Prozessen, die zwischen Biomolekülen ablaufen. Die Beschleuniger und die Nachweisinstrumente, die DESY an seinen Standorten in Hamburg und Zeuthen entwickelt und baut, sind einzigartige Werkzeuge für die Forschung: Sie erzeugen das stärkste Röntgenlicht der Welt, bringen Teilchen auf Rekordenergien und öffnen völlig neue Fenster ins Universum.