

femto

Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 01/21

DAS VERBORGENE

UNIVERSUM

Die Multi-Messenger-Astronomie eröffnet den Blick auf unsichtbare Welten

Röntgenblick auf
Corona-Lungengewebe

Feuchtigkeit zerstört
Munchs „Schrei“

Fahndung nach der
Chemie des Lebens





Interstellarer Roadtrip

Das Weltall ist voller natürlicher Teilchenbeschleuniger: Schwarze Löcher, Überreste explodierter Sterne und andere exotische Objekte schleudern schnelle subatomare Partikel ins All. Deren Energie übertrifft alles, was sich mit irdischen Teilchenbeschleunigern erreichen lässt. Die kosmischen Teilchenschleudern verraten sich durch Röntgen- und Gammastrahlung, die von den schnellen Partikeln erzeugt wird. Mit dem Gammastrahlenobservatorium H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) in Namibia hat ein Forschungsteam einen besonderen kosmischen Beschleuniger untersucht: Der 7500 Lichtjahre entfernte Doppelstern Eta Carinae im Sternbild Schiffskiel

(Carina) am Südhimmel erzeugt Gammastrahlung bis zu einer Energie von 400 Gigaelektronenvolt, wie das Team um Stefan Ohm, Eva Leser und Matthias Fülling von DESY gemessen hat. Das ist rund 100 Milliarden Mal mehr als die Energie von sichtbarem Licht.

Ursprung der Gammastrahlung sind auch hier schnelle Teilchen. Sie werden in einer Schockregion beschleunigt, in der heftige Sternwinde der beiden Sonnen des Doppelsystems aufeinanderprallen. Die Dynamik ist komplex. Um das Phänomen zu veranschaulichen, haben die DESY-Astrophysiker gemeinsam mit den Spezialisten des preisgekrönten Science Communication Lab eine Animation



femtoskop

produziert. Die computergenerierten Bilder sind nahe an der Realität, weil dafür die gemessenen Bahn-, Stern- und Windparameter verwendet wurden.

Der Multimedia-Künstler Alva Noto hat die Animation vertont. Der Reiz habe für ihn dabei in der künstlerischen Vermittlung von Forschungsergebnissen gelegen, sagt Noto über die neue Kooperation: „Mir gefällt besonders gut, dass es kein Film-Soundtrack ist, sondern einen echten Bezug zur Realität hat.“

Astronomy & Astrophysics, DOI: 10.1051/0004-6361/201936761



www.desy.de/youtube

Inhalt



Seite 14 bis 31

ZOOM

DAS VERBORGENE UNIVERSUM

**Die Multi-Messenger-Astronomie
eröffnet den Blick auf unsichtbare Welten**

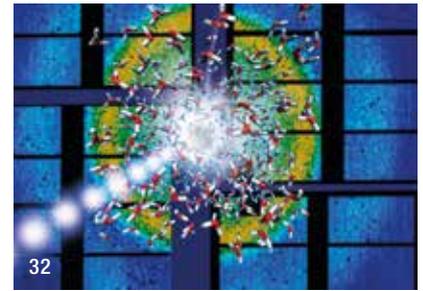
Abseits der leuchtenden Sterne liegt ein Universum, das unseren Augen gewöhnlich verborgen bleibt: Schwarze Löcher bringen mit Gravitationswellen den Kosmos zum Schwingen, subatomare Teilchen wie Neutrinos rasen mit höllischen Energien durchs All. Zum ersten Mal in der Geschichte der Menschheit lassen sich diese fundamental unterschiedlichen Boten aus dem Weltall heute beobachten und astronomisch auswerten. Wie sieht es im Inneren einer Supernova-Sternexplosion aus? Was passiert beim Crash zweier Neutronensterne? Neutrinos und Gravitationswellen zeigen kosmische Objekte auf ganz neue Art und ergänzen die Messungen von Licht und anderer elektromagnetischer Strahlung aus dem Kosmos. Die Wissenschaft steht am Anfang einer neuen Form der Himmelsbeobachtung: der Multi-Messenger-Astronomie.



38



14



32

CAMPUS

- 06 Lungengewebe im Röntgenblick**
Neues Bildgebungsverfahren zeigt Covid-19-Schäden
- 08 Forschen gegen die Pandemie**
Von Wirkstoffsuche bis Smartphone-App
- 09 Silizium zeigt Muskeln**
Perspektiven für chipbasierte Technik von morgen
- 10 Feuchtigkeit zerstört Munchs „Schrei“**
Röntgenuntersuchung hilft Erhaltung des Gemäldes
- 12 Tschüss Hamburg, bonjour Genève**
Joachim Mnich ist neuer Forschungsdirektor am CERN
- 36 Gammastrahlen-„Herzschlag“**
Kosmische Gaswolke pulsiert im Takt eines Schwarzen Lochs
- 38 Chemie des Lebens**
Möglicher neuer Weg zur Entstehung von DNS-Basenpaaren
- 40 Standardmodell ade?**
Myon-Experiment hält Teilchenphysik in Atem
- 42 Die Vermessung der Welle**
Unerreichter Einblick in Plasmabeschleuniger
- 43 Rekord-Dauerlauf**
Plasmabeschleuniger im 24-Stunden-Betrieb

ZOOM

- 14 Verborgenes Universum**
Die Multi-Messenger-Astronomie eröffnet den Blick auf unsichtbare Welten
- 24 Neue Dimension der Neutrino-Astronomie**
Ausbau des Neutrino-Observatoriums IceCube verspricht neue Erkenntnisse
- 26 Das Beben der Raumzeit**
Mit Gravitationswellen-antennen belauschen Astrophysiker den Kosmos

SPEKTRUM

- 32 Forschung kompakt:**
Flüssiges Wasser trotz 170 Grad
Der tiefe Erdmantel im Labor durchleuchtet
Effizientere Gold-Nanopartikel
Weltrekord im Beschleunigerring
Rekord-Kompression liefert ultrakurze Laserpulse
Supermikroskop für Proteinkristalle

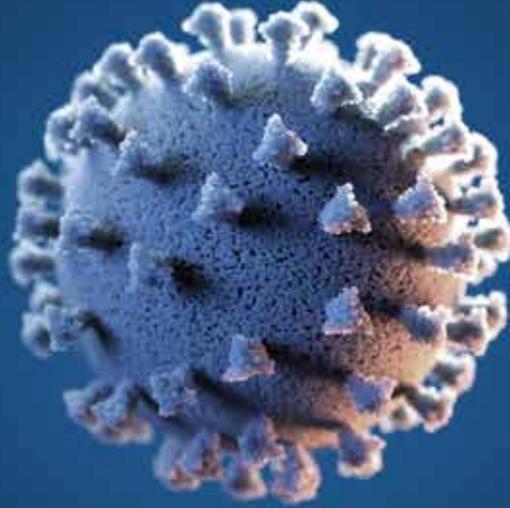
RUBRIKEN

02 femtoskop
Interstellarer Roadtrip

23 femtopolis
Die Vermessung der Sterne

35 femtomenal
Zeptosekunden-Stoppuhr

44 femtofinale
Ausflug ins Paralleluniversum



Hochpräziser Röntgenblick auf Lungengewebe

Ein neues Bildgebungsverfahren zeigt Covid-19-Schäden im Detail

Die Coronapandemie hat nicht nur unseren Alltag durcheinandergewirbelt, sondern auch Teile des Forschungsprogramms bei DESY: Der Lockdown ließ den Laborbetrieb kurzfristig ruhen, Messungen verzögerten sich, Konferenzen mussten ausfallen. Dennoch hat sich das Zentrum rasch in die aktuellen Herausforderungen eingeklinkt und konnte Wichtiges zur Erforschung des Coronavirus beitragen. Unter anderem strickte ein Team um den Göttinger Röntgenphysiker Tim Salditt ein neues Bildgebungsverfahren an DESYs Röntgenquelle PETRA III kurzerhand so um, dass es das Lungengewebe von Covid-19-Erkrankten extrem detailliert darstellen kann. Die Resultate helfen der Medizin, die Krankheit besser zu verstehen und gezielter zu behandeln.

„Ursprünglich haben wir die Phasenkontrast-Tomographie entwickelt, um vor allem Hirngewebe detailliert untersuchen zu können“, erläutert Salditt. „Das erlaubt dann

Rückschlüsse zum Beispiel auf die Ursachen der Alzheimer-Demenz.“ Doch als im Frühjahr 2020 die Coronapandemie übers Land kam, bot Salditt den Pathologen und Lungenspezialisten um Danny Jonigk an der Medizinischen Hochschule Hannover und dem Deutschen Zentrum für Lungenforschung unverzüglich Hilfe an – in der Hoffnung, seine noch junge Methode könne hochaufgelöste 3D-Bilder von Covid-19-geschädigtem Lungengewebe liefern und neue Erkenntnisse über die noch wenig bekannte Krankheit bringen.

3000 Bilder in anderthalb Minuten

Um mit der Phasenkontrast-Tomographie scharfe, hochaufgelöste Bilder zu machen, braucht es ausgesprochen helles Röntgenlicht. Deshalb nutzen die Fachleute für ihre Experimente eine der stärksten Röntgenquellen der Welt, den Teilchenbeschleuniger PETRA III bei DESY in Hamburg. Dort trifft der gebündelte Röntgenstrahl auf die Probe – ein wenige Millimeter

„Wo ich beim CT nur ein paar graue Schatten sehe, erkenne ich auf unseren Aufnahmen, wie sich kleinste Gefäße verästeln“

großes Scheibchen Lungengewebe, eingebettet in Paraffin. Ein Präzisionsdrehtisch rotiert diese Probe um 360 Grad – in anderthalb Minuten schafft die Apparatur 3000 Bilder aus allen Richtungen. Ein Detektor nimmt die Röntgenstrahlung auf und wandelt sie in sichtbares Licht um. Dabei erlauben es die besonderen Eigenschaften des gebündelten Strahls aus PETRA III, Hologramme der Probe aufzunehmen. Aus diesen Messdaten kann ein ausgefeilter Algorithmus dann hochaufgelöste 3D-Bilder errechnen.

In den vergangenen zehn Jahren konnten Tim Salditt und sein Team die Phasenkontrast-Tomographie stetig weiterentwickeln. Um Covid-19-Lungengewebe zu durchleuchten, mussten sie die Methode allerdings in einigen Punkten anpassen. „Vor allem war es wichtig, dass wir uns zunächst einen relativ großen Bildausschnitt ansehen können, um uns zu orientieren und die relevanten Stellen ausfindig zu machen“, erzählt Salditt. „In diese Stellen mussten wir dann regelrecht hineinzoomen, um sie bis ins feinste Detail zu analysieren.“

Kontrastscharfe Aufnahmen

Das Resultat: ein kontrastscharfes Bild des Lungengewebes, deutlich detailreicher als die Aufnahmen eines kliniküblichen CT-Scanners. „Wo ich beim CT nur ein paar graue Schatten sehe, erkenne ich auf unseren Aufnahmen, wie sich kleinste Gefäße verästeln und wie sich die dünnen Gewebewände der Lungenbläschen verändern“, erklärt Salditt. Unter anderem konnten die Aufnahmen die Vermutung bestätigen, dass SARS-CoV-2 die Bildung neuer Blutgefäße in der Lunge anregt. An sich ist das eine sinnvolle

Rettungsreaktion des Körpers auf die Infektion. Bei Covid-19 aber werden die neugebildeten Gefäße gleich wieder durch unzählige winzige Thromben verstopft, die bei schweren Krankheitsverläufen die Lungenfunktion massiv einschränken.

„Langfristig hoffen wir, die Methode an die Universitätskliniken zu bringen“

Danach nahm die Arbeitsgruppe noch ein weiteres, ebenfalls vom Coronavirus attackiertes Organ ins Visier – das Herz. Die Fragestellung: Sorgt das Virus ebenso wie in der Lunge auch hier für die unerwünschte Neubildung von Gefäßen? „Unsere bisherigen Messungen legen nahe, dass dies tatsächlich passiert“, berichtet Tim Salditt. Welche medizinischen Folgen das haben könnte und inwieweit sich das Herz wieder von diesen Schäden regenerieren kann, ist allerdings noch unklar.

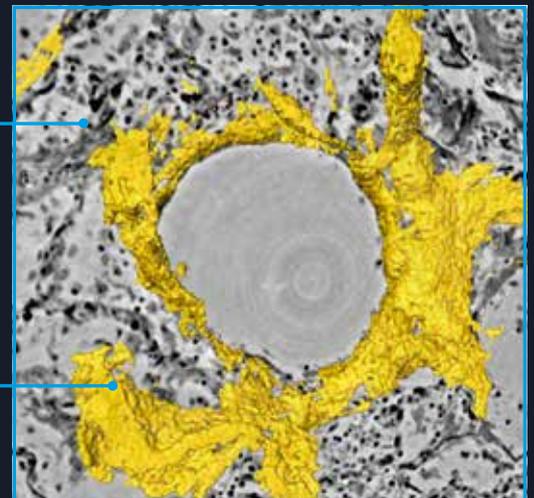
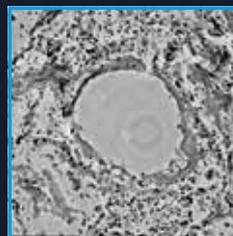
Eines jedoch scheint gewiss: Mit der Phasenkontrast-Tomographie hat die Fachwelt nun ein neues, leistungsfähiges Werkzeug in den Händen, das feinste Gewebestrukturen detailreich abbilden kann. „Langfristig hoffen wir, die Methode an die Universitätskliniken zu bringen“, sagt Salditt. „Dort könnten Pathologen sie beispielsweise für die Klassifikation von Tumoren nutzen. Diese Information könnte dann auch wieder in die Behandlung einfließen.“ Umgekehrt wäre aber auch denkbar, die Pathologie an den Beschleuniger zu bringen. Die Vision: Fachleute aus ganz Deutschland schicken ihre Proben nach Hamburg, wo sie von Probenrobotern automatisch durchleuchtet werden – eine Idee, die besonders für medizinische Forschungsprojekte interessant sein dürfte.

eLife, DOI: 10.7554/eLife.60408

Detaillierter Blick in die Lunge

Schnitte durch das dreidimensionale Rekonstruktionsvolumen (links oben, grau) um ein Lungenbläschen mit Hyalinmembran (links unten, gelb), rechts eine Überblendung. Im Zentrum befindet sich das Luftbläschen (Alveole).

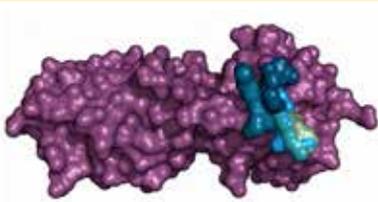
Die Elektronendichte ist durch unterschiedliche Grautöne dargestellt. An der Innenseite des Luftbläschens schlägt sich eine Schicht aus Proteinen und abgestorbenen Zellenresten nieder, die sogenannte Hyalinmembran. Diese Ablagerung, die durch das neue Verfahren erstmals in ihrer dreidimensionalen Struktur dargestellt werden kann, reduziert den Gasaustausch und führt zu Atemnot.



FORSCHEN GEGEN DIE PANDEMIE

Die Coronakrise stellt die Wissenschaft vor enorme Herausforderungen: Innerhalb kürzester Zeit sind neue Erkenntnisse und konkrete Lösungen bezüglich SARS-CoV-2 gefragt. Fachleute auf dem DESY-Campus beteiligen sich in vielfältiger Hinsicht an der Coronaforschung:

- An der Röntgenquelle PETRA III durchforstete ein Forschungsteam einige tausende Wirkstoffe auf ihre prinzipielle Tauglichkeit als Covid-19-Medikament. Nach der Messung von rund 7000 Proben mit fast 6000 Wirkstoffsubstanzen konnten 37 identifiziert werden, die an ein wichtiges Virusprotein binden, die Hauptprotease. Sie ist von zentraler Bedeutung für die Vermehrung des Virus in der Zelle. In Zellkulturen bremsen sieben dieser Substanzen die Virusvermehrung deutlich. Zwei davon waren so vielversprechend, dass sie in die präklinische Prüfung kamen. Einer der beiden Wirkstoffe dockt dabei an eine bislang unbekannte Bindungsstelle an der Hauptprotease an.



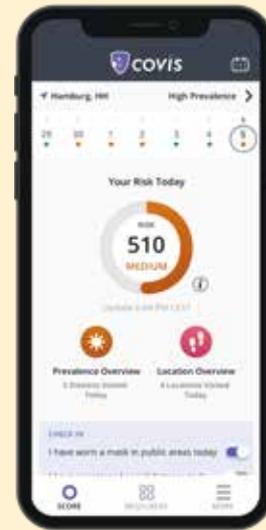
Neue Bindungsstelle an der Hauptprotease

- Eine europäische Arbeitsgruppe hat an PETRA III unter Hunderten von Kandidaten einen synthetischen Antikörper identifiziert, der das Virus an einer Infektion menschlicher Zellen hindern könnte. Der sogenannte Sybody 23 besetzt die Rezeptorbindungsdomänen am charakteristischen Spike-Protein, mit denen das Coronavirus an das Protein ACE2 auf menschlichen Zellen koppelt. In Reagenzglas tests konnte der ursprünglich aus Kamelen und

Lamas stammende Antikörper ein genetisch modifiziertes Lentivirus mit Spike-Protein erfolgreich deaktivieren. Ob er sich als Medikament eignet, müssen weitere Tests zeigen.

- DESYs Rechenzentrum stellt Teile seiner Computerpower für Datenanalysen sowie aufwändige Rechner-simulationen zur Verfügung. Darin wird unter anderem berechnet, wie sich bestimmte Virusproteine verhalten. Allein im ersten halben Jahr bis 30. September 2020 kamen so 13 997 439 Stunden Rechenzeit zusammen, das entspricht umgerechnet der Leistung von rund 800 Laptops im Dauerbetrieb.
- Fachleute suchen mit Hilfe von PETRA III nach innovativen Verabreichungsformen von Coronamedikamenten. Dabei testen die Forscherinnen und Forscher Verfahren, um Wirkstoffe möglichst gleichmäßig auf verschiedene Trägermaterialien aufzubringen, so dass sie sich viel genauer und auf einzelne Patienten individuell zugeschnitten dosieren lassen. Ziel ist es, mögliche Nebenwirkungen zu mildern, die bei verschiedenen potenziellen Coronamedikamenten erheblich sein können.
- Ein DESY-Theoretiker und sein Team modellieren das Ausbreitungsverhalten von SARS-CoV-2 mit Big-Data-Modellen aus der Teilchenphysik. Heraus kam unter anderem die Smartphone-App CoVis, die mit Hilfe von künstlicher Intelligenz und Angaben zum eigenen Verhalten eine individuelle Risikoanalyse erstellt. Der Algorithmus verfolgt nicht nur die Entwicklung der Immunität und hat das Potenzial, die Belastung von Kliniken zu verringern, er lässt sich auch individuell anpassen: Mit einer maßgeschneiderten Benutzeroberfläche könnte beispielsweise ein Un-

ternehmen das Infektionsrisiko seiner Mitarbeiter ermitteln und geeignete Gegenmaßnahmen ergreifen. Zudem könnte sich die App auch für andere Infektionskrankheiten wie Grippe modifizieren lassen, vielleicht auch für Allergien oder sogar Pollenflug. www.covishhealth.com



- Der Mainzer Impfstoffentwickler BioNTech sucht an PETRA III nach Möglichkeiten, die noch junge Klasse von RNA-Impfstoffen zu verbessern. An den Messstationen des Europäischen Molekularbiologie-Laboratoriums EMBL hat BioNTech dazu erforscht, wie sich die Boten-RNA („messenger RNA“, mRNA) besser in Nanopartikel verpacken lässt, so dass sie eine höhere Wirkung im Organismus entfalten kann. mRNA-Impfstoffe bringen die zelleigene Maschinerie dazu, charakteristische Proteine eines Erregers herzustellen, die allein ungefährlich sind, aber das Immunsystem auf den jeweiligen Erreger trainieren. So lassen sich nicht nur Corona-Impfstoffe herstellen, sondern auch solche gegen andere Infektionskrankheiten oder, so die Hoffnung, beispielsweise auch gegen Krebs.

Weitere Informationen:
www.desy.de/aktuelles/corona_forschung

Silizium zeigt Muskeln

Perspektiven für chipbasierte Technik von morgen

Ob Smartphone, Laptop oder Smart Watch: Das chemische Element Silizium findet sich in nahezu jedem elektronischen Bauteil und noch so kleinen Computerchip. Einem Hamburger Forschungsteam ist es jetzt gelungen, dem Halbleiter Muskelkraft zu verleihen. Mit dieser neuen Eigenschaft kann das Hybridmaterial elektrische Signale in mechanische Bewegungen umwandeln. Das bietet neue Perspektiven für die chipbasierte Technik von morgen. Das Team um Patrick Huber von der Technischen Universität Hamburg hat die Bewegung der Siliziumatome mit Hilfe von Röntgenlicht live beobachtet.

Damit beispielsweise der Lautsprecher in einem Smartphone funktioniert, bedarf es sogenannter aktorischer Materialien. Diese führen kleine Bewegungen im Mikrometer- und Nanometerbereich elektrisch und sehr präzise aus und bringen damit etwa Luft zum Schwingen. Bisher konnte Silizium dies nicht übernehmen.

Vorbild Natur

„Um das zu ändern, ahmten wir auf künstliche Art und Weise das nach, was die Natur bereits in Biomaterialien wie Knochen oder Zähnen durch eine geschickte Kombination von weicher und harter Materie umsetzt“, sagt Huber. Dazu stattete sein Team kleinste Nanokanäle in hartem Silizium, die sich dort spontan in großer Zahl selbst bilden können, mit dem künstlichen, umweltfreundlichen und weichen Muskelpolymer Polypyrrol aus. „Uns ist es gelungen, dass sich diese Muskelmoleküle und damit das komplette Siliziumgerüst des

Hybridmaterials unter elektrischer Spannung ausdehnen und anschließend wieder zusammenziehen“, erklärt der Physiker.

Besonders spannend an dem neuen Material ist, dass in einer wässrigen Umgebung nur sehr kleine elektrische Spannungen für die Aktuatorfunktion notwendig sind. Sie sind ähnlich groß – oder eigentlich klein – wie sie in vielen lebenden Systemen zur Reizleitung und zur Kontrolle von Bewegungen genutzt werden. Dies mache das Hybridmaterial besonders vielversprechend für Anwendungen in biologischen oder biomedizinischen Systemen, betont das Team – zumal nur biokompatible und in großen Mengen verfügbare Substanzen zum Einsatz kämen.

Im Takt der Spannung

Um die Funktionsweise des neuen nanoporösen Hybridmaterials zu verstehen, führten Forscherinnen und Forscher vom Helmholtz-

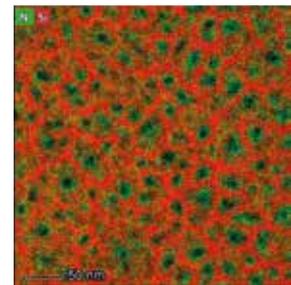
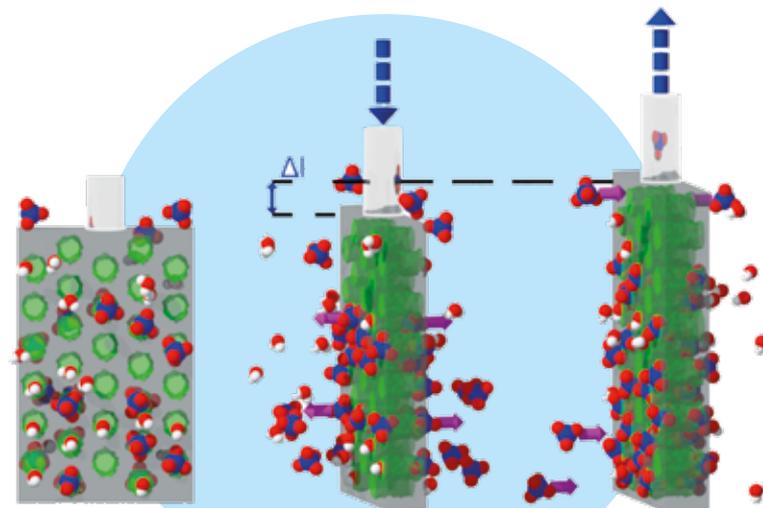
Zentrum Hereon Computersimulationen durch. Auf dieser Grundlage lassen sich die Eigenschaften nun präzise vorausberechnen und somit Strategien vorschlagen, um das Material für Anwendungen zu optimieren. An DESYs Röntgenmikroskop PETRA III konnten die Autoren sogar live verfolgen, wie sich, angetrieben durch die Muskelmoleküle, die Siliziumatome im Takt der kleinen elektrischen Spannungen hin und her bewegen und wie im Detail diese konzertierte Bewegung auf der Nanoskala erst die Deformation auf der Makroskala möglich macht.

Das neue Materialdesign ist ein Beispiel dafür, wie die besondere Physik auf der Nanoskala mit Selbstorganisationsprinzipien kombiniert werden kann, um einem klassischen Basismaterial von enormer technologischer Bedeutung eine völlig neue Funktion zu verleihen – eben Muskelkraft. Durch die Anwendung von Designprinzipien nach dem Vorbild der Natur sei ein neuartiges hybrides Basismaterial mit aktorischen Eigenschaften entwickelt worden, mit dem sich die Technik von morgen bioinspiriert und nachhaltig gestalten lasse, fasst Forschungsleiter Patrick Huber zusammen.

Science Advances,
DOI: 10.1126/sciadv.aba1483

Hybridmaterial

Silizium (grau) mit in Nanoporen eingebetteten Muskelpolymeren (grün) zeigt als Funktion kleiner elektrischer Spannungen in wässriger Umgebung reversible Ausdehnung und Kontraktion.



Die Verteilung der künstlichen Muskeln (grün) im Silizium (rot) unter dem Elektronenmikroskop

Feuchtigkeit zerstört Munchs „Schrei“

Röntgenuntersuchung liefert Schlüssel zur besseren Erhaltung des Gemäldes

Wenige Kunstwerke zeigen existenzielle Angst so eindrucksvoll wie „Der Schrei“ des norwegischen Malers Edvard Munch. Es gibt mehrere Versionen des Gemäldes, die Munch in verschiedenen Techniken und über viele Jahre verteilt erstellte – jede ist für sich einzigartig. Die wohl berühmteste Version, die dem Munch-Museum in Oslo gehört, wurde 2004 gestohlen und erst zwei Jahre später in schlechtem Zustand wieder aufgefunden. Seitdem wurde das Werk nicht mehr ausgestellt, sondern in einem klimatisierten Raum im Museum aufbewahrt. Eine neue Untersuchung zeigt nun, dass Feuchtigkeit – und nicht Licht – der Hauptfaktor bei der Zersetzung des wertvollen Kunstwerks ist.

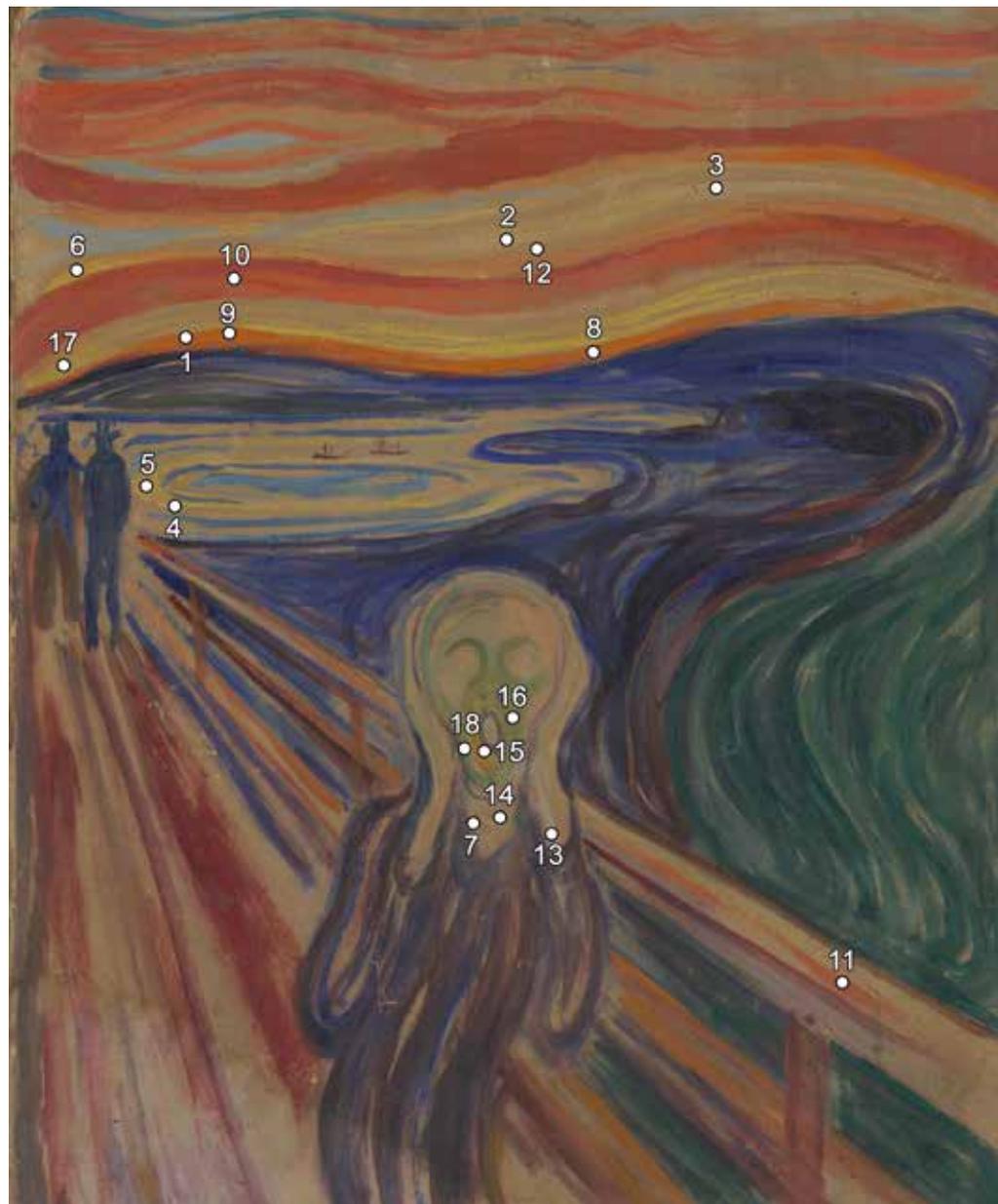
„Der Schrei“ (norwegisch „Skrik“) besteht aus einer Reihe von vier Gemälden und einer Lithographie. 1893 schuf Munch (1863–1944) eine Pastell- und eine Tempera-Version,

1895 kam ein weiteres Pastell und 1910 noch ein Tempera-Gemälde hinzu. Munch fertigte zudem eine Lithographie, um von dem damals bereits populären Motiv Schwarz-Weiß-Drucke herzustellen. Die Version des Munch-Museums zeigt in der linken unteren Ecke deutlich Spuren eines Wasserschadens,

aber es gibt noch mehr: Ein Teil der gelben Farbe verblasst und bröckelt ab. Dies ist besonders in den Bereichen des Sonnenuntergangs, des Sees und des Halses der Hauptfigur der Fall.

Ein Forschungsteam um Letizia Monico vom Italienischen Forschungsrat CNR in Rom und

Die Inspiration zu dem Motiv „Der Schrei“ hatte der Norweger Edvard Munch (1863–1944) nach eigenen Worten auf einem Abendspaziergang im Jahr 1895: „Ich ging mit zwei Freunden die Straße hinab. Die Sonne ging unter – der Himmel wurde blutrot, und ich empfand einen Hauch von Wehmut. Ich stand still, todmüde – über dem blauschwarzen Fjord und der Stadt lagen Blut und Feuerzungen. Meine Freunde gingen weiter – ich blieb zurück – zitternd vor Angst – ich fühlte den unendlichen Schrei in der Natur ... Ich malte dieses Bild – malte die Wolken wie wirkliches Blut – die Farben schrieten“, erläuterte Munch. Der Schrei stammt also nicht von der abgebildeten Person, sondern es ist „Der Schrei der Natur“, wie Munch das Gemälde ursprünglich auch genannt hatte. Die nummerierten Kreise auf dem Foto markieren die Untersuchungspunkte der aktuellen Studie.



Koen Janssens von der Universität Antwerpen in Belgien untersuchte nun das Gemälde, um mehr über die Ursachen dieser Zersetzung herauszufinden. Sie beleuchteten das Gemälde zunächst im Museum in Oslo mit Röntgenstrahlung. Mit Hilfe der sogenannten makroskopischen Röntgenfluoreszenz konnte das Team die Verteilung chemischer Elemente wie Kadmium, Quecksilber und Chlor über die gesamte Oberfläche des Gemäldes sichtbar machen. Dabei zeigte sich, dass ein Teil der kadmiumgelben Farbe reich an Chlorverbindungen ist und dass genau an diesen Stellen die Farbe beschädigt ist.

Winzige Farbfragmente

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler untersuchten daraufhin bei DESY und an der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle ESRF in Frankreich einige winzige gelbe Farbfragmente, die sich vom Gemälde gelöst hatten, mit hochintensiver und stark gebündelter Röntgenstrahlung. Zusätzlich

Die Forscherinnen und Forscher stellten fest, dass das leuchtend gelbe Kadmiumsulfid zu farblosem Kadmiumsulfat oxidiert, was das Verblässen der Farbe erklärt. Diese spontane Umwandlung wurde zuvor schon in Gemälden anderer berühmter Künstler aus der gleichen Zeit, wie Vincent Van Gogh, James Ensor und Henri Matisse, beobachtet.

Künstliche Alterung

Üblicherweise wird dieses Bleichphänomen der Lichteinstrahlung zugeschrieben. Im Fall von „Der Schrei“ tritt die Verschlechterung jedoch hauptsächlich an den Stellen auf, an denen das chlorreiche Kadmiumgelb vorhanden war, nicht aber an anderen Stellen des Gemäldes, die in der Vergangenheit alle etwa der gleichen Lichtmenge ausgesetzt waren. Es musste also ein anderer oder ein zusätzlicher Faktor für die chemische Reaktion der gelben Farbe verantwortlich sein.

Durch künstliche Alterungsexperimente an selbst synthetisierter kadmiumgelber Farbe, die

„Im Röntgenmikroskop kann man die Verteilung der Kadmiumverbindungen mit Sub-Mikrometer-Auflösung abbilden“

Gerald Falkenberg, DESY

analysierten sie künstlich gealterte Farbproben aus originale Kadmiumgelben Pigmentpulver und einer kadmiumgelben Farbtube, die Munch gehört hatte.

Das Ziel: die Daten all dieser verschiedenen Pigmente zu vergleichen, um die Ursachen aufzuspüren, die zu einer chemischen Veränderung führen können. „Im Röntgenmikroskop an der Strahlführung P06 an PETRA III kann man mittels Pulverbeugung die Verteilung der Kadmiumverbindungen mit Sub-Mikrometer-Auflösung abbilden“, sagt DESY-Forscher Gerald Falkenberg, der die Strahlführung leitet und an dem Projekt beteiligt war.

reich beziehungsweise arm an Chlorverbindungen war, und indem sie die lichtbedingte Alterung mit der Alterung durch Erhitzen der Farbe unter feuchten Bedingungen verglichen, konnten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zeigen, dass es vor allem die hohe Luftfeuchtigkeit ist, die bewirkt, dass die gelbe Farbe in „Der Schrei“ bröckelt und verblasst, und nicht das einfallende Licht.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Studie wollen die Museumskuratoren jetzt sicherstellen, dass „Der Schrei“ in Zukunft bei relativ niedriger Luftfeuchtigkeit (45%), aber normaler Lichtintensität konserviert

wird, um einen weiteren Alterungsprozess so weit wie möglich zu verlangsamen oder zu stoppen.

Science Advances,
DOI: 10.1126/sciadv.aay3514



Bilder von oben nach unten:

- 1 Untersuchung des Originalgemäldes mit einem Spektralscanner im Munch-Museum in Oslo
- 2 DESY-Forscher Gerald Falkenberg an der Strahlführung P06 von DESYs Röntgenquelle PETRA III
- 3 Serie künstlich gealterter Farben, die mit verschiedenen Arten von Pigmenten auf Cadmiumsulfidbasis hergestellt wurden

Von DESY zum CERN: Joachim Mnich an einem Modell des Detektors ATLAS.



„Das Standardmodell lässt wesentliche Fragen offen“

Der Ausbau des weltgrößten Beschleunigers LHC könnte den Weg zu neuer Physik ebnen

Zwölf Jahre lang war Joachim Mnich bei DESY Direktor für Teilchenphysik. Seit Januar 2021 hat er einen neuen Job – als Forschungsdirektor beim renommiertesten Teilchenforschungszentrum der Welt, dem CERN in Genf. Dort betreut er unter anderem die Experimente am Riesenbeschleuniger LHC, der in den kommenden Jahren deutlich ausgebaut werden soll. Forscherinnen und Forscher erhoffen sich Antworten auf wichtige offene Fragen im sogenannten Standardmodell der Teilchenphysik.

femto: Herr Mnich, wie wird man Forschungsdirektor am CERN? Haben Sie einfach eine Bewerbung nach Genf geschickt?

Joachim Mnich: Nein, ich saß in meinem Büro und bekam einen Anruf von CERN-Generaldirektorin Fabiola

Gianotti. Sie sagte: Ich möchte, dass du mein neuer Forschungsdirektor wirst! Ich bin fast vom Stuhl gefallen, damit hatte ich nicht gerechnet. Ich brauchte eine gewisse Zeit, um mich an den Gedanken zu gewöhnen. Aber das ist ein Angebot, das man eigentlich nicht ablehnen kann. Also griff ich zwei Wochen später zum Telefon und sagte zu. Und der CERN-Rat hat meiner Nominierung dann zugestimmt.

femto: Das CERN kennen Sie ja ganz gut, Sie haben schon ein paar Jahre dort verbracht, oder?

Joachim Mnich: Richtig. In den 1980er und 90er Jahren habe ich zwölf Jahre lang dort geforscht. Das ist schon über 20 Jahre her, aber seitdem habe ich immer viel Kontakt zum CERN

gehabt, etwa durch meine Beteiligung an CMS, einem der großen Nachweisinstrumente am LHC. Natürlich hat sich das CERN seit den späten 1990ern deutlich weiterentwickelt, und viele Details kenne ich noch nicht. Das ist etwas, das ich jetzt lernen muss in vielen Gesprächen mit den Leuten, die dort arbeiten.

femto: Ein kurzer Blick in die Vergangenheit: Was waren in Ihrer Zeit als Teilchenphysikdirektor bei DESY die wichtigsten Entwicklungen?

Joachim Mnich: Als ich 2009 anfang, war knapp zwei Jahre zuvor HERA abgeschaltet worden, der größte Beschleuniger, den Deutschland je gebaut hatte. Einen Nachfolger gab es nicht, deshalb haben wir uns neu orientiert und an den

LHC-Experimenten in Genf beteiligt. Das ist sehr gut gelungen – heute zählen die DESY-Gruppen zu den wichtigsten Partnern am LHC. Ferner haben wir uns bei einem anderen Beschleunigerprojekt engagiert, dem Belle-II-Experiment in Japan. Und in Hamburg haben wir ein neues Programm initiiert: Experimente, die nach einem bislang unentdeckten Teilchen suchen, dem Axion. Es könnte hinter der rätselhaften Dunklen Materie stecken. Ein Experiment namens ALPS II wird im alten HERA-Tunnel installiert und dürfte 2021 die ersten Daten nehmen. Weitere Axionen-Experimente sollen folgen, etwa das Sonnenteleskop IAXO. Anfang 2020 wurde DESY von der Helmholtz-Gemeinschaft evaluiert. Und die Teilchenphysik ist von einem internationalen Fachgremium mit Bestnoten begutachtet worden. Das ist ein starkes Indiz dafür, dass DESY gut für die Zukunft aufgestellt ist.

femto: In welcher Situation steckt die Teilchenphysik derzeit? Was sind die großen Themen, die da gewälzt werden?

Joachim Mnich: Mit dem Standardmodell haben wir eine außerordentlich erfolgreiche Theorie, die sich über ein halbes Jahrhundert entwickelt hat. Aber dieses Modell lässt wesentliche Fragen offen: Was steckt hinter der Dunklen Materie, und warum scheint es im All deutlich mehr Materie als Antimaterie zu geben? Antworten erhoffen wir uns von neuen Beschleunigerexperimenten. Zum einen werden wir den LHC in den kommenden Jahren ausbauen und deutlich leistungsfähiger machen. Zum anderen schmiedet die Teilchenphysikgemeinschaft bereits Pläne für neue Beschleuniger.

femto: Welche Art Beschleuniger haben die Forscherinnen und Forscher dabei im Sinn?

Joachim Mnich: Als Ergänzung zum LHC wünscht sich die Teilchenphy-

sikgemeinschaft eine „Higgs-Fabrik“, also einen Beschleuniger, der in seinen Kollisionen riesige Mengen von Higgs-Teilchen erzeugt. Er soll dieses Teilchen, das 2012 am LHC entdeckt wurde, präzise vermessen und dadurch Lücken im Standardmodell aufspüren. Japan erwägt derzeit, so eine Anlage unter dem Namen ILC zu bauen, aber die Entscheidung ist noch offen. Am CERN planen wir langfristig einen Ringbeschleuniger, der mit einem Umfang von 100 Kilometern rund viermal größer wäre als der LHC. In einer ersten Stufe könnte er Elektronen auf ihre Antiteilchen feuern, die Positronen, und damit als Higgs-Fabrik fungieren. Später ließe er sich zu einem Protonenbeschleuniger aufrüsten, der neue Rekordenergien erreichen würde und dadurch bislang unbekannte Teilchen erzeugen könnte.

femto: Anfang 2021 haben Sie Ihren Posten als CERN-Forschungsdirektor angetreten. Was werden die großen Themen Ihrer fünfjährigen Amtszeit sein?

Joachim Mnich: Die nächsten Jahre werden durch den Umbau des LHC geprägt sein. Wir wollen ihn so verbessern, dass wir ab 2027 fünf- bis zehnmal so viele Teilchenkollisionen erzeugen können. Dadurch werden wir sehr seltene Prozesse beobachten können, die uns bislang durch die Lappen gehen. Vielleicht finden wir dabei Indizien für die Existenz neuer Teilchen. Um das zu schaffen, müssen wir nicht nur den Beschleuniger verbessern, sondern auch die Detektoren.

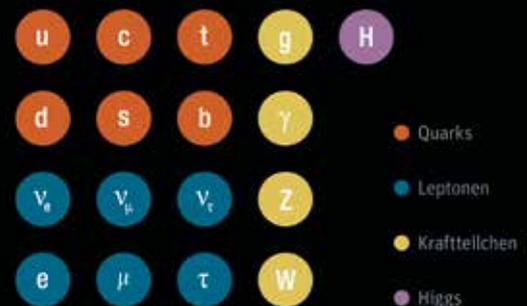
femto: Das CERN ist ja nicht nur der LHC, das Zentrum betreibt auch andere Forschungsprogramme. Was steht hier auf der Agenda?

Joachim Mnich: Da wäre zum Beispiel die Neutrino-Forschung. Das Neutrino ist ein häufiges, aber extrem flüchtiges Teilchen und könnte für die Frage wichtig sein, warum nach

dem Urknall mehr Materie als Antimaterie übrigblieb. Die USA bauen derzeit ein Großexperiment namens DUNE, und das CERN bietet den beteiligten europäischen Gruppen eine Plattform. Auch andere Programme wie die Erforschung von Antiwasserstoff und die Erzeugung seltener Isotope für die Kernphysik werden fortgesetzt. Allerdings wird während meiner Amtszeit der Ausbau des LHC die oberste Priorität besitzen.

KRÄFTE UND TEILCHEN

Das Standardmodell der Teilchenphysik fasst unser heutiges Verständnis vom Mikrokosmos zusammen. Es beschreibt die Grundbausteine der uns umgebenden Welt: Aus den Up- und Down-Quarks setzen sich Protonen und Neutronen zusammen, die Bestandteile der Atomkerne. Die ebenfalls elementaren Elektronen bilden die Hülle der Atome. Sowohl Elektronen als auch Quarks besitzen schwere, instabile Geschwisterpartikel. Diese entstehen unter anderem beim Aufprall von kosmischer Strahlung auf die Erdatmosphäre und zerfallen rasch in stabile Teilchen. Hinzu kommen die Neutrinos – extrem leichte und flüchtige Teilchen, die zum Beispiel bei der Kernfusion in Sternen entstehen, in Unmengen durchs All rasen und dabei so gut wie gar nicht mit Materie interagieren. Außerdem beschreibt das Standardmodell Kraftteilchen: Sie übermitteln die Naturkräfte, die zwischen den Materieteilchen wirken. Mit dem 2012 entdeckten Higgs-Teilchen ist das Modell komplett. Das Higgs-Boson verhilft anderen Elementarteilchen zu ihrer Masse.



Quarks und Leptonen bilden die Materie, Bosonen übertragen Kräfte.



ZOOM

DAS VERBORGENE UNIVERSUM

Die Multi-Messenger-Astronomie eröffnet den Blick auf unsichtbare Welten



Kosmischer Teilchenbeschleuniger: Von den Überresten eines zerrissenen Sterns um ein Schwarzes Loch empfangen wir nicht nur Licht, sondern auch schnelle Neutrinos.

Seit Jahrtausenden fasziniert die Menschen der Sternenhimmel. In den vergangenen Jahrhunderten haben Beobachter gelernt, eine erstaunliche Fülle an Fakten aus dem sichtbaren Licht der Sterne zu lesen. Während der letzten Jahrzehnte haben Astronomen schließlich das gesamte elektromagnetische Spektrum für die Beobachtung des Kosmos zugänglich gemacht, von Radiowellen bis Gammastrahlung, und damit den Blick auf ein erstaunlich vielfältiges Universum enorm erweitert. Doch das ist noch nicht das ganze Bild: Kosmische Objekte und Phänomene emittieren nicht nur elektromagnetische Strahlung, sondern auch Teilchen und Gravitationswellen. Zum ersten Mal in der Geschichte der Menschheit lassen sich diese fundamental unterschiedlichen Boten aus dem All heute beobachten und astronomisch auswerten. Neutrinos und Gravitationswellen zeigen kosmische Objekte auf ganz neue Art und ergänzen die Messungen der elektromagnetischen Strahlung. Die Wissenschaft steht am Anfang einer neuen Form der Himmelsbeobachtung: der Multi-Messenger-Astronomie.

Am 1. Oktober 2019 ging dem Observatorium IceCube in der Antarktis ein besonderes Teilchen aus dem Weltall ins Netz: Das kosmische Neutrino rauschte mit einer Energie in das ewige Eis des Südpols, die mindestens zehnmals höher lag als die Spitzenenergie des stärksten Teilchenbeschleunigers der Erde, des Large Hadron Collider (LHC) am europäischen Forschungs-

Veröffentlichung, in der das große internationale Team über die Entdeckung berichtet. „Gezeitenkatastrophen sind bislang wenig verstanden. Der Neutrinofund weist auf die Existenz einer mächtigen Maschine, die schnelle Teilchen ausspuckt.“ Zusammen mit Beobachtungen im Bereich der Radiowellen sowie des sichtbaren und ultravioletten Lichts belegt die Entdeckung, dass solche Gezeitenkatastrophen als natürliche

den Radiowellen über sichtbares Licht bis zur Gammastrahlung.“ Die weiteren Boten sind Neutrinos, Gravitationswellen und die sogenannte Kosmische Strahlung, also der Hagel an energiereichen Atomkernen, der die Erde gleichmäßig aus allen Richtungen trifft.

Das Gros der astronomischen Erkenntnisse wird bislang durch die Beobachtung der elektromagnetischen Strahlung gewonnen. Die



„Gezeitenkatastrophen sind bislang wenig verstanden“

Robert Stein, DESY

zentrum CERN bei Genf. Das eigentlich Spektakuläre daran war jedoch seine Herkunft: Das schnelle, ultraleichte Elementarteilchen war offensichtlich Bote einer seltenen kosmischen Katastrophe: Ein extrem massereiches Schwarzes Loch hatte mit seinen gigantischen Gravitations- und Gezeitenkräften einen kompletten Stern zerrissen und zu Teilen verschlungen.

Zum ersten Mal hatten die Forscherinnen und Forscher ein Teilchen aus einer solchen „Gezeitenkatastrophe“ aufgefangen. „Es liefert uns wertvolle Hinweise“, betont DESY-Forscher Robert Stein, Hauptautor einer wissenschaftlichen

Teilchenschleudern funktionieren können. Ein wichtiger Meilenstein, denn das konnten Forscherinnen und Forscher bislang nur vermuten.

Nachweis im ewigen Eis

Der Neutrino nachweis im ewigen Eis ist ein Beispiel für eine neue Art der Himmelsbeobachtung, die Multi-Messenger-Astronomie (MMA). Sie kombiniert die Signale unterschiedlicher Boten („Messenger“) aus dem All. „Es gibt grundsätzlich vier verschiedene Boten aus dem Kosmos“, erläutert Walter Winter, Leiter der Astroteilchentheorie bei DESY. „Da wäre die elektromagnetische Strahlung, sie reicht von

Ende eines Sterns

In einer Gezeitenkatastrophe wird ein Stern **(1)** von der enormen Schwerkraft eines supermassereichen Schwarzen Lochs zerrissen. Die Schwerkraft wird stärker und stärker, je näher der Stern dem Schwarzen Loch kommt. Das bedeutet auch, dass sie an der etwas näheren Vorderseite des Sterns stärker zerrt als an seiner etwas weiter entfernten Rückseite. Dieser Unterschied kann so groß werden, dass er den Stern mehr und mehr in die Länge zieht **(2)**, bis es ihn schließlich zerreißt **(3)**. Rund die Hälfte der Sternmaterie wurde dabei direkt ins All geschleudert, der Rest sammelte sich auf einer wirbelnden Scheibe um das Schwarze Loch **(4 und 5)**. Mit dieser sogenannten Gezeitenkraft, also dem Unterschied zwischen der Kraft auf die Vorder- und auf die Rückseite, sorgt auch der Mond für die Gezeiten der Meere auf der Erde. Natürlich wirkt die Gezeitenkraft auf den gesamten Planeten. Da das Wasser der Ozeane nicht starr mit dem Rest der Erde verbunden ist, kann es der Gezeitenkraft folgen, hin und her schwappen und damit Ebbe und Flut bilden. Im Fall der Gezeitenkatastrophe ist die Schwerkraft des Schwarzen Lochs allerdings extrem viel größer als die unseres Mondes – die Forschenden schätzen die Masse des gigantischen Schwarzen Lochs auf die von rund 30 Millionen Sonnen.



Eine Animation zeigt den Ablauf der Gezeitenkatastrophe: <https://youtu.be/jgKjZL9EJZ8>



Astrophysik hat im Laufe der Jahrzehnte gelernt, eine verblüffende Fülle an Informationen aus dem Licht der Sterne und anderer astronomischer Objekte zu destillieren. Die Kosmische Strahlung dagegen ist am schwierigsten zu interpretieren. Sie trägt ihren irreführenden Namen, weil sie bei ihrer Entdeckung vor mehr als einem Jahrhundert zunächst für eine unbekannte Form von Strahlung gehalten wurde.

Erst später stellte sich heraus, dass es sich um extrem energiereiche Atomkerne handelt, die permanent aus dem All in die Erdatmosphäre prasseln, vor allem Wasserstoffkerne, von denen einzelne mehr Energie haben können als ein scharf geschmetterter Tischtennisball. „Bis heute ist der Ursprung dieser schnellen Teilchen nicht abschließend geklärt“, betont Winter. „Denn die elektrisch geladenen Atomkerne werden auf ihrem Weg durchs All von zahllosen Magnetfeldern innerhalb und außerhalb von Galaxien abgelenkt, bis ihre Herkunft völlig verschleiert ist.“

Neue Fenster ins All

In den vergangenen Jahren haben Astrophysikerinnen und Astrophysiker neue Beobachtungsmethoden entwickelt und dadurch neue Fenster ins All geöffnet, durch die sich nun erstmals auch Neutrinos und Gravitationswellen astronomisch beobachten lassen. Diese Boten unterscheiden sich fundamental vom Botenteilchen der elektromagnetischen Strahlung, dem Photon.

Im IceCube-Laborgebäude an der Amundsen-Scott-Forschungsstation am Südpol werden die Beobachtungen des Neutrino-Observatoriums live ausgewertet.



Gravitationswellen entstehen nach Albert Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie überall dort, wo Masse beschleunigt wird. Ist die Masse groß genug und wird ausreichend schnell beschleunigt, wie etwa beim Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher, ist diese Vibration der Raumzeit unter Umständen auch in kosmischen Distanzen noch nachweisbar (siehe Seite 26).

Neutrinos sind häufig ein Nebenprodukt kosmischer Teilchenbeschleuniger. „Die Phänomene, die wir mit der Multi-Messenger-Astronomie ins Visier nehmen, gehören immer zum sogenannten nicht-thermischen Universum“, erläutert Marek Kowalski, Leiter der Neutrino-Astronomie bei DESY und einer der MMA-Pioniere. Das meiste Licht im Universum stammt

aus „thermischen“ Brennprozessen: Ein Stern gewinnt seine Energie aus der Kernfusion, also der Verschmelzung von leichten zu schwereren Atomkernen. „Das ist ein vergleichsweise ineffizienter Prozess“, betont Kowalski. „Viel effizienter ist, etwas in ein Schwarzes Loch oder auf ein anderes sehr kompaktes Objekt zu werfen. Dabei werden bis zu zehn Prozent der Ruhemasse als Energie freigesetzt, das ist rund zehnmal so viel wie bei der Kernfusion.“

Bislang wird auch das nicht-thermische Universum vor allem mit Hilfe elektromagnetischer Strahlung durchforstet, etwa mit Radiowellen oder Gammastrahlung, durch die sich kosmische Teilchenbeschleuniger häufig indirekt verraten. Die Neutrino- und auch die Gravitationswellenastronomie stehen noch >>



Nahaufnahme der Gezeitenkatastrophe: Das Schwarze Loch krümmt mit seiner gigantischen Schwerkraft den Raum so stark, dass auch die Rückseite des gleißenden Materiestrudels sichtbar wird. Senkrecht nach oben und unten fließen Materieströme hinaus, in denen Teilchen beschleunigt werden.

am Anfang, aber sie haben bereits einige spektakuläre Entdeckungen gemacht und versprechen einen völlig neuen Zugang insbesondere zu energiereichen Prozessen im Universum – und damit möglicherweise auch zum Ursprung der Kosmischen Strahlung.

Kombination verschiedener Boten

Im Idealfall ergänzen sich die Beobachtungen mit verschiedenen Boten, wie im Fall der Gezeitenkatastrophe. Sie war zunächst mit einem optischen Teleskop entdeckt worden,

das den Himmel regelmäßig nach veränderlichen Phänomenen absucht, der Zwicky Transient Facility (ZTF). Ein halbes Jahr später kam das Neutrino.

Seine Entdeckung löste weitere Beobachtungen in verschiedenen Wellenlängenbereichen der elektromagnetischen Strahlung aus. „Die kombinierten Beobachtungen demonstrieren die Stärke der Multi-Messenger-Astronomie“, sagt Kowalski. „Ohne den Nachweis der Gezeitenkatastrophe wäre das Neutrino nur eines von vielen, und ohne

das Neutrino wäre die Beobachtung der Gezeitenkatastrophe nur eine von vielen. Nur durch die Kombination von beiden konnten wir den kosmischen Teilchenbeschleuniger aufspüren und etwas über die Prozesse in seinem Inneren lernen.“

So verraten Neutrinos auch etwas über die Art der beschleunigten Teilchen. „Neutrinos sind quasi der rauchende Colt eines Protonenbeschleunigers“, erläutert Theoretiker Winter – im Gegensatz dazu werden bei Elektronenbeschleunigern keine Neutrinos erwartet. In der Gezeitenkatastrophe werden demnach wahrscheinlich auch Protonen beschleunigt, die Atomkerne von Wasserstoff. Das Phänomen trägt damit also ebenfalls zum allgemeinen Hagel der Kosmischen Strahlung bei, wenn auch nur zu einem kleinen Anteil.

Das Neutrino hat zwei für die Astronomie besonders interessante Eigenschaften: zum einen

„Neutrinos sind quasi der rauchende Colt eines Protonenbeschleunigers“

Walter Winter, DESY



seine fehlende elektrische Ladung. Es ist elektrisch neutral und wird daher nicht wie die Teilchen der Kosmischen Strahlung von den zahlreichen Magnetfeldern im All abgelenkt. Seine Flugrichtung weist damit direkt zu seinem Ursprung. Zum anderen lässt sich das ultraleichte Elementarteilchen durch nahezu nichts aufhalten und durchdringt mühelos Wände, ganze Planeten und Galaxien. „Mit Neutrinos kann man weiter sehen als mit allen anderen Boten“, betont Winter. Aus demselben Grund lässt sich mit ihnen auch etwa ins Innere eines explodierenden Sterns schauen, ein Bereich, aus dem kein Lichtteilchen (Photon) entströmen kann.

Initialzündung der Multi-Messenger-Astronomie

„Mit der elektromagnetischen Strahlung sieht man nur die Oberfläche eines Objekts“, erläutert Kowalski. „Wenn man etwas über das Innere der Sonne oder eines explodierenden Sterns oder etwa verschmelzender Neutronensterne lernen möchte, muss man andere Boten beobachten.“ Das erste Multi-Messenger-Signal dieser Art wurde am 24. Februar 1987 zufällig aufgefangen, als ein Schauer von Neutrinos verschiedene Detektoren auf der Erde anschlagen ließ, die für andere Untersuchungen gebaut worden waren. Drei Stunden später entdeckten optische Teleskope eine Supernova-Explosion eines Sterns in der Großen Magellanschen Wolke,

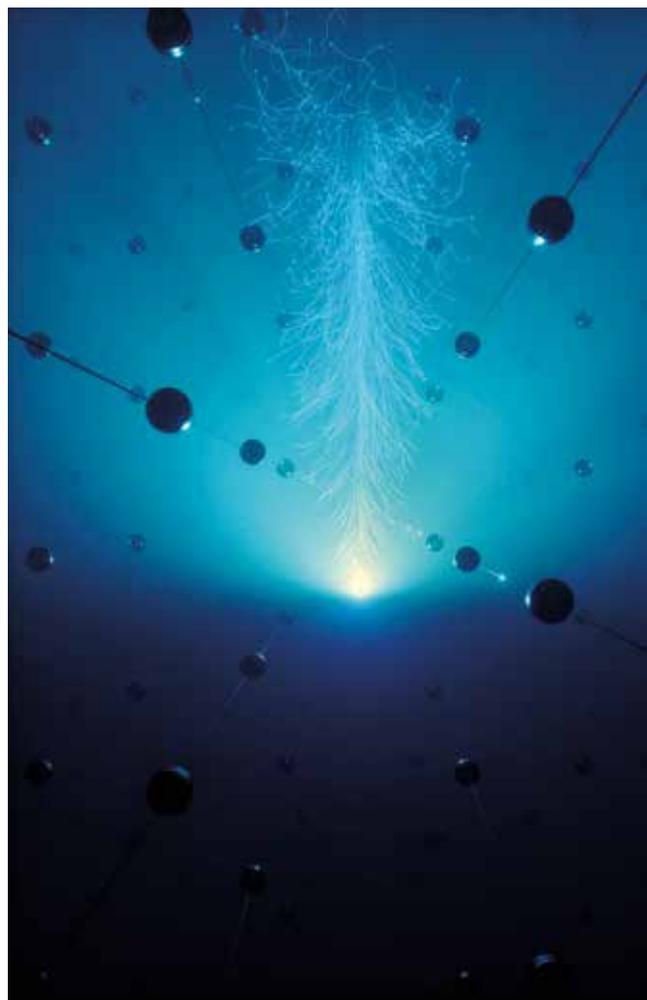
einer Satellitengalaxie unserer Milchstraße.

Die Neutrinos waren beim Kollaps des Sternenkerns entstanden und konnten ungehindert aus dem Zentrum des sterbenden Sterns entkommen. Dagegen erreichte die Explosion erst rund drei Stunden später die Sternoberfläche und wurde damit für irdische Teleskope sichtbar. Die zufällige Beobachtung bestätigte die Vorstellung, dass bei einer Kernkollaps-Supernova große Mengen Neutrinos entstehen und ein erheblicher Teil der Explosionsenergie in Form der ultraleichten Elementarteilchen abgestrahlt wird.

Auch bei diesem Ereignis war die Kombination unterschiedlicher Boten Voraussetzung – ohne die Ortung der Supernova mit optischen Teleskopen hätte niemand gewusst, woher der plötzliche Neutrinoschauer kam. „Die Supernova 1987A war so etwas wie die Initialzündung für die Multi-Messenger-Astronomie“, sagt Kowalski.

Eine gezielte Beobachtung von Neutrinos aus dem All war damals allerdings noch nicht möglich. „Man wusste schon lange, dass das Neutrino ein interessantes Teilchen für die Astronomie sein könnte“, sagt Anna Franckowiak, die an der Universität Bochum eine Arbeitsgruppe zur Multi-Messenger-Astronomie leitet und bei IceCube die Datenanalysen koordiniert. „Aber das Neutrino ist schwierig nachzuweisen.“ Denn seine geisterhafte Eigenschaft, ungehindert durch Wände und

Tief im ewigen Eis können kosmische Neutrinos eine Teilchenlawine auslösen, deren bläulicher Schimmer von den empfindlichen IceCube-Instrumenten aufgezeichnet wird.



ganze Sterne zu gehen, macht das Teilchen auch sehr schwer fassbar – fast alle Neutrinos durchqueren einen Detektor unentdeckt.

Überlichtblitz

Deshalb hat eine internationale Gemeinschaft das Observatorium IceCube gebaut und im ewigen Eis der Antarktis 86 Stahlrossen versenkt. An diesen hängen insgesamt 5160 empfindliche Nachweisgeräte, sogenannte Photovervielfacher, bis zu 2,5 Kilometer tief unter der Oberfläche. Insgesamt deckt die Installation einen Kubikkilometer unterirdisches Eis ab, daher der Name. Die tausenden Photovervielfacher spähen in der Finsternis nach dem schwachen bläulichen Schimmer, >>



Die Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke hatte sich einige Stunden vorab durch einen Neutrinoschauer angekündigt. Die Sternexplosion hat zwei äußere und einen inneren Ring sowie einen zentralen Überrest hinterlassen (künstlerische Darstellung).

den ein Neutrino auslöst, wenn es zufällig mit einem Eismolekül kollidiert. Es erzeugt dann eine Kaskade an Folgeteilchen, die schneller als das Licht durch das Eis jagen.

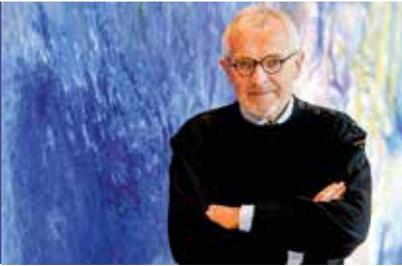
„Natürlich muss sich auch die unterirdische Teilchenlawine an Einsteins absolute Geschwindigkeitsbeschränkung halten, die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum“, erläutert Franckowiak. „Im Eis liegt die Lichtgeschwindigkeit jedoch etwas darunter, genauso wie beispielsweise in Glas oder Kunststoff,

zu der 700 Millionen Lichtjahre entfernten Gezeitenkatastrophe im Sternbild Delphin zurückverfolgt, sondern auch ein bereits 2017 registriertes kosmisches Neutrino zu einer fast vier Milliarden Lichtjahre entfernten Aktiven Galaxie im Sternbild Orion. Im Zentrum der fernen Galaxie hat ein supermassereiches Schwarzes Loch große Mengen Materie in einem Strudel versammelt. Es verschlingt das meiste davon, schleudert jedoch einen Teil auch in Form scharf gebündelter Strahlen,

sogenannter Jets, senkrecht nach oben und unten ins All hinaus. Von der Erde aus blicken wir genau in einen dieser Jets hinein. „Wir gucken sozusagen in den Lauf eines Gewehrs“, beschreibt Franckowiak.

Kolossaler Teilchenbeschleuniger

Auch in diesem sogenannten Blazar ist ein kolossaler kosmischer Teilchenbeschleuniger am Werk. Das belegt die IceCube-Entdeckung, untermauert durch den Fund weiterer Neutrinos aus der Richtung



„Wir sehen hier vielleicht erst die Spitze des Eisbergs“

Francis Halzen,
Universität von Wisconsin-Madison

was der Grund für die Lichtbrechung ist und damit unter anderem Brillen oder Lupen ermöglicht.“ Die energiereichen Teilchen dürfen sich daher durch das Eis ein Quäntchen schneller bewegen als das leicht gebremste Licht und erzeugen dabei eine Art optischen Überschallknall, das sogenannten Tscherenkow-Licht. Aus der Auswertung dieser Lichtsignale im extrem klaren unterirdischen Eis kann IceCube die Energie und die Herkunftsrichtung des ursprünglichen kosmischen Neutrinos bestimmen. Auf diese Weise haben die Forscherinnen und Forscher nicht nur das Neutrino vom Oktober 2019



Aus dem Zentrum eines Blazars schießt ein scharf gebündelter Materiejets, der mit seinen starken Magnetfeldern Teilchen extrem beschleunigt.



Verschmelzende Riesengalaxien (künstlerische Darstellung) könnten drei Arten kosmischer Boten entsenden: Licht, Neutrinos und Gravitationswellen.

des Blazars. Dank der Kombination mit einer groß angelegten Beobachtungskampagne über nahezu alle Wellenlängenbereiche des elektromagnetischen Spektrums hatten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler damit erstmals eine konkrete Quelle der Kosmischen Strahlung außerhalb unserer eigenen Galaxie direkt geortet. „Und wenn man ein Beispiel eines solchen Phänomens findet, dann gibt es das auch noch öfter“, erläutert Franckowiak. „Im Universum gibt es keine Unikate. **Was wir also lernen, ist, dass Blazare Protonen auf sehr hohe Energien beschleunigen können.**“ Eine wichtige Bestätigung bei der Suche nach den kosmischen Teilchenbeschleunigern als Quelle der Kosmischen Strahlung. Aktive Galaxien hatten die Forscherinnen und Forscher schon lange im Verdacht.

„IceCube registriert derzeit ungefähr zehn sehr energiereiche kosmische Neutrinos pro Jahr“, berichtet Franckowiak. „Wir wissen bei den meisten nicht, woher sie kommen. Wir wissen nur, sie kommen aus dem Kosmos, jenseits unserer eigenen Galaxie.“ Erst zweimal ist es dank der Kombination mit anderen Beobachtungen gelungen, die Quelle zu orten. Die Multi-Messenger-Astronomie steht also noch am Anfang, verspricht jedoch eine aufregende neue Ära. „Wir sehen hier vielleicht erst die Spitze des Eisbergs“, hofft IceCube-Chefwissenschaftler Francis

Halzen von der Universität von Wisconsin-Madison in den USA. „Künftig erwarten wir viele weitere solcher Verbindungen zwischen energiereichen Neutrinos und ihren Quellen.“ Helfen soll dabei auch der großräumige Ausbau des antarktischen Neutrinoobservatoriums zu IceCube-Gen2, wodurch sich die Zahl der beobachteten kosmischen Neutrinos verzehnfachen kann (siehe Seite 24).

Spätestens damit hoffen die Neutrino-Astronomen dann auch auf gemeinsame Signale mit den Gravitationswellendetektoren. Die haben bislang vor allem verschmelzende Schwarze Löcher beobachtet, Ereignisse, die wortwörtlich im

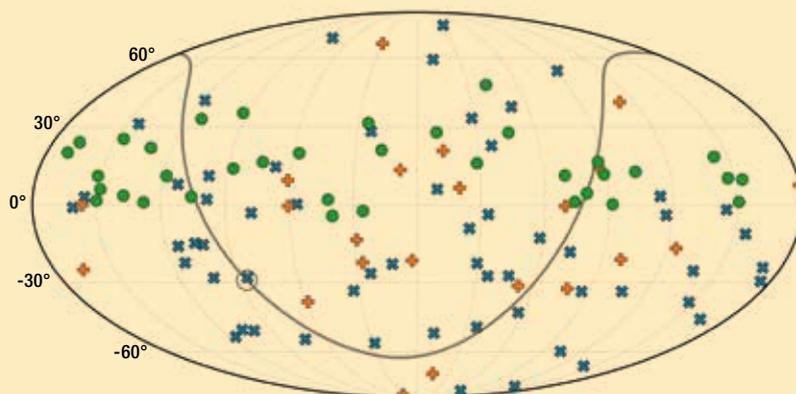
„Das Verschmelzen von zwei Galaxien könnte ein fantastisches Multi-Messenger-Ereignis sein“

Marek Kowalski, DESY

Dunkeln stattfinden und kein Licht aussenden. In einem Fall registrierten die Gravitationswellenantennen jedoch das Signal zweier kollidierender Neutronensterne, und dieser kosmische Crash ließ sich auch im Bereich elektromagnetischer Strahlung beobachten, bis hin zur Gammastrahlung. „Bei solchen Kollisionen sollten aber auch extrem energiereiche Neutrinos entstehen, und IceCube-Gen2 könnte in der Lage sein, diese Teilchen nachzuweisen“, sagt Kowalski. Die Beobachtung könnte beispielsweise erhellen, was während der Kollision im Inneren der Neutronensterne vor sich geht.

Neue Ereignisklasse

Auf so ein Himmelsereignis, das mit allen drei Boten – elektromagnetische Strahlung, Neutrinos und Gravitationswellen – beobachtet wurde, wartet die Astronomie noch. „Auch das Verschmelzen von >>



Neutrinhimmel

Während wir im sichtbaren Licht eine detailreiche Himmelskarte zeichnen können, besteht der IceCube-Neutrinhimmel bislang noch aus einzelnen Ereignissen. Gezeigt sind hier die Herkunftsrichtungen kosmischer Neutrinos auf einer Ansicht der kompletten Himmelskugel. Grün markiert sind gut bestimmte Neutrinos, bei rot markierten ist die Energie nicht sehr gut bekannt, bei blau markierten die Herkunftsrichtung unsicher.

DAS CHERENKOV TELESCOPE ARRAY

Gammastrahlenobservatorium der nächsten Generation

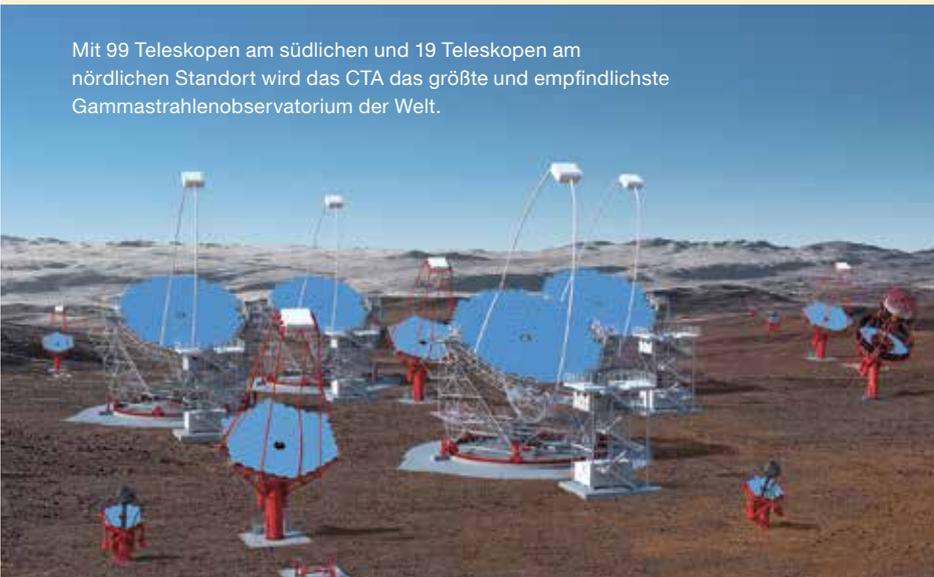
Kosmische Gammastrahlung spielt bei der Beobachtung des nicht-thermischen Universums eine besondere Rolle, und damit auch für die Multi-Messenger-Astronomie. Das Gammalicht ist immer das Produkt energiereicher Prozesse wie etwa kosmischer Teilchenbeschleuniger oder zum Beispiel katastrophaler Crashes von Neutronensternen. Kosmische Gammastrahlung kann damit auch auf lohnende Ziele für die Beobachtung mit anderen Boten wie Neutrinos oder Gravitationswellen hinweisen. Allerdings ist auch sie nicht leicht nachzuweisen.

Das Cherenkov Telescope Array (CTA) wird das größte Observatorium der Welt für kosmische Gammastrahlung. Es wird an zwei Standorten aufgebaut, einem auf der Südhalbkugel und einem auf der Nordhalbkugel, um den gesamten Himmel beobachten zu können. Der südliche Standort liegt in der extrem trockenen Atacama-Wüste in den chilenischen Anden. Nahe des Paranal-Observatoriums der Europäischen Südsternwarte ESO werden in den kommenden Jahren insgesamt 99 Gammastrahlenteleskope drei verschiedener Größen aufgebaut. Der nördliche Standort auf der Kanareninsel La Palma wird mit 19 Teleskopen bestückt. Das CTA wird mit seiner enormen Sammelfläche und breiten Himmelsabdeckung eine zehnmal höhere Empfindlichkeit erreichen als bestehende Gammastrahlenobservatorien. An dem globalen Projekt beteiligen sich mehr als 1400 Wissenschaftler und Ingenieure aus 31 Ländern.

Tscherenkow-Teleskope beobachten ein bläuliches Leuchten, das von der kosmischen Gammastrahlung in der Erdatmosphäre ausgelöst wird. Die ursprüngliche Gammastrahlung ist für die Teleskope nicht sichtbar, sie wird von der Erdatmosphäre absorbiert. Dabei lösen die energiereichen Gammaphotonen jedoch eine Lawine von Folgeteilchen aus, die durch fortwährende Stöße anwächst. Diese Teilchen rasen etwas schneller durch die Luft als das Licht (aber nicht schneller als das Licht im Vakuum, die absolute Geschwindigkeitsgrenze). Dabei entsteht – ähnlich dem Überschallknall bei Flugzeugen – das bläulich schimmernde Tscherenkow-Licht, das Informationen über die Herkunftsrichtung und die Energie des ursprünglichen kosmischen Gammaphotons enthält.

www.cta-observatory.org

Mit 99 Teleskopen am südlichen und 19 Teleskopen am nördlichen Standort wird das CTA das größte und empfindlichste Gammastrahlenobservatorium der Welt.



zwei Galaxien könnte ein fantastisches Multi-Messenger-Ereignis sein“, meint Kowalski. „Da wird so viel Energie freigesetzt. Und es gibt alle Bausteine, um Gravitationswellen zu erzeugen und um Neutrinos zu produzieren. Wenn zwei Galaxien mit all dem ganzen Anhang verschmelzen, kollidiert sehr viel Materie auf großen Skalen, und es entstehen Schockregionen, in denen Teilchen massiv beschleunigt werden. Das wäre eine ganz neue Ereignisklasse.“ Und das wäre nicht nur eine interessante Beobachtung an sich, sondern könnte auch neue Erkenntnisse über die Evolution des Weltalls bringen. Denn bis heute ist nicht ganz verstanden, wie Galaxien entstehen und sich entwickeln.

Die Astronomiegemeinschaft beginnt erst, das Instrumentarium der Multi-Messenger-Astronomie zu verstehen und dank der ersten Erkenntnisse zu optimieren. So soll nicht nur IceCube ausgebaut werden, es sind auch weitere Neutrino-Observatorien in Planung – ebenso neue Gravitationswellenantennen wie das Einstein-Teleskop und das im Weltraum stationierte Projekt LISA (Laser Interferometer Space Antenna). Und das Gammastrahlenobservatorium CTA (Cherenkov Telescope Array) wird die Beobachtung des Hochenergiekosmos mit Hilfe der energiereichsten elektromagnetischen Strahlung auf ein ganz neues Niveau heben.

„Wir stehen wirklich noch am Anfang, wir haben momentan ein Ereignis hier und eins dort“, sagt Kowalski. „Aber wenn wir jetzt die Empfindlichkeit bei allen drei Methoden gleichzeitig erhöhen, also bei der Beobachtung elektromagnetischer Strahlung und von Gravitationswellen und von Neutrinos, dann steigt die Ausbeute in der Kombination gigantisch, weil Fortschritte bei einer Methode sich auch jeweils auf die anderen beiden auswirken. Was wir damit entdecken werden, wissen wir noch nicht. Aber so viel ist sicher: Es wird uns überraschen.“

Die Vermessung der Sterne

Weißt du, wie viel Sternlein stehen ...“ – die in diesem alten Schlaflied aufgeworfene Frage lässt sich heute recht ordentlich beantworten: Wer in einer klaren Nacht und möglichst fern der Zivilisation gen Himmel schaut, kann bis zu 6000 funkelnde Leuchtpunkte am Firmament zählen. Moderne Großteleskope vermögen noch sehr viel tiefer ins Weltall zu spähen. Mit ihnen lassen sich mittlerweile weit mehr als zehn Milliarden einzelne Sterne erkennen. Doch das ist nur ein Klacks verglichen mit der Gesamtzahl im Universum: **Schätzungsweise zwei Billionen Galaxien dürften sich im Kosmos finden.** Und da Galaxien oft aus zig Milliarden Sternen bestehen, folgt daraus eine astronomische Größenordnung von 100 Trilliarden – schlicht und ergreifend unvorstellbar.

Doch mit reinem Abzählen gibt sich die Astronomiegemeinschaft nicht zufrieden: Sie will möglichst viele Details über all die fernen Sterne herausfinden – unter anderem ihre Größe. Die kann erheblich schwanken. Als die kleinsten Vertreter gelten die Neutronensterne: Diese kompakten Überbleibsel einst strahlender Sonnen messen gerade mal 20 Kilometer, also nicht mehr als eine Großstadt. Dagegen ist der größte bekannte Stern, ein roter Superriese, mehr als 2000 Mal so groß wie die Sonne.

Doch wie lässt sich ein Sternendurchmesser überhaupt feststellen? Eine vertrackte Frage, schließlich erscheinen von der Erde aus nahezu alle Sterne gleich groß – funkelnde Punkte, die sich im Wesentlichen durch ihre Helligkeit unterscheiden. Eine relativ simple Winkelmessung, mit der sich zum Beispiel die Größe von Sonne und Mond abschätzen lässt, fällt in der Regel flach. Stattdessen mussten sich die Fachleute andere, indirekte Methoden einfallen lassen: Unter anderem analysieren sie die Spektren und bestimmte Interferenzmuster der Himmelskörper. Diesem Instrumentenkoffer haben Fachleute nun zwei neue Werkzeuge hinzugefügt, jeweils unter Mitwirkung von DESY.

Der Trick hinter beiden Innovationen: eine clevere Zweitverwertung. Denn die Arbeitsgruppen nutzen ein Observatorium, das eigentlich für ein ganz anderes Einsatzfeld als die Sternvermessung entworfen wurde: Für gewöhnlich fahnden die vier VERITAS-Teleskope im US-Bundesstaat Arizona nach schwachen bläulichen

Leuchterscheinungen, die entstehen, wenn energiereiche Gammastrahlung aus fernen Winkeln des Alls auf die Erdatmosphäre trifft. **Allerdings lässt sich dieses Leuchten nur in dunklen mondlosen Nächten beobachten.** Also sannen die Fachleute nach einer sinnvollen Verwendung für die restliche Zeit – und stießen auf die Größenvermessung ferner Sterne. Die Voraussetzungen sind bestens: Die vier VERITAS-Teleskope können selbst feinste Lichtschwankungen registrieren, auch solche von Sternenlicht.

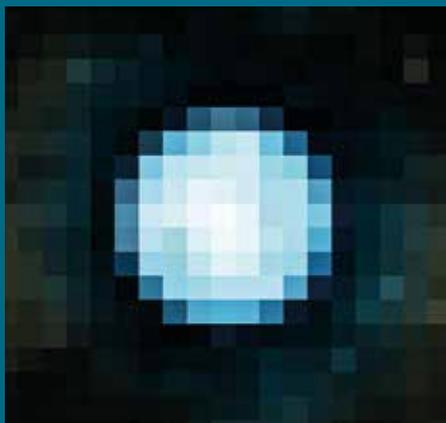
Die eine Methode nutzt das Herumgeistern himmlischer Vagabunden im Sonnensystem: **Zieht ein Asteroid zufällig vor einem Stern vorbei, erzeugt das einen kurzen Lichteffect, ein Beugungsmuster.** Form und Ausmaß des Musters erlauben Rückschlüsse auf die Größe der Lichtquelle, also des Sterns. VERITAS gelang es, das Beugungsmuster eines Sterns aufzuschnappen, der am 22. Februar 2018 kurzzeitig vom Asteroiden Imprinetta bedeckt wurde. Das Resultat: Der Stern ist elfmal so groß wie die Sonne – und zählt damit zur Klasse der Roten Riesen. Drei Monate später schob sich Asteroid Penelope vor einen weiteren Stern. Der entpuppte sich als gut doppelt so groß wie die Sonne. Im Prinzip sollte sich mindestens eine Asteroiden-Sternbedeckung pro Woche beobachten lassen – was die neue Technik zu einem wertvollen Verfahren der Sternvermessung machen könnte.

Bei der anderen Methode belebten die Fachleute eine alte Methode neu – die Intensitätsinterferometrie. **Dank ultraschneller Elektronik ließen sich die Lichtsignale der vier Teleskope kombinieren.** Daraus konnte ein ausgefeilter Algorithmus den

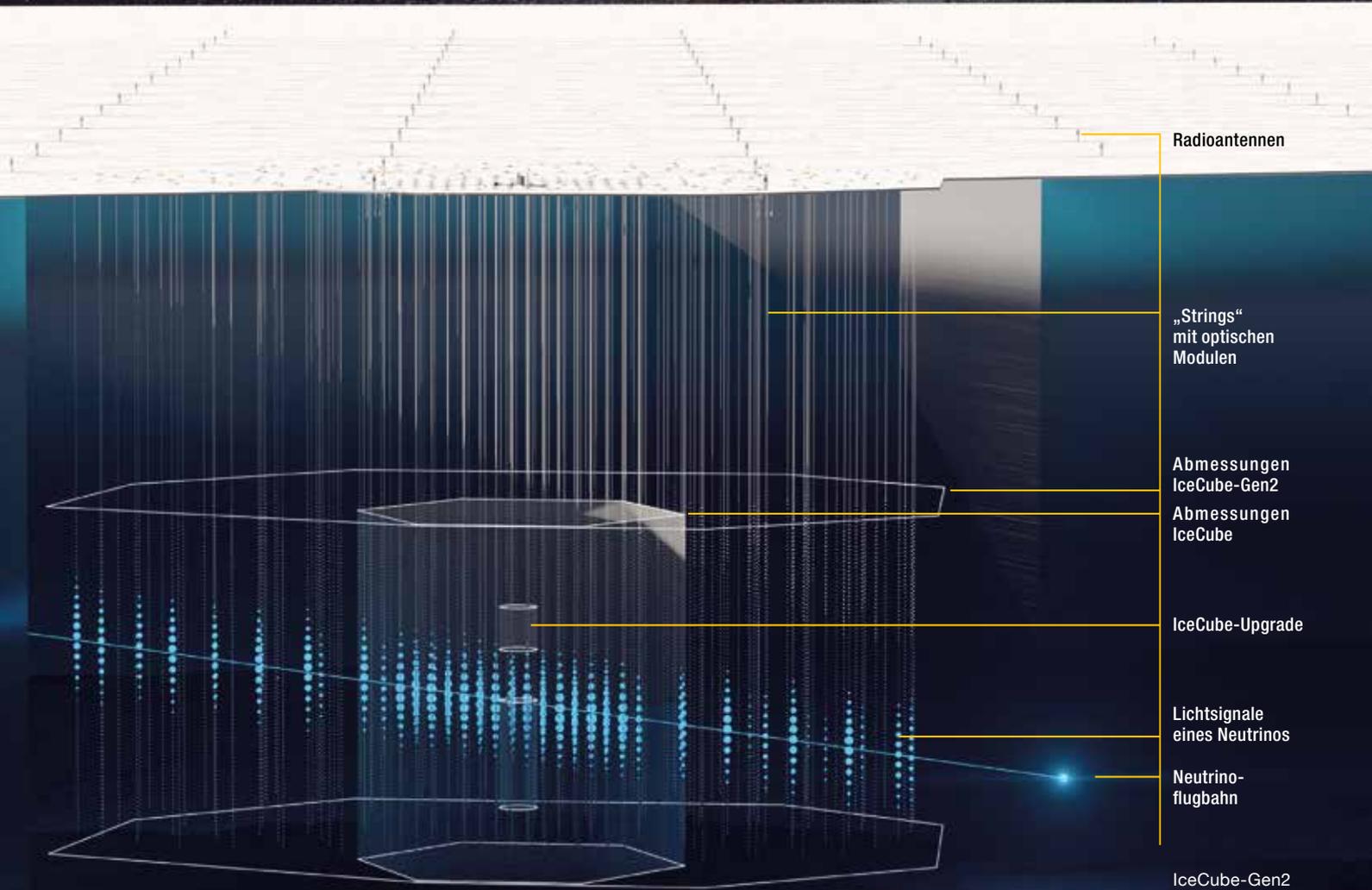
Durchmesser zweier Sterne präzise bestimmen und frühere Messungen bestätigen: Der blauen Riese Beta Canis Majoris ist zehnmal, der Überriese Epsilon Orionis sogar 30 Mal größer als die Sonne. Das neue Verfahren wird sich auch auf künftige Gammateleskope übertragen lassen: So dürfte mit den rund 100 Einzelteleskopen des Cherenkov Telescope Array CTA eine weitaus präzisere Sternvermessung machbar sein als bislang.

.....
Nature Astronomy, DOI: 10.1038/s41550-020-1143-y

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



Durch Zusammenschalten mehrerer Teleskope in größerem Abstand könnten sich möglicherweise sogar Details auf Sternoberflächen abbilden lassen (künstlerische Darstellung).



Radioantennen

„Strings“
mit optischen
ModulenAbmessungen
IceCube-Gen2Abmessungen
IceCube

IceCube-Upgrade

Lichtsignale
eines NeutrinosNeutrino-
flugbahn

IceCube-Gen2 soll zehnmals mehr und bis zu tausendfach energiereichere Neutrinos aufzeichnen als die existierende Anlage.

EINE NEUE DIMENSION DER NEUTRINO-ASTRONOMIE

Der Ausbau des Südpol-Observatoriums IceCube verspricht neue Einblicke in kosmische Phänomene

Das Neutrino-Observatorium IceCube im ewigen Eis der Antarktis hat mehrere Meilensteine für die noch junge Disziplin der Neutrino-Astronomie erreicht. Der riesige Detektor am Südpol soll nun ausgebaut und enorm vergrößert werden: IceCube-Gen2, so der Projektname, könnte kosmische Phänomene erkunden, die bislang noch im Verborgenen liegen, wie Marek Kowalski erläutert, Leitender Wissenschaftler bei DESY und Professor

an der Humboldt-Universität zu Berlin. DESY ist der größte europäische Partner bei IceCube.

femto: Seit seiner Fertigstellung 2010 sucht IceCube erfolgreich nach Neutrinos, die aus den Tiefen des Weltalls kommen. Jetzt ist geplant, die Anlage deutlich zu erweitern. Wie soll der IceCube-Detektor der zweiten Generation aussehen?

Marek Kowalski: Bislang umspannt IceCube im antarktischen Eis ein Volumen von einem Kubikkilometer. Künftig wollen wir dieses Volumen in etwa verzehnfachen – IceCube-Gen2 soll also circa zehnmals größer werden als der heutige Detektor. Der besteht aus etwas mehr als 5000 Sensorkugeln, die kilometertief im Eis versenkt sind und bestimmte Lichtpulse messen, die von hoch-

energetischen Neutrinos stammen. Beim neuen Detektor wollen wir 12 000 weitere Sensoren im Eis verankern, die allerdings deutlich empfindlicher sind als die Sensoren der ersten Generation. Außerdem planen wir, eine weitere Messtechnik zu installieren, sie basiert auf Radioantennen. Denn die Neutrinos erzeugen im Eis nicht nur Lichtpulse, sondern auch kurze Radioblitzes, die sich ebenfalls zum Nachweis der Teilchen nutzen lassen. Mit dieser Technik könnten sich Neutrinos mit extrem hoher Energie messen lassen – etwas, das der bisherige Detektor nicht kann. Denn Radiowellen können sich über mehrere Kilometer im Eis ausbreiten, so dass wir die Ausmaße des neuen Detektors in diesem Energiebereich noch einmal deutlich vergrößern können.

femto: Was wäre damit gewonnen, was wird IceCube-Gen2 besser können als die existierende Anlage?

Marek Kowalski: Der neue Detektor ist zehnmals größer als der bisherige, dadurch wird er zehnmals mehr kosmische Neutrinos auffangen können. Die Folge: Bislang mussten wir Jahre warten, um eine besonders aufregende Beobachtung zu machen. Mit IceCube-Gen2 dürfte das alle paar Monate passieren. Gleichzeitig wird sich unsere Sensitivität auf Punktquellen verbessern. Damit könnten wir dann deutlich besser jene Objekte im All identifizieren, von denen auffällig viele Neutrinos kommen. Und: Mit Hilfe der neuen Radiotechnologie wird der Detektor extrem hochenergetische Ereignisse registrieren können – Neutrinos mit Energien, die bis zu 1000 Mal höher sind als die bislang von IceCube nachgewiesenen. Das dürfte uns völlig neue Möglichkeiten eröffnen.

femto: Welche wissenschaftlichen Fragen soll der neue Detektor beantworten können, gerade im Hinblick auf die Multi-Messenger-Astronomie?

Marek Kowalski: Zum Beispiel die Frage, was im Detail beim Verschmelzen von zwei Neutronensternen passiert. Im Jahr 2017 ließ sich so eine Kollision erstmals mit Hilfe von Gravitationswellen beobachten – eine fantastische Entdeckung, bei der die Fachwelt sehr viel über diesen kosmischen Gewaltakt gelernt hat. Bei solchen Kollisionen sollten aber auch extrem hochenergetische Neutrinos entstehen, und IceCube-Gen2 müsste in der Lage sein, diese Teilchen nachzuweisen. Dadurch ließen sich wertvolle Zusatzinformationen etwa darüber gewinnen, was sich im Inneren der Neutronensterne abspielt. Ein weiteres Highlight wäre, wenn wir eine Supernova, also eine Sternexplosion, in unserer galaktischen



„Der neue Detektor ist zehnmals größer, dadurch wird er zehnmals mehr kosmische Neutrinos auffangen können“

Marek Kowalski, DESY

Nachbarschaft beobachten könnten – und zwar zeitgleich mit Neutrinos, Gravitationswellen und auch mit weiteren Teleskopen. Aber IceCube-Gen2 wird auch in der Lage sein, die Eigenschaften des Neutrinos präziser zu vermessen. Damit könnten wir dieses seltsame Elementarteilchen besser verstehen.

femto: Wie teuer dürfte IceCube-Gen2 werden und wann könnten – eine Bewilligung vorausgesetzt – die Bauarbeiten losgehen?

Marek Kowalski: Mittlerweile konnten wir viel Erfahrung sammeln, wie sich ein solcher Detektor effektiv bauen lässt. Deswegen soll IceCube-Gen2, obwohl er so viel größer ist

als die bisherige Anlage, mit rund 400 Millionen US-Dollar nicht viel teurer sein. Die neuen, besseren Sensorkugeln können wir demnächst schon im Rahmen eines IceCube-Upgrades erproben, bei dem 750 weitere Sensoren im Eis versenkt werden. Die Bauarbeiten für IceCube-Gen2 könnten dann 2024 beginnen und würden etwa acht Jahre in Anspruch nehmen. 2032 könnte der neue Detektor fertig sein.

femto: Auf der Welt sind noch andere Neutrinoobservatorien im Bau – KM3NeT im Mittelmeer und Baikal-GVD in Russland. Außerdem ist mit P-ONE im Pazifik eine weitere Anlage in Planung. Sehen Sie diese Projekte eher als Konkurrenz oder als Ergänzung?

Marek Kowalski: Diese Teleskope sind im Wesentlichen komplementär, denn sie werden andere Himmelsregionen beobachten als IceCube. Sie sind also eine Ergänzung. Deshalb wünsche ich mir, dass diese Anlagen möglichst schnell in Betrieb gehen und Ergebnisse produzieren – das würde unser Feld sehr bereichern. Und selbst, wenn uns diese Teleskope die eine oder andere Erkenntnis wegschnappen sollten, wäre das im Sinne der Wissenschaft positiv und würde die Forschung voranbringen. Deshalb hoffe ich, dass alle Projekte zum Laufen kommen. Denn Konkurrenz belebt das Geschäft.

.....
www.icecube-gen2.de

Verschmelzende
Schwarze Löcher senden
Gravitationswellen aus,
die noch in Milliarden
Lichtjahren Entfernung
messbar sein können
(künstlerische Darstellung).

DAS **BEBEN** DER RAUMZEIT

Mit Gravitationswellenantennen belauschen Astrophysiker den Kosmos

Erst 2015 wurden Gravitationswellen überhaupt entdeckt, doch schon heute scheinen sie für die Astrophysik unverzichtbar. In manchen Fällen ergänzen sie sich ideal mit anderen Beobachtungstechniken und sind damit ein zentrales Element der Multi-Messenger-Astronomie.

Als Albert Einstein 1915 seine Allgemeine Relativitätstheorie präsentierte, frappte er Fachwelt ebenso wie Laien. Denn das hochabstrakte Formelwerk zeichnete ein komplett neues Bild der Gravitation: Schwerkraft

entsteht dadurch, dass eine Masse den Raum und die Zeit um sich herum krümmt. Bald darauf war klar, dass Einsteins Theorie eine spektakuläre Konsequenz hat: Bei kosmischen Gewaltakten im All, etwa wenn zwei Sterne zusammenstoßen, sollte sich dort die Gravitation so rapide ändern, dass das regelrechte Dellen in die Raumzeit schlägt. Diese Dellen würden sich dann lichtschnell im Kosmos ausbreiten – als Gravitationswellen. Zwar glaubte Einstein zeitlebens

nicht, dass sich diese Wellen jemals nachweisen lassen – sie schienen ihm schlicht zu schwach für irdische Sensoren. Doch 2015, hundert Jahre nach der Geburt der Allgemeinen Relativität, bewiesen zwei kilometerlange Detektoren in den USA das Gegenteil: Am 14. September registrierte die Anlage namens LIGO in ihren Lasersignalen ein winziges Zittern. Nach sorgfältigen Analysen blieb eine einzige Erklärung: In einer Entfernung von 1,3 Milliarden Lichtjahren hatten sich zwei Schwarze

Löcher erst lauend umkreist, um dann mit mächtigem Wumms zu verschmelzen und dabei Gravitationswellen auszusenden. Mehr als eine Milliarde Jahre später erreichten sie die Erde als ein schwaches, aber durchaus vernehmlisches Beben der Raumzeit.

Als das LIGO-Team im Februar 2016 das Resultat öffentlich verkündete, feierte die Welt eine wissenschaftliche Sensation, für die es im Jahr darauf den Physik-Nobelpreis gab: Mit der Entdeckung der Gravitationswellen hatte LIGO die Allgemeine Relativitätstheorie – einen Grundpfeiler der Physik – eindrucksvoll bewiesen. Der Fachwelt aber war etwas anderes noch wichtiger: „Wir haben das Fenster zu einer völlig neuen Beobachtungsmethode geöffnet, der Astronomie mit Gravitationswellen“, schwärmte LIGO-Direktor David Reitze noch am Tag der Veröffentlichung.

Globales Netzwerk

Der Grund für die Euphorie: Die allermeisten Teleskope fangen die verschiedensten Spielarten von elektromagnetischen Wellen auf, zum Beispiel Licht, Röntgen- oder Wärmestrahlung. Doch manche Objekte im All machen sich auch

oder ausschließlich durch andere Signale bemerkbar: Sie speien rasend schnelle Teilchen aus, zum Beispiel geisterhafte Neutrinos – oder eben Gravitationswellen.

„Deren Frequenzen liegen unter anderem im Schallbereich“, sagt Rafael Porto, Leitender Wissenschaftler bei DESY. „Damit können wir das Universum also nicht nur betrachten, sondern auch belauschen.“

Seit 2015, der erstmaligen Detektion der Gravitationswellen, hat sich die Messtechnik deutlich verbessert: Schritt für Schritt wurden die beiden LIGO-Detektoren empfindlicher gemacht, und mit Virgo in Italien und nun auch KAGRA in Japan kamen zwei weitere Anlagen hinzu. Sie alle bilden mittlerweile ein globales Netzwerk von Gravitationswellenantennen. Dessen wissenschaftliche Ausbeute kann sich



„Wir haben das Fenster zu einer völlig neuen Beobachtungsmethode geöffnet“

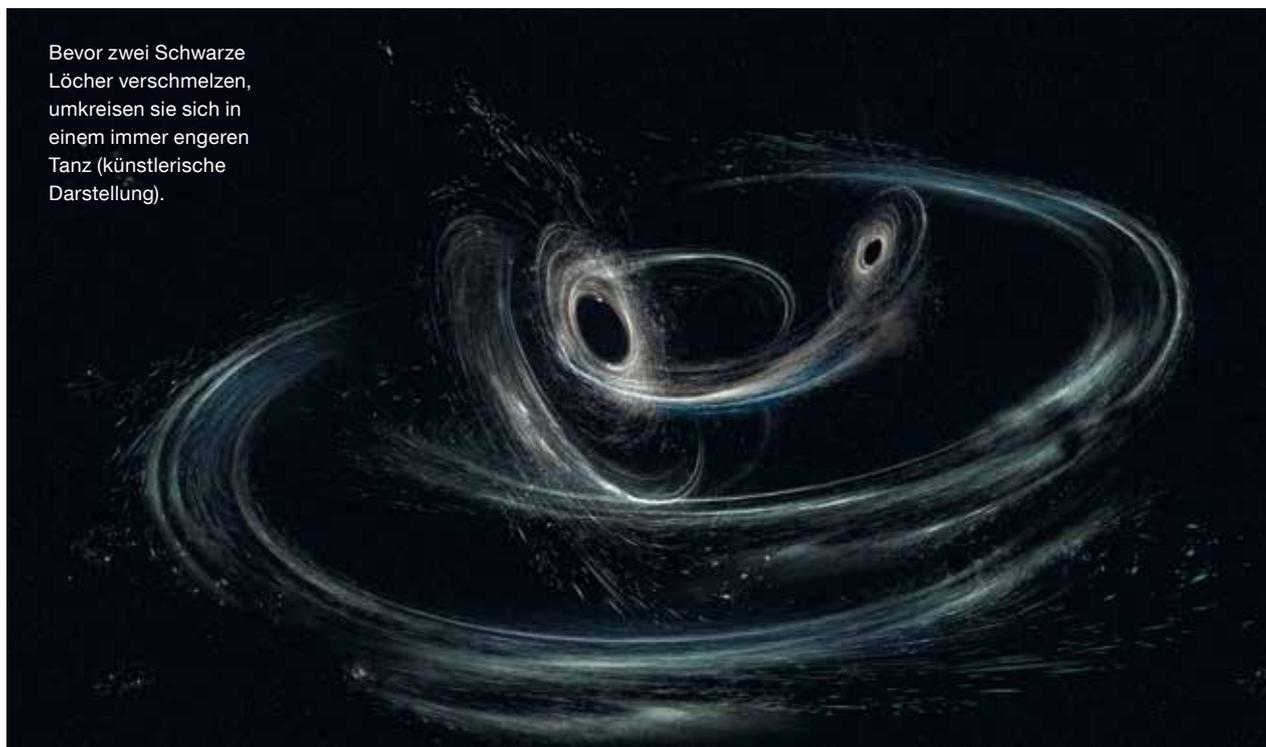
David Reitze, LIGO



Die beiden Arme des Virgo-Observatoriums in Italien erstrecken sich je drei Kilometer durch die Toskana.

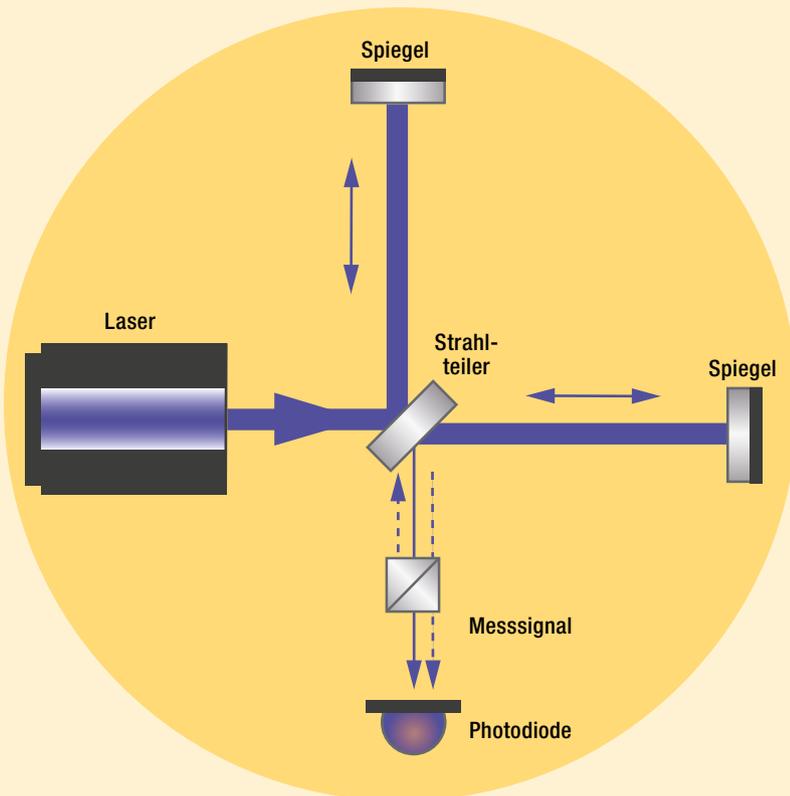
sehen lassen: Bis Ende 2020 gingen den Detektoren mehrere Dutzend Ereignisse ins Netz, allesamt hervorgerufen durch unvorstellbar wuchtige Zusammenstöße von ungemein massiven Himmelskörpern. >>

Bevor zwei Schwarze Löcher verschmelzen, umkreisen sie sich in einem immer engeren Tanz (künstlerische Darstellung).



SO FUNKTIONIERT EIN GRAVITATIONSWELLENDETEKTOR

Laser messen Längenunterschiede kleiner als ein Atomkerndurchmesser



Ein Gravitationswellendetektor ist im Grunde ein überdimensionaler Zollstock: Er misst eine Streckenlänge, allerdings ultragenau. Basis sind Laserstrahlen, die in zwei kilometerlangen, luftleer gepumpten Röhren hin- und herlaufen, reflektiert von vibrationsgedämpften Spezialspiegeln.

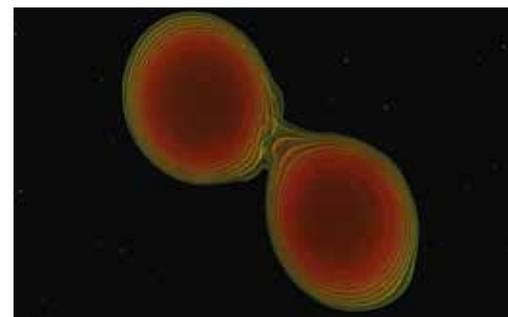
Beide Röhren stehen dabei senkrecht zueinander. Kommt eine Gravitationswelle vorbei, dehnt und staucht sie die kilometerlangen Laserarme um ein winziges Bisschen, um den Bruchteil eines Atomkerndurchmessers. Das Entscheidende: Wegen ihrer unterschiedlichen Ausrichtung werden die beiden Arme geringfügig anders traktiert – der eine etwas mehr, der andere ein bisschen weniger.

Messbar wird dieser feine Unterschied, indem beide Laserstrahlen gemeinsam auf einen empfindlichen Lichtsensor gelenkt werden. Die Lichtwellen der Laserstrahlen überlagern sich dort, es entsteht ein Hell-Dunkel-Muster. Ändert sich die Länge einer oder beider Röhren, werden die Wellen der Laserstrahlen ganz leicht gegeneinander verschoben, und das Hell-Dunkel-Muster ändert sich ebenfalls. Letztlich verursacht eine Gravitationswelle also ein laues Flackern in einem Hell-Dunkel-Muster.

Die meisten stammen von kollidierenden Schwarzen Löchern. Das sind Gravitationsmonster mit einer derart abnormen Schwerkraft, dass sie selbst das Licht verschlucken. „Das einzige, was diese Objekte abstrahlen, sind Gravitationswellen“, erläutert Porto. „Und diese Wellen erlauben es uns, die Natur von Schwarzen Löchern zu erkunden.“ Allerdings ist es nicht einfach, von den Messsignalen der Detektoren auf das zugrunde liegende Ereignis zu schließen: Ausgehend von Einsteins Allgemeiner Relativität müssen die Fachleute ermitteln, wie die Signale aussehen sollten, die bei den Kollisionen entstehen. Porto und sein Team entwickeln präzise mathematische Berechnungen, wie das immer schneller werdende Umkreisen zweier Himmelskörper kurz vor dem Verschmelzen abläuft und welche für die Detektoren messbaren Gravitationswellen sie dabei aussenden – ein wesentliches Element der Analysen. Porto wird durch den Europäischen Forschungsrat ERC unterstützt und ist am Exzellenzcluster „Quantum Universe“ der Universität Hamburg beteiligt.

Katalog kosmischer Katastrophen

Viele Tausende solcher Berechnungen und Simulationen haben diverse Forschungsteams bislang produziert – ein umfassender Katalog an möglichen kosmischen Katastrophen. Schnappen die Detektoren dann ein echtes Signal aus den Tiefen des Weltalls auf, lässt es sich mit





Die Kollision zweier Neutronensterne im August 2017 war ein spektakuläres Multi-Messenger-Ereignis (künstlerische Darstellung).

den Katalogeinträgen abgleichen. Erst dadurch können die Fachleute treffsicher beurteilen, was da im All genau passiert ist, ob zum Beispiel ein leichtes Schwarzes Loch mit einem deutlich schwereren zusammengeprallt war.

Bislang haben die Detektoren knapp 50 Schwarze-Löcher-Kollisionen aufgespürt. Zur Überraschung der Fachwelt entpuppte sich das Geschehen als überaus vielfältig. „Manche hatten vermutet, dass die Schwarzen Löcher alle etwa die gleiche Masse besitzen“, sagt Frank Ohme, Physiker am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover. „Stattdessen konnten

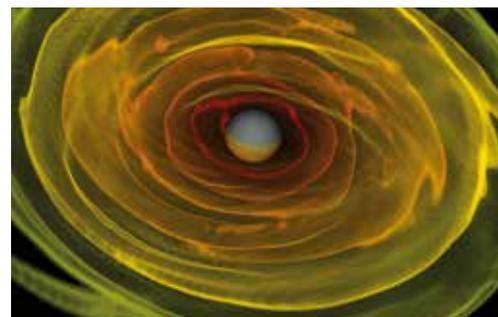
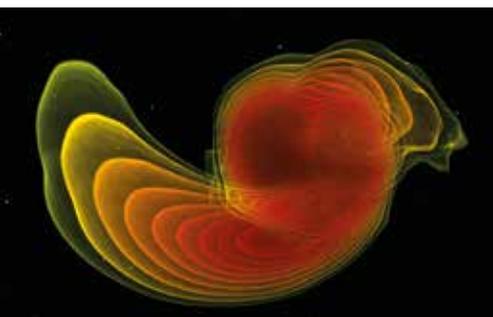
wir ganz unterschiedliche Exemplare beobachten – manche ziemlich leicht, andere vergleichsweise schwer.“ In Zahlen: Das kleinste von den Detektoren erfasste Schwarze Loch war nur rund fünf Sonnenmassen schwer, das größte

immerhin 91. Die bislang spektakulärste Beobachtung aber gelang im August 2017. Damals fingen LIGO und Virgo eine Gravitationswelle auf, die von der Kollision zweier Neutronensterne herrührte. Das sind die Leichen einstmals strahlender >>



„Gravitationswellen erlauben es uns, die Natur von Schwarzen Löchern zu erkunden“

Rafael Porto, DESY



Um ein Gravitationswellensignal in den Daten überhaupt zu erkennen, simulieren die Forscherinnen und Forscher detailgenau, wie ein erwartetes Ereignis abläuft. Hier ist die numerisch-relativistische Simulation zweier einander umkreisender und verschmelzender Neutronensterne gezeigt. Höhere Dichten sind rot dargestellt, geringere gelb.

Sonnen, die am Ende ihres Lebens zu einem ungeheuer kompakten Etwas zusammengesackt sind – als würde unsere Sonne auf einen Radius von zehn Kilometern gepresst, die Größe einer Stadt. Anders als gewöhnliche Himmelskörper bestehen die Sonderlinge zum Großteil nicht aus Atomen, sondern sind komprimierte Klumpen aus Neutronen, also Kernteilchen.

Paradebeispiel für Multi-Messenger-Astronomie

Das Besondere: „Bei der Kollision der beiden Neutronensterne haben wir nicht nur Gravitationswellen beobachtet, sondern auch Licht, Radiowellen, Gammablitz und Röntgenstrahlung – das ganze Spektrum“, sagt Alessandra Buonanno, Direktorin am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam. „Das war ein großer Durchbruch.“ Damit gilt das Ereignis als Paradebeispiel für die Multi-Messenger-Astronomie: Die Kombination der verschiedenen Signale bescherte ein ganzes Füllhorn an neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen.

Unter anderem hatte das Weltraumteleskop Fermi 1,7 Sekunden nach Aussetzen des Gravitationswellensignals einen Gammastrahlenblitz erfasst – die eindrucksvolle Bestätigung der lang gehegten Vermutung, dass zusammendonnernde Neutronensterne tatsächlich eine Ursache der bis dato geheimnisbehafteten Gammablitz sind. Ein weiteres Resultat: Bei der rabiatischen Verschmelzung waren Unmengen an Gold, Platin und ähnlichen Elementen entstanden. Damit hat die Fachwelt einen Mechanismus entdeckt, der solche Schwermetalle produzieren kann.

Für die Zukunft versprechen die Gravitationswellen weitere spektakuläre Erkenntnisse: So sollte eine Supernova, eine gewaltige Sternexplosion, nicht nur einen wahren Cocktail an Licht-, Radio- und Röntgenwellen sowie eine Flut an Neutrinos ausspeien, sondern auch deutlich messbare Gravitationswellen generieren. Die Kombination all dieser Signale dürfte enträtseln helfen, wie das Himmelsspektakel im Detail abläuft.

Auf der Spur der Dunklen Materie

Einen besonderen Schub verspricht sich die Physikgemeinde von künftigen, deutlich sensibleren Detektoren: Geplant ist unter anderem das Einstein-Teleskop, als Standort ist unter anderen auch die Lausitz im Gespräch.

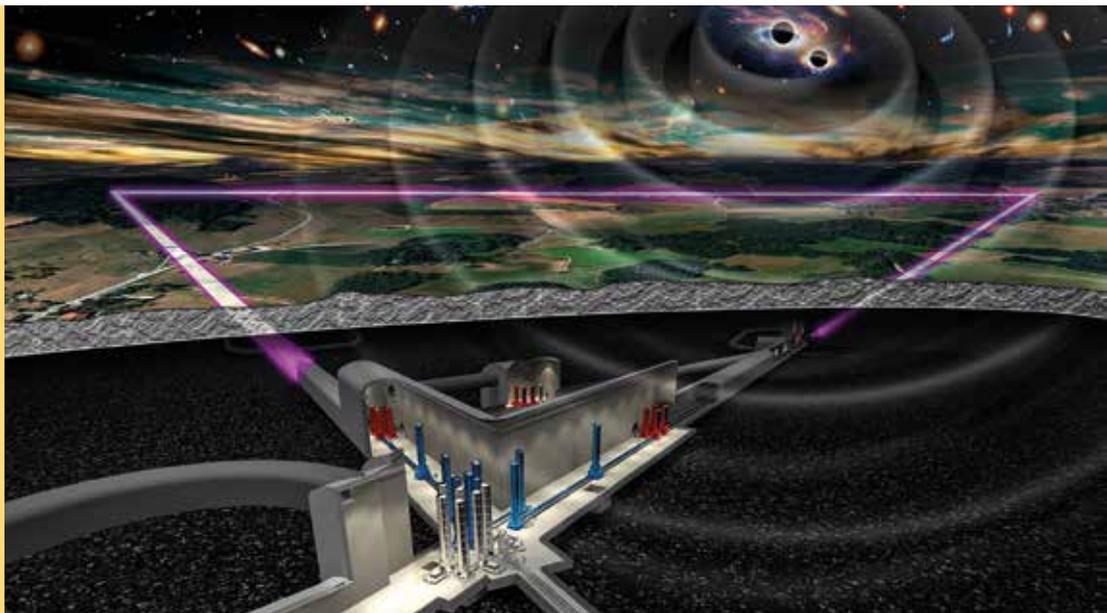
Mit seinen zehn Kilometer langen Laserarmen soll es deutlich größer und damit empfindlicher sein als LIGO oder Virgo. Und 2034 wird das Weltraumteleskop LISA abheben – ein Ensemble aus drei Satelliten, jeweils eine Million Kilometer voneinander entfernt. „Damit hoffen wir unter anderem beobachten zu können, wie supermassive kompakte Objekte im Zentrum von Galaxien zusammenstoßen“, sagt DESY-Physiker Rafael Porto.

„Bei der Kollision der beiden Neutronensterne haben wir nicht nur Gravitationswellen beobachtet, sondern auch Licht, Radiowellen, Gammablitz und Röntgenstrahlung“

Alessandra Buonanno, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam



Das Einstein-Teleskop soll drei statt zwei Laserarme bekommen, die 200 bis 300 Meter unter der Erde verlaufen. Jeweils zwei der zehn Kilometer langen Arme werden zusammen genutzt, insgesamt ergeben sich somit sechs Detektoren. Drei davon werden auf die Messung niedriger Frequenzen optimiert, drei auf höhere Frequenzen.



„Auf diese Weise könnten wir feststellen, ob sich in den Galaxienzentren wie vermutet supermassive Schwarze Löcher befinden oder vielleicht ganz andere, neue Objekte.“

Und die künftigen Detektoren könnten ein weiteres Rätsel des Kosmos knacken: Woraus besteht jene ominöse Dunkle Materie, die die Galaxien zusammenzuhalten scheint wie ein unsichtbarer Klebstoff? Manche Fachleute meinen, dass eine neue, bislang unentdeckte Gattung von Elementarteilchen dahintersteckt – sogenannte Axionen oder axionartige Teilchen. „Wir haben herausgefunden, wie wir mit Hilfe von Gravitationswellen danach suchen könnten“, erläutert Porto. „Wir halten es für möglich, dass axionartige Teilchen um ein Schwarzes Loch eine Art Kondensat bilden. Und dieses Kondensat könnte sich in künftigen Gravitationswellensignalen als schwacher Abdruck verraten.“

Klappt das Unterfangen, wäre nicht nur ein astrophysikalisches Geheimnis gelüftet. Gleichzeitig hätte man auch die Teilchenphysik revolutioniert: Sie wäre plötzlich um einen fundamentalen Materiebaustein reicher – das erste Elementarteilchen, das außerhalb des etablierten Standardmodells steht.



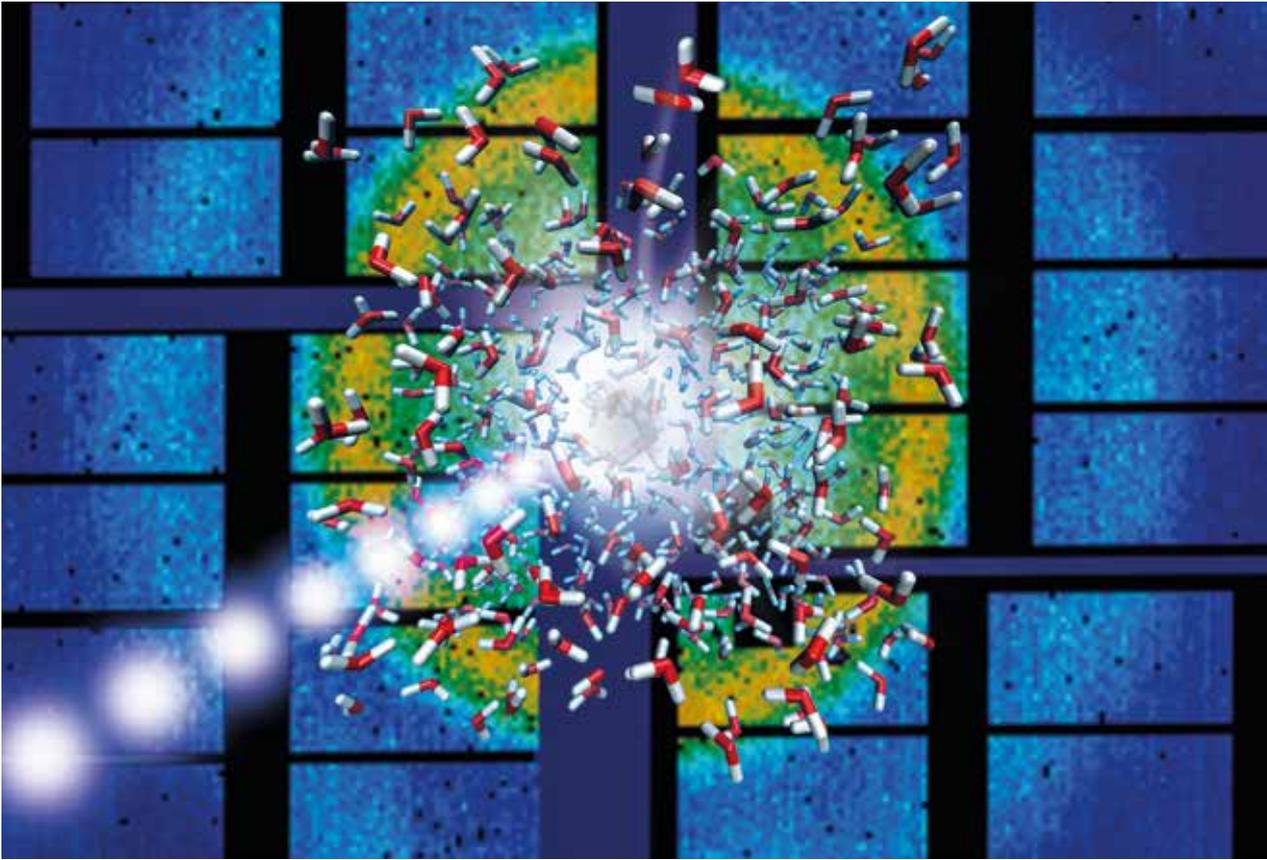
Das Weltraumteleskop LISA (Laser Interferometer Space Antenna) soll aus drei zusammengeschalteten Satelliten bestehen und unter anderem ins Innere massereicher Galaxien spähen.

DAS EINSTEIN-TELESKOP – 500 MAL EMPFINDLICHER

Bereits die heutigen Gravitationswellendetektoren haben beachtliche Dimensionen, ihre Laserarme messen bis zu vier Kilometer. Die nächste Generation soll das noch übertreffen: So ist in Europa das Einstein-Teleskop geplant – ein gleichseitiges Dreieck mit einer Schenkellänge von zehn Kilometern, ausgestattet mit sechs Laser-Interferometern. Es soll unter der Erde gebaut werden, dadurch würden die hochempfindlichen Spiegel deutlich weniger erschüttert. Zudem sollen sie auf minus 260 Grad Celsius gekühlt werden, um so das Wärmerauschen der Anlage zu minimieren. Durch all diese Maßnahmen wäre das Einstein-Teleskop wesentlich empfindlicher als die derzeitigen Detektoren: Statt einem

Ereignis pro Woche sollte es rund 500 registrieren – ein enormer Sprung. Zwar ist das Milliardenprojekt noch keine beschlossene Sache, doch die Fachwelt steht in den Startlöchern: Als mögliche Standorte werden Sardinien, das Dreiländereck Deutschland-Belgien-Niederlande sowie die Lausitz geprüft, wo eine Wissenschaftlerinitiative ein Deutsches Zentrum für Astrophysik ansiedeln möchte. Und auch die USA denken an den Bau eines neuen Detektors: Der Cosmic Explorer soll es laut den aktuellen Plänen sogar auf eine Länge von 40 Kilometern bringen.

.....
www.einsteintelecope.nl/de, www.deutscheszentrumastrophysik.de



Wenn die Röntgenblitze des European XFEL (violett) das Wasser (rot-weiße Moleküle) treffen, heizen sie es nicht nur auf, sondern erzeugen auch ein Streubild (Hintergrund), aus dem sich der Zustand des Wassers nach jedem Blitz ablesen lässt. So lässt sich der detaillierte zeitliche Verlauf des Prozesses aufzeichnen.

Flüssiges Wasser bei 170 Grad Celsius

Mit dem europäischen Röntgenlaser European XFEL hat ein Forschungsteam Wasser so schnell aufgeheizt, dass es selbst bei mehr als 170 Grad Celsius noch flüssig geblieben ist. Die Untersuchung diente der Erkundung von Wasser unter Extrembedingungen und enthüllte ein **anomalies dynamisches Verhalten**. Die Ergebnisse haben auch grundlegende Bedeutung für die Planung und Analyse von Untersuchungen empfindlicher Proben per Röntgenlaser.

Für ihre Versuche verwendeten die Forschenden Serien von jeweils 120 Röntgenlaserblitzen des European XFEL. Diese Pulszüge schickten sie in ein dünnes, wassergefülltes Quarzglasröhrchen und beobachteten die Reaktion des Wassers. „Mit den Röntgenblit-

zen konnten wir das Wasser innerhalb einer zehntausendstel Sekunde auf bis zu 172 Grad Celsius aufheizen, ohne dass es verdampft ist“, berichtet Hauptautor Felix Lehmkuhler von DESY.

Ein solcher Siedeverzug lässt sich normalerweise nur bis etwa 110 Grad beobachten. „Das ist jedoch nicht die einzige Besonderheit“, betont der Physiker. Die Forschenden machten die Dynamik im Wasser sichtbar, indem sie die Bewegungen von Nanokügelchen aus Siliziumdioxid darin verfolgten. In dem extrem überhitzten Wasser wick die Bewegung der Nanokügelchen deutlich von der zu erwartenden zufälligen Wärmebewegung ab, der Brownschen Molekularbewegung. „Das deutet auf ein ungleichmäßiges Aufheizen der Probe hin“, sagt Lehmkuhler. Theoreti-

sche Modelle, die dieses Verhalten erklären könnten, gibt es noch nicht. Die Theorien sind nicht für Wasser unter diesen Extrembedingungen ausgelegt.

Bei den Versuchen geht es nicht nur darum, das Verhalten von Wasser zu erkunden. Ein detailliertes Verständnis von überhitztem Wasser ist für eine Vielzahl von Untersuchungen an hitzeempfindlichen Proben von Bedeutung, etwa Polymeren oder Biomolekülen und -geweben. Die Untersuchungen sollen auch ganz praktische Fragen zu überhitztem Wasser klären. „Funktioniert es zum Beispiel auch bei hohen Temperaturen noch als Kühlmittel?“, erläutert Lehmkuhler.

.....
Proceedings of the National Academy of Sciences, DOI: 10.1073/pnas.2003337117

Der tiefe Erdmantel im Labor

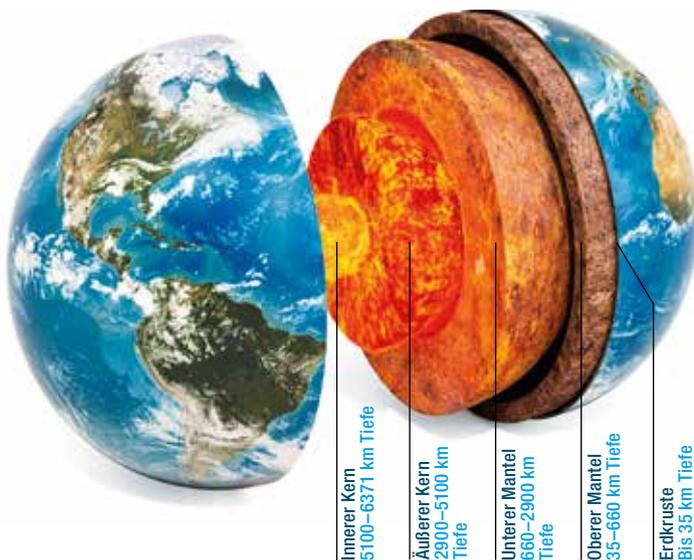
Die innere Struktur der Erde. Die Untersuchungen erfolgten bei einem Druck, wie er im unteren Erdmantel herrscht.

Ein Forschungsteam hat bei DESY den tiefen Erdmantel im Labor nachgestellt und dazu erstmals echtes Gestein unter ähnlichen Bedingungen verformt, wie sie mehr als 1000 Kilometer unter der Oberfläche herrschen. An der Extreme Conditions Beamline von DESYs Röntgenquelle PETRA III setzten die Wissen-

schaftlerinnen und Wissenschaftler das Mineral Olivin dem fast 400 000-fachen Atmosphärendruck und einer Temperatur von mehr als 700 Grad Celsius aus und erzeugten dadurch **eine Hochdruckmischung der beiden häufigsten Minerale der Erde**, Bridgmanit und Ferroperiklas.

Die meisten Simulationsexperimente zur Erforschung des unteren Erdmantels haben jeweils Proben eines einzigen Minerals untersucht. „Durch sogenannte Korn-zu-Korn-Wechselwirkungen unterscheidet sich jedoch das Verformungsverhalten einer Mischung aus mehreren Mineralen potenziell von dem eines einzelnen Minerals“, erläutert Hauptautorin Samantha Couper von der Universität von Utah. Tatsächlich offenbarte die Untersuchung nun ein unerwartetes Verhalten der für den unteren Erdmantel typischen Mineralmischung. Anders als bei Experimenten mit reinen Proben bildete Ferroperiklas in der Mischung keine nennenswerte Struktur aus. Dies bedeutet vermutlich, dass Ferroperiklas überraschenderweise nicht zu den beobachteten Richtungsunterschieden bei der Ausbreitung von Erdbebenwellen (seismischen Anisotropien) innerhalb des unteren Erdmantels beiträgt.

Frontiers in Earth Science, DOI: 10.3389/feart.2020.540449



Ungewöhnliche Gold-Nanokristalle sind bessere Katalysatoren

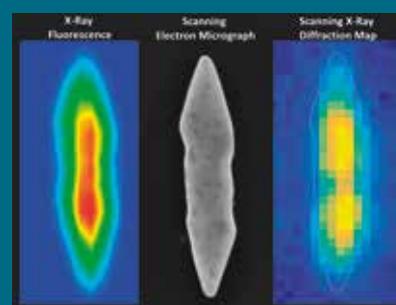
Nanoteilchen aus Gold haben bessere Katalysatoreigenschaften, wenn ihre Atome anders angeordnet sind als üblich. An DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III hat ein indisch-deutsches Team jetzt den inneren Aufbau sogenannter mehrphasiger Gold-Nanoteilchen aufgeklärt, die verschiedene Kristallstrukturen besitzen. Die Ergebnisse helfen, die katalytischen Eigenschaften dieser Nanokristalle besser zu verstehen und noch effizientere Katalysatoren zu entwickeln.

Gold-Nanopartikel haben ein breites Anwendungsspektrum wegen ihrer besonderen Eigenschaften, die in vielerlei Hinsicht von makroskopischem Gold abweichen. Während beispielsweise Gold normalerweise kaum als Katalysator aktiv ist, haben Gold-Nanopartikel herausragende katalytische Eigenschaften.

Neuere Studien weisen darauf hin, dass Gold ein noch signifikant besserer Katalysator ist, wenn seine Atome nicht im üblichen flächenzentrierten kubischen (fcc) Kristallgitter angeordnet sind. An PETRA III untersuchte das Team Nanopartikel, die aus verschiedenen

Kristallgittern aufgebaut sind. Dabei zeigte sich, dass sich das übliche fcc-Gitter vor allem in den Spitzen der Nanopartikel findet, ihr Körper dagegen aus anderen Kristallgittern aufgebaut war. Dank der Untersuchung lässt sich das Wachstum der individuellen Kristallstrukturen besser verstehen und der Anteil günstiger Strukturen möglicherweise noch weiter erhöhen.

ACS Nano, DOI: 10.1021/acsnano.0c02031



Ein Gold-Nanopartikel im Licht der Röntgenfluoreszenz (links), unter dem Elektronenmikroskop (Mitte) und als Röntgen-Rastermikroskopieaufnahme (rechts). Letztere verrät die Anordnung der Atome im Inneren des Partikels. Es ist 0,0016 Millimeter lang.

Weltrekord im Beschleunigerring

Rückenwind für die Suche nach seltenen Teilchenzerfällen im Detektor Belle II in Japan: Der Beschleunigerring SuperKEKB hat die höchste je gemessene Luminosität erzielt. Damit schlägt der Elektron-Positron-Beschleuniger nicht nur seinen Vorgänger KEKB, sondern auch den größten Teilchenbeschleuniger der Welt, den Large Hadron Collider am Forschungszentrum CERN bei Genf.

Die Luminosität sagt aus, wie viele Teilchen pro Sekunde auf einem Quadratcentimeter aufeinandertreffen. Damit ist sie ein wichtiges Maß für die Anzahl von Kollisionen, die in Belle II erzeugt werden können – je mehr Messdaten, umso höher die Wahrscheinlichkeit, auch sehr seltene Prozesse zu



Mit dem SuperKEKB-Beschleuniger sind Forscherinnen und Forscher den Rätseln der Antimaterie auf der Spur.

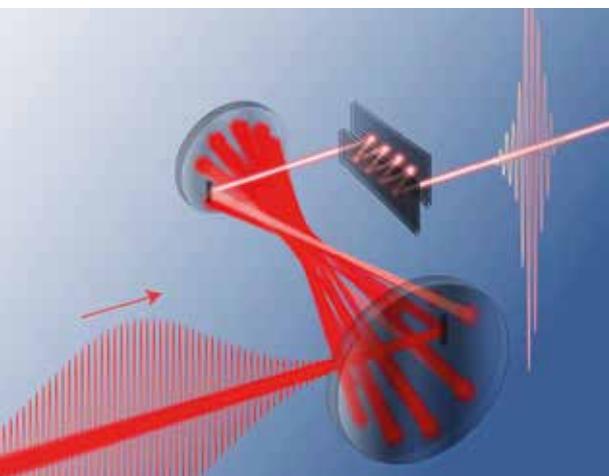
finden. SuperKEKB erreichte die enorme Zahl von **2,22 x 10³⁴ Teilchen pro Quadratcentimeter** in der Sekunde, das sind 22,2 Milliarden Quadrillionen.

Mit Belle II wollen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus der ganzen Welt die Ursachen des unterschiedlichen Verhaltens von Materie und Antimaterie im Universum genauer

ergründen. Dazu werden im Beschleuniger SuperKEKB Elektronen und ihre Antiteilchen, Positronen, zunächst auf hohe Energien und dann im Detektor zur Kollision gebracht.

Der Luminositätsrekord ist dabei erst der Anfang: In den nächsten Jahren soll die Luminosität noch bis zu 40 Mal steigen.

Rekord-Kompression liefert ultrakurze Laserpulse



Der ursprünglich einfarbige Infrarot-Laserpuls (links) passiert mehrfach das Kryptongas. Dabei erweitert sich sein Farbspektrum, Voraussetzung für die anschließende Komprimierung mit den Spezialsiegeln.

Mit Hilfe eines Lichtkompressors hat ein Forschungsteam bei DESY ultrakurze Laserpulse hergestellt. Den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern um Christoph Heyl von DESY und dem Helmholtz-Institut Jena gelang es, energiereiche Laserpulse von rund einem Drittel Millimeter Länge in einem Schritt auf nur etwa **einen hundertstel Millimeter zu komprimieren**. In einem weiteren Schritt komprimierten die Forscherinnen und Forscher die Pulse auf nur noch rund vier tausendstel Millimeter (Mikrometer), das ist etwa ein Zehntel der Dicke eines menschlichen Haars.

Ultrakurze Laserpulse werden in vielen Bereichen der Forschung benötigt, unter anderem für die Untersuchung ultraschneller Prozesse in Mate-

rie und in der Plasmabeschleunigung. Die Forschenden begannen mit infraroten Laserpulsen von 1,2 billionstel Sekunden (Pikosekunden) Dauer. Das ist bereits kurz, aber für die gewünschten Anwendungen nicht kurz genug. Daher schickten sie die Pulse durch zwei Lichtkompressoren, die jeweils aus einer mit Kryptongas gefüllten Spiegelröhre und zusätzlichen Spezialsiegeln bestehen. Im ersten Schritt schrumpften die Pulse auf 32 billionstel Sekunden (Femtosekunden) bei 80 Prozent der ursprünglichen Pulsenergie, im zweiten auf 13 Femtosekunden, wobei sich die Pulsenergie halbierte. Das entspricht einem Rekord-Gesamtkompressionsfaktor von etwa 90.

Optics Letters, DOI: 10.1364/OL.388665

Supermikroskop für Proteinkristalle

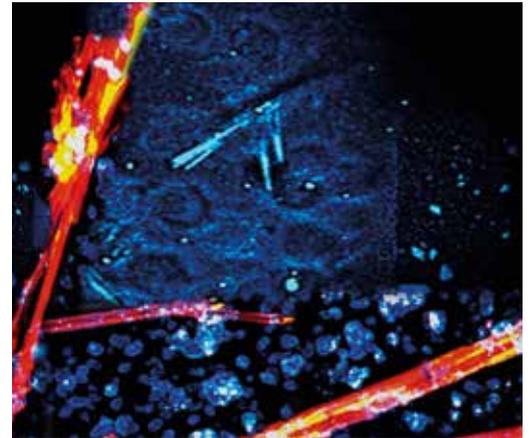
Ein neuartiges Mikroskop kann selbst kleinste Proteinkristalle aufspüren, die sich auch mit modernen Lichtmikroskopen nicht mehr sichtbar machen lassen. Das sogenannte Multiphotonenmikroskop nutzt **verschiedene nichtlineare optische Effekte**, um auch noch Nanokristalle abzubilden, die heute vermehrt zur Proteinanalyse verwendet werden. Es wird von einem infraroten Faserlaser angetrieben, dessen Pulse in zwei Farben gewandelt werden. Die Proteinkristalle erzeugen daraus Strahlung der halben, beziehungsweise einer Drittel Wellenlänge, die sogenannte zweite und dritte Harmonische, die in diesem Fall im blauen und ultravioletten (UV-) Bereich liegen.

Eine der beiden Farben des eingestrahnten Laserpulses ist zudem so

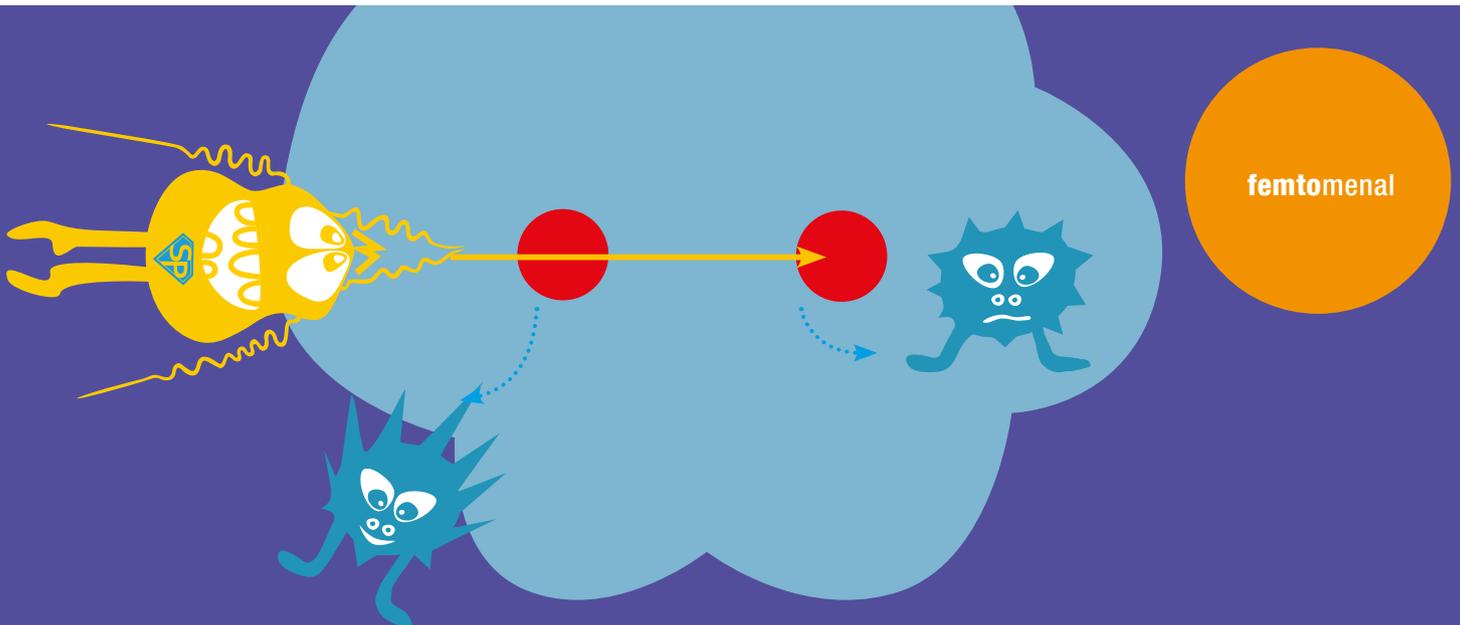
gewählt, dass sie die Aminosäure Tryptophan, die in Proteinen vorkommt, zur Fluoreszenz anregen kann, die wiederum im UV-Bereich liegt, so dass sich das Leuchten der Proteine aus den verschiedenen Prozessen klar vom eingestrahnten Infrarot-Laserlicht trennen lässt. Im Labor konnte das Entwicklerteam um Franz Kärtner von DESY, Christian Betzel von der Universität Hamburg und Guoqing Chang von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften mit seinem multimodalen Multiphotonenmikroskop winzige Kristalle aus den Proteinen Lysozym, Thaumatin, Thermolysin und PAK4 zuverlässig nachweisen.

.....
Communications Biology,

DOI: 10.1038/s42003-020-01275-8



Das multimodale Multiphotonenmikroskop kann unter anderem zuverlässig Salzkristalle (rot) von Proteinkristallen (blau) unterscheiden.



247 Zeptosekunden

benötigt ein Lichtteilchen (Photon), um ein Wasserstoffmolekül (H_2) zu durchqueren. Das sind 247 billionstel milliardstel Sekunden (0,000 000 000 000 000 247 Sekunden) und die kürzeste Zeitspanne, die jemals gemessen worden ist. Für diesen Rekord nutzte ein Team um Reinhard Dörner von der Goethe-Universität Frankfurt am Main ein spezielles Reaktionsmikroskop an DESYs Röntgenquelle PETRA III. Elektronen verhalten sich gleichzeitig wie Teilchen und Wellen, und so entstanden beim

Herausschlagen der beiden Elektronen aus dem Wasserstoffmolekül kurz hintereinander zwei Elektronenwellen, deren Überlagerung sich mit dem Reaktionsmikroskop messen ließ. In diesen Experimenten konnte das Team auch erstmals beobachten, dass die Elektronenhülle in einem Molekül nicht überall gleichzeitig auf Licht reagiert. Die Zeitverzögerung kommt dadurch zustande, dass sich die Information im Molekül nur mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet.

.....
Science, DOI: 10.1126/science.abb9318

Mysteriöser Gammastrahlen- „Herzschlag“ aus dem All

Kosmische Gaswolke pulsiert im Takt eines taumelnden Schwarzen Lochs

Der Mikroquasar SS 433 (Hintergrund) taumelt mit einer Periode von 162 Tagen. Die 100 Lichtjahre entfernte unscheinbare Gaswolke Fermi J1913+0515 (Vordergrund) pulsiert im selben Rhythmus, was eine direkte Verbindung nahelegt.

Im Sternbild Adler liegt eine unscheinbare Wolke aus kosmischem Gas. Das sonst wenig spektakuläre Objekt verblüfft Astronominnen und Astronomen jedoch mit einem rätselhaften Gammastrahlen-„Herzschlag“: Die Wolke pulsiert im Takt mit einem taumelnden Schwarzen Loch in der Nachbarschaft, was eine Verbindung unbekannter Art zwischen den beiden Objekten nahelegt. Wie das Schwarze Loch den Gamma-„Herzschlag“ in der rund 100 Lichtjahre entfernten Gaswolke genau antreibt, ist unklar.

Ein Team um DESY-Humboldt-Fellow Jian Li und Professor Diego F. Torres vom Institut für Weltraumforschung (IEEC-CSIC) in Barcelona hatte mehr als zehn Jahre Messdaten des Gamma-Satelliten Fermi der US-Raumfahrtbehörde NASA von der Beobachtung eines sogenannten Mikroquasars genau analysiert. Dieses System mit der Katalognummer SS 433 liegt 15 000 Lichtjahre von unserem Sonnensystem entfernt in der Milchstraße und besteht aus einem Riesenstern mit rund der 30-fachen Masse unserer Sonne und einem Schwarzen Loch mit 10 bis 20 Sonnenmassen. Die beiden Objekte umkreisen einander alle 13 Tage, wobei das Schwarze Loch Materie von dem Stern absaugt.

„Dieses Material sammelt sich auf einer Akkretionsscheibe, bevor es ins Schwarze Loch fällt – ähnlich wie das Wasser im Strudel über dem Badewannenabfluss“, erläutert Li. „Ein Teil der Materie fällt allerdings nicht in das Loch, sondern schießt in zwei gebündelten Strahlen mit hoher Geschwindigkeit nach oben und unten ins All.“ Dieses Phänomen kennen Astronomen von sogenannten Quasaren, aktiven Galaxien mit monströsen Schwarzen Löchern von Millionen Sonnenmassen in ihren Zentren, die solche Materiejets zehntausende Lichtjahre weit in den intergalaktischen Raum hinausschießen. Da SS 433 wie eine verkleinerte Version dieser Quasare aussieht, sprechen die Forscher-

innen und Forscher von einem Mikroquasar.

Taumelnder Kreisel

Die schnellen Teilchen und die ultra-starken Magnetfelder in den Jets erzeugen Röntgen- und Gammastrahlung. „Die Akkretionsscheibe liegt nicht genau in der Ebene der Umlaufbahn der beiden Objekte. Sie präzediert, also taumelt, wie ein drehender Kreisel, der schief auf einen Tisch aufgesetzt wurde“, berichtet Torres. „Daher schrauben sich die beiden Jets eher in den umgebenden Raum, als sich in einer geraden Linie auszubreiten.“

Die Präzession der Jets aus dem Schwarzen Loch hat eine Periode von 162 Tagen. Die genaue Analyse der Messdaten offenbarte ein weiteres Gammastrahlensignal mit derselben Periode an einer Position relativ weit von den Jets entfernt. Es bekam die Katalognummer Fermi J1913+0515 und liegt am Ort einer unscheinbaren Anreicherung von interstellarem Gas. Die übereinstimmende Periode zeigt, dass dieser regelmäßige Gammastrahlen-„Herzschlag“ der Wolke von dem Mikroquasar angetrieben werden muss. „Eine solche unzweifelhafte Verbindung rein über die Zeitmessung zu finden, rund 100 Lichtjahre vom Mikroquasar entfernt und noch nicht einmal in der Richtung der Jets, ist ebenso unerwartet wie erstaunlich“, betont Li. „Wie das Schwarze Loch allerdings den Herzschlag der Gaswolke antreiben kann, ist uns nicht wirklich klar.“ Ideen haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aber durchaus. Eine direkte periodische Beleuchtung der Wolke durch einen der Jets ist dabei unwahrscheinlich.

Kosmisches Testfeld

Als alternatives Modell hat das Team die Idee untersucht, dass schnelle Protonen (Wasserstoffatomkerne) in den Jets oder in der Nähe des Schwarzen Lochs erzeugt werden und Gammastrahlung produzieren, wenn sie auf die Moleküle der

Gaswolke treffen. Solche Protonen könnten auch aus einem Strom schneller Teilchen von der äußeren Kante der Akkretionsscheibe stammen. Wenn dieser Strom die Gaswolke trifft, leuchtet sie im Gammalicht auf. Das würde den rätselhaften „Herzschlag“ erklären. „Von der Energie her könnte der Strom von der Scheibe so kräftig sein wie der von den Jets, und es wird angenommen, dass er zusammen mit dem Rest des Systems präzediert“, erläutert Torres.

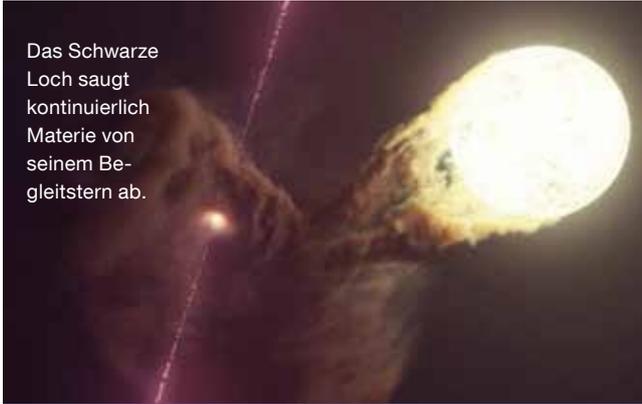
Um den rätselhaften Gamma-„Herzschlag“ dieses einzigartigen Systems allerdings genau zu verstehen, sind weitere Beobachtungen und theoretische Analysen nötig, be-

„Der Mikroquasar verblüfft Beobachter bei allen Frequenzen sowie die Theoretiker gleichermaßen“

Jian Li, DESY

tonen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. „SS 433 verblüfft Beobachter bei allen Frequenzen sowie die Theoretiker gleichermaßen“, sagt Li. „Und er wird auf jeden Fall über Jahre hinaus ein Testfeld für unsere Vorstellungen von der Erzeugung und Ausbreitung Kosmischer Strahlung in der Nähe von Mikroquasaren bieten.“

Nature Astronomy,
DOI: 10.1038/s41550-020-1164-6



Das Schwarze Loch saugt kontinuierlich Materie von seinem Begleitstern ab.

Fahndung nach der Chemie des Lebens

Studie zeigt möglichen neuen Weg zur Entstehung von DNS-Basenpaaren

Auf der Suche nach dem Ursprung des Lebens hat ein Forschungsteam mit Hilfe von DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III einen alternativen Pfad aufgezeigt, wie das typische Muster des Erbgutmoleküls DNS entstanden sein könnte: Seine charakteristischen Basenpaare können sich demnach auf rein thermischem Weg durch Erhitzen ohne Wasser oder andere Lösungsmittel zusammenfinden, wie das Team unter Leitung von Ivan Halasz vom Ruđer-Bošković-Forschungsinstitut in Zagreb und Ernest Meštrović von der Pharmafirma Xellia berichtet.

„Eine der faszinierendsten Fragen bei der Fahndung nach dem Ursprung des Lebens ist, wie die chemische Auswahl stattgefunden hat und sich die ersten Biomoleküle gebildet haben“, sagt Hauptautor Tomislav Stolar vom Ruđer-Bošković-Institut. Während die Zellen von Lebewesen die Produktion bestimmter Biomoleküle mit ihrer komplexen Maschinerie gezielt steuern,

sind die ersten molekularen und supramolekularen Bausteine des Lebens vermutlich auf rein chemischem Weg und ohne Katalysatoren entstanden. Für ihre Arbeit haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nun die Entstehung der Nukleinbasenpaare in der Desoxyribonukleinsäure (DNS) untersucht.

„Unsere Resultate eröffnen viele neue Wege für die Suche nach dem chemischen Ursprung des Lebens“

Tomislav Stolar, Ruđer-Bošković-Institut

Unser Erbgut ist in der DNS als lange Abfolge von vier Buchstaben gespeichert, die von den Nukleinbasen Adenin (A), Cytosin (C), Guanin (G) und Thymin (T) gebildet werden. Der genetische Code ist in zwei

langen Strängen abgelegt, die sich in der bekannten Doppelhelixstruktur umeinanderwinden. In der DNS-Doppelhelix steht jeder Nukleinbase ihr komplementärer Partner im jeweils anderen Strang gegenüber: Adenin bildet ein Paar mit Thymin und Cytosin mit Guanin.

Alternativer Reaktionsweg

„In der DNS kommen nur spezifische Kombinationen vor, und wenn die Nukleinbasen isoliert werden, mögen sie überhaupt nicht mehr aneinander binden. Wieso hat die Natur also gerade diese Basenpaare ausgewählt?“, erläutert Stolar. Nach der Aufklärung der Doppelhelixstruktur der DNS durch James Watson und Francis Crick im Jahr 1953 versuchten sich zahlreiche Experimente an der Paarbildung der Nukleinbasen – allerdings mit überraschend geringem Erfolg bei präbiotisch plausiblen Bedingungen.

„Wir haben einen anderen Weg beschritten“, berichtet Ko-Autor Martin Etter von DESY. „Wir haben



Unter den Umgebungsbedingungen auf der jungen Erde mit Vulkanen, Erdbeben und Meteoriteneinschlägen könnten sich Nukleinbasenpaare auch ohne Wasser oder andere Lösungsmittel gebildet haben.

zu testen, ob die Basen unter thermischen Bedingungen nur so aneinander binden, wie es von der DNS bekannt ist, wiederholte das Team die Versuche mit Gemischen aus drei und vier Nukleinbasen an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III, wo sich die detaillierte molekulare Struktur der Gemische beobachten ließ. Auf diese Weise konnte das Team verfolgen, ob und welche neuen Verbindungen sich während des Erhitzens bildeten.

„Bei ungefähr 100 Grad Celsius konnten wir die Entstehung von Adenin-Thymin-Paaren beobachten, bei rund 200 Grad Celsius von Guanin-Cytosin-Paaren“, erzählt Etter. „Andere Basenpaare entstanden auch bei weiterem Erhitzen bis zum Schmelzen nicht.“ Die durch Wärmezufuhr erreichte Reaktion besitzt also dieselbe Selektivität, wie sie auch in der DNS zu beobachten ist.

„Unsere Ergebnisse zeigen eine mögliche alternative Route, wie die molekularen Erkennungsmuster entstanden sein könnten, die wir in der DNS beobachten“, ergänzt Stolar. „Die Bedingungen des Experiments sind für die junge Erde nicht unrealistisch, die eine heiße, brodelnde Hexenküche mit Vulkanen, Erdbeben, Meteoriteneinschlägen und allen möglichen weiteren Ereignissen war. Unsere Resultate eröffnen viele neue Wege für die Suche nach dem chemischen Ursprung des Lebens.“

Chemical Communications,
DOI: 10.1039/D0CC03491F

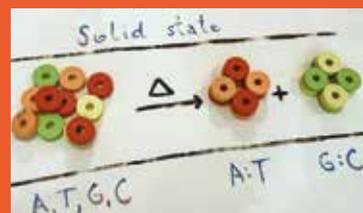
versucht herauszufinden, ob sich die Basenpaare durch mechanische Energie oder einfache Wärmezufuhr erzeugen lassen.“ Das Team untersuchte dazu die sogenannten methylierten Formen der Nukleinbasen. Die angehängte Methylgruppe (-CH₃) erlaubt es den Nukleinbasen im Prinzip, Wasserstoffbindungen an der Watson-Crick-Seite des Moleküls auszubilden. Methylierte Nukleinbasen kommen auch in zahlreichen lebenden Organismen vor und haben dort verschiedene biologische Funktionen.

Im Labor versuchten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zunächst, Nukleinbasenpaare in rein mechanisch getriebenen Reaktionen durch Mahlen herzustellen. Dazu füllten sie je zwei Nukleinbasen als Pulver in einen Mahlbecher, in dem zwei Stahlkugeln als Mahlwerkzeuge dienen. Zum Mahlen wird der Becher dann auf kontrollierte Weise geschüttelt. Dabei entstanden A:T-Paare, die auch in früheren Experimenten

anderer Teams bereits beobachtet worden waren. Das reine Mahlen führte allerdings nicht zur Bildung von G:C-Paaren.

Bedingungen der jungen Erde

In einem zweiten Schritt erhitzen die Forscherinnen und Forscher die gemahlene Cytosin- und Guanin-Pulver. „Tatsächlich konnten wir bei etwa 200 Grad Celsius die Entstehung von Cytosin-Guanin-Paaren beobachten“, berichtet Stolar. Um



Aus dem Gemisch der vier Nukleinbasen Adenin (A), Cytosin (C), Guanin (G) und Thymin (T) entstanden bei etwa 100 Grad Celsius auf rein mechanischem Weg A:T-Paare und bei 200 Grad Celsius G:C-Paare.



Reines mechanisches Mahlen von Gemischen aus Nukleinbasenpulvern mit Stahlkugeln führte nicht zu einer Bildung der gewünschten Guanin-Cytosin-Paare.

Hinweis auf neue Physik?

Ein Experiment zum magnetischen Moment des Myons hält die Wissenschaft in Atem

Es gibt eine Theorie in der Physik, die alle Teilchen und die Kräfte, die zwischen ihnen wirken, mit sehr großer Präzision beschreibt. Diese Theorie heißt Standardmodell der Teilchenphysik, und sie sitzt bombenfest, obwohl Physikerinnen und Physiker ständig an ihr rütteln, um zu sehen, ob sich nicht doch irgendwo Risse auftun im Fundament. Rund um den Globus gibt es viele kleine und größere Experimente, die versuchen, einen solchen Riss oder einen Fehler im Standardmodell zu finden. Denn es gibt Phänomene, die es nicht erklären kann: Dunkle Materie und Dunkle Energie, zum Beispiel. Das Prinzip der meisten dieser Experimente ist es, experimentell gewonnene Daten mit den theoretischen Vorhersagen des Standardmodells zu vergleichen. Bisher kam immer heraus: Das Standardmodell hat Recht.

Immer? Nein! Ein kleines Experiment namens Muon g-2 am US-amerikanischen Fermilab hat einen klaren

früher für Erstaunen gesorgt hatte. Das magnetische Moment beschreibt unter anderem, wie ein Teilchen auf ein Magnetfeld reagiert. Der Unterschied zwischen dem nun gemessenen Wert und dem mit der Theorie ermittelten steckt in der neunten Stelle, dennoch hält er die Teilchenphysik in Atem. Könnten es erste Hinweise auf neue Teilchen sein, zum Beispiel auf jene der schon lange postulierten, aber noch nie beobachteten Supersymmetrie? Handelt es sich vielleicht um dunkle Photonen, die auch die rätselhafte Dunkle Materie erklären könnten? Oder ist es noch zu früh für solche Vermutungen, und es müssen erst einmal mehr Daten gesammelt werden?

Die DESY-Theoretiker Fred Jegerlehner und Peter Marquard, die sich seit Jahrzehnten mit dem magnetischen Moment des Myons beschäftigen, an der aktuellen Messung aber nicht beteiligt waren, bleiben gespannt.

Bei möglichen Konsequenzen bin ich allerdings eher konservativ. Das Ergebnis ist spannend, und es bestätigt auch die vorherigen Messungen, die in Brookhaven gemacht wurden. Aber das Problem ist, dass beide Experimente – Brookhaven und Fermilab – den gleichen Ansatz nutzen. Wir werden erst aufgeregt, wenn andere Experimente die Messung bestätigen. Zum Beispiel ist ein Experiment in Japan in Vorbereitung, das die gleiche Messung macht, aber ganz anders funktioniert. Die unterschiedlichen Herangehensweisen an dasselbe Thema sollten uns mehr Gewissheit bringen. Ich bin aber sehr optimistisch, dass sich der Nebel in ein paar Jahren geklärt haben wird.

Peter Marquard: So fantastisch das Ergebnis ist, es hat an sich erstmal nichts geändert. Wir sind in einem sehr genauen Bereich, wo jedes Detail wichtig ist. Deswegen wäre eine alternative Messung sehr wünschenswert. Erst wenn der statistische Fehler der Messung noch kleiner wird, wird es interessant, und wir können uns an die Erklärungen setzen. Natürlich gibt es Kolleginnen und Kollegen, die jetzt schon Erklärungsansätze publizieren, aber wir hatten in der Vergangenheit schon oft Beobachtungen mit ähnlichen Wahrscheinlichkeiten, die sich am Ende als statistische Fluktuation herausgestellt haben.

femto: Also sehen Sie die Messung noch nicht als Hinweis auf Dunkle Materie oder Supersymmetrie, Physik jenseits des Standardmodells?



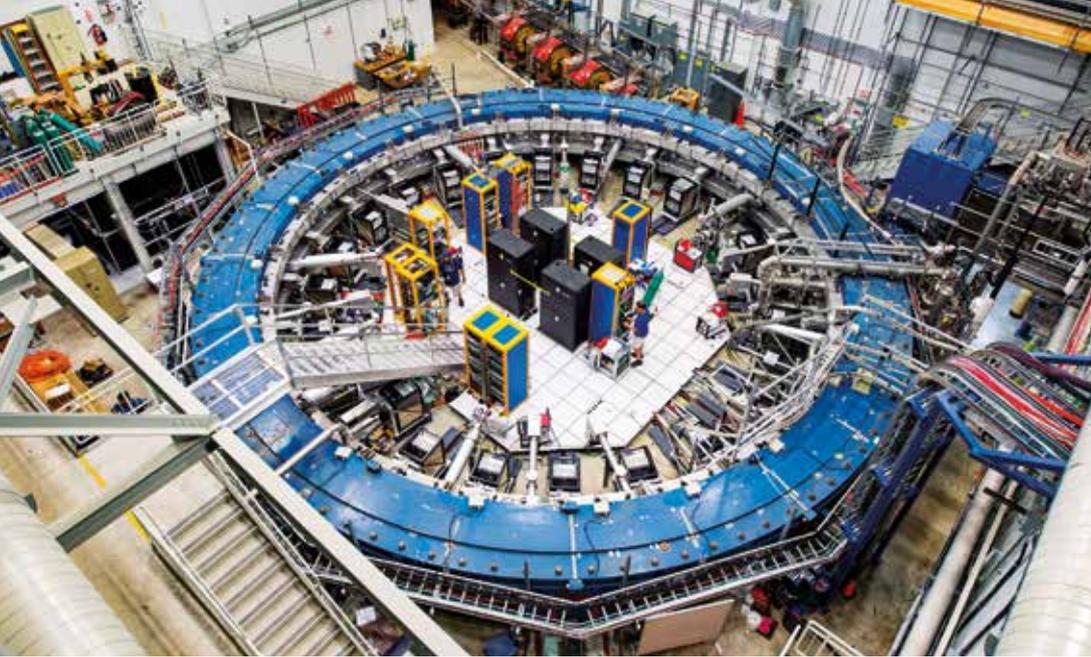
„Wir werden erst aufgeregt, wenn andere Experimente die Messung bestätigen“

Fred Jegerlehner, DESY

Unterschied zwischen Vorhersage und Experiment beobachtet. Muon g-2 studiert Myonen, die schweren Verwandten des bekannteren Elektrons, und ihre Eigenschaften. Eine dieser Eigenschaften, das magnetische Moment, weicht von der Vorhersage der Theorie ab. Die Messungen am Fermilab bestätigen damit ein Resultat des Brookhaven National Laboratory in New York, das bereits

femto: Was bedeutet das Ergebnis? Müssen die Physikbücher neu geschrieben werden?

Fred Jegerlehner: Die Tatsache, dass wir in der Lage sind, ein solches Phänomen mit solcher Genauigkeit in den Griff zu kriegen, ist eine großartige Präzisionsleistung, sowohl für die Theorie als auch für die Experimen-



Das Experiment Muon g-2 arbeitet bei eiskalten Temperaturen von minus 267 Grad Celsius und beobachtet, wie stark Myonen in einem externen Magnetfeld schwanken.

Peter Marquard: Wir wollen ja alle etwas Neues finden, das wäre natürlich sehr aufregend. Aber noch lassen die Daten das nicht zu. Uns fehlt allerdings in der Tat in der Physik die große neue Theorie – im Moment kleben wir einzelne Teilchen ans Standardmodell heran, was aber auch daran liegt, dass das Standardmodell so erfolgreich ist. Es gibt viele Vorschläge, das Standardmodell zu erweitern, um neue Phänomene zu erklären, aber wenig, was tatsächlich eine Einbettung in eine umfassendere widerspruchsfreie Theorie sein könnte.

Fred Jegerlehner: Natürlich muss man in alle Richtungen denken. Aber ich bin ja ein Anhänger des Standardmodells. Dieser Wille, das Standardmodell zu killen, ist seltsam. Das Standardmodell ist zwar eine komplizierte und seltsam aufgebaute Theorie, aber eine, die bisher immer bestätigt wurde, obwohl wir wissen, dass sie unvollständig ist.

femto: Wie geht es denn jetzt weiter mit dem magnetischen Moment des Myons?

Fred Jegerlehner: Ich hoffe, dass die Theoretiker sich anstrengen und das Zeug in Ordnung bringen!

femto: Sie meinen, dass sie auf Basis des Muon-g-2-Ergebnisses die Theorie korrigieren?

Peter Marquard: Nein, wir müssen noch einmal genau hingucken und schauen, was wir übersehen haben. Mittlerweile sind sowohl die theoretische Vorhersage als auch die experimentelle Messung so genau, dass sie in acht Stellen übereinstimmen. Dies ist von beiden Seiten eine herausragende Leistung. Es ist fantastisch, dass diese Messung gemacht wurde und dass alles so passt, wie es passt. Aber wie wir schon gesagt haben – eine alternative Messung wäre sehr wünschenswert.

Fred Jegerlehner: Ich hinterfrage jedenfalls gerade meine eigenen Ergebnisse, um die Diskrepanz zwischen Theorie und Experiment zu verstehen. Eine echte Diskrepanz wird sich durch weitere Messungen erhärten und die Theorie uns noch lange in Atem halten. Ich beschäftige mich seit über 30 Jahren mit dem magnetischen Moment des Myons, habe sogar ein Buch darüber geschrieben, und seit 1995 beschäftigen Kollegen und ich uns mit dem Experiment Muon g-2. In der Vorhersage des magnetischen Moments des Myons gibt es seit Kurzem einen erheblichen Unterschied zwischen zwei verschiedenen Ansätzen der Berechnung. Einerseits ist da die bisher genaueste, die auf der Benutzung experimenteller Daten beruht, andererseits die rein theoretische Vorhersage, die einen größeren Wert ergibt und die Diskrepanz zwischen Theorie und Experiment halbieren würde. Wer liegt eher bei der Wahrheit? Ich sehe eine Tendenz, dass die Diskrepanz kleiner wird. Bleibt zu betonen: Das neue Experiment Muon g-2 setzt Standards in der Präzisionsphysik und treibt die Theorie vor sich her, die auch große Fortschritte gemacht hat, aber auch noch wird machen müssen.



„Es ist auf jeden Fall fantastisch, dass diese Messung gemacht wurde“

Peter Marquard, DESY

Ein Elektronenpaket mit variierender Energie (dunkelblau bis orange) treibt eine Plasmawelle (weiß) mit starken elektrischen Feldern (rot und blau). Das kontrollierte Kürzen des Elektronenpakets von hinten erlaubt die präzise Vermessung der elektrischen Felder.

Die Vermessung der Welle

Innovative Methode bietet unerreichten Einblick in Plasmabeschleuniger

Sie verspricht eine neue Generation leistungsfähiger und kompakter Teilchenbeschleuniger: die Technik der Plasmabeschleunigung, bei der Elektronenpakete von Plasmawellen statt von Radiowellen auf Trab gebracht werden. Vor dem Schritt in die Anwendung muss die neue Technologie jedoch noch einige Hürden nehmen und insbesondere eine präzise Kontrolle über den Beschleunigungsprozess erlangen.

Mit einer innovativen Messmethode hat ein Team um DESY-Forscher Jens Osterhoff die beschleunigende Plasmawelle mit zuvor unerreichter Genauigkeit vermessen. Das Verfahren, das den

Verlauf des effektiven Beschleunigungsfelds mit einer Zeitauflösung auf der Skala von Femtosekunden (billiardstel Sekunden) erfassen kann, ermöglicht eine genaue Untersuchung des Beschleunigungsprozesses und ebnet damit den Weg zu einem kontrollierten und optimierten Betrieb künftiger Plasmabeschleuniger.

Als Plasma wird ein Gas bezeichnet, bei dem die Gasmoleküle von ihren Elektronen getrennt wurden. Diese frei beweglichen Plasmaelektronen können durch einen energiereichen Laser- oder Teilchenstrahl zu einer Oszillation gezwungen werden, was zu starken elektrischen Feldern führt. Diese

„Unsere Methode ist ein wichtiger Schritt, um die Plasmawelle im Detail zu verstehen“

Jens Osterhoff, DESY

lassen sich wiederum zur Beschleunigung nutzen. Die DESY-Anlage FLASHForward schießt hierfür Elektronenpakete mit nahezu Lichtgeschwindigkeit in ein Plasma.

Die Beschleunigung auf der Plasmawelle kann bis zu tausendmal stärker sein als in den stärksten konventionellen Anlagen, die heute in Betrieb sind. „Um eine optimale Beschleunigung zu erreichen, müssen die Elektronenpakete und die Welle genau abgestimmt sein“, erläutert die Hauptautorin der Veröffentlichung, Sarah Schröder von DESY und der Universität Hamburg. „Dazu muss man die Form der Welle präzise vermessen können, was auf Grund der geringen Größe der Welle

Blick auf das Beschleunigermodul von FLASH-Forward. Das Plasma wird in dem schmalen Kanal im Zentrum durch eine Hochspannung erzeugt.



von wenigen tausendstel Millimetern sehr anspruchsvoll ist.“

Gedrehtes Elektronenpaket

Das Team entwickelte daher eine Methode, mit der sich die Form des Beschleunigungsfelds der Plasmawelle von den beschleunigten Elektronen selbst ablesen lässt. Dazu wird das Elektronenpaket in einer Anordnung von Magneten quer zur Flugrichtung gedreht, so dass sich durch das Einfahren eines Metallstücks sukzessive von hinten Stücke abschneiden lassen. Anschließend wird das Paket wieder zurückgedreht.

Durch die fehlenden Elektronen verändert sich das Energiespektrum des Elektronenpakets. Das erlaubt einen Rückschluss auf die Stärke des Beschleunigungsfelds am Ort des herausgeschnittenen Paketanteils. Ist das Schneiden des Pakets fein genug eingestellt, lässt sich damit Stück für Stück das Profil des effektiven Beschleunigungsfeldes in der Plasmawelle mit einer zeitlichen Auflösung von Femtosekunden bestimmen. Im Experiment konnte das Team eine zeitliche Auflösung von 15 Femtosekunden erreichen – das entspricht einer Ortsauflösung von rund fünf tausendstel Millimetern in der Welle. Die Forscherinnen und Forscher halten eine noch feinere Auflösung für möglich.

„Wir haben zum ersten Mal das für die Beschleunigung zuständige Feld präzise vermessen“, sagt Schröder. „Mit dieser Messmethode lässt sich nun das Zusammenspiel der einzelnen experimentellen Komponenten und des Beschleunigungsprozesses im Detail untersuchen.“ Von der neuen Technik können auch andere experimentelle Anlagen zur Plasmabeschleunigung profitieren, betont Teamleiter Osterhoff. „Unsere Methode ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg, die Plasmawelle wirklich im Detail zu verstehen und zu optimieren.“

.....
Nature Communications,

DOI: 10.1038/s41467-020-19811-9

REKORD-DAUERLAUF

Es ist ein wichtiger Meilenstein: Erstmals weltweit ist ein Plasma-beschleuniger länger als einen Tag gelaufen und hat dabei kontinuierlich Elektronenstrahlen geliefert. Die Anlage LUX, gemeinsam entwickelt und betrieben von DESY und der Universität Hamburg, erreichte eine Betriebsdauer von 30 Stunden. „Damit sind wir dem Regelbetrieb dieser innovativen Teilchenbeschleunigertechnik ein gutes Stück nähergekommen“, sagt Teamleiter Andreas R. Maier von DESY.

LUX wird mit starken Laserpulsen angetrieben, die in eine feine Kapillare mit Wasserstoffgas geschossen werden. „Die Laserpulse pflügen als schmale Scheiben durch das Gas und entreißen den Wasserstoffmolekülen ihre Elektronen, die wie von einem Schneepflug zur Seite gefegt werden“, beschreibt Maier. „Elektronen im Kielwasser des Blitzes werden von der elektrisch positiv geladenen Plasmawelle vor ihnen beschleunigt – ähnlich wie ein Wakeboard-Surfer in der Heckwelle eines Schiffs.“

100 000 Elektronenpakete

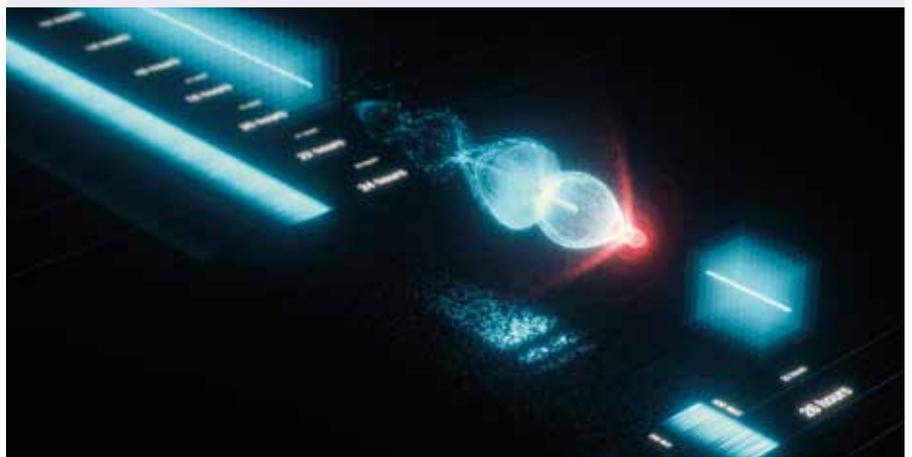
Die Physiker haben während ihres Rekordbetriebs mehr als 100 000 Elektronenpakete auf diese Weise beschleunigt, jede Sekunde eines. Mit dieser

großen Zahl lassen sich die Eigenschaften des Beschleunigers, des Lasers und der Teilchenpakete miteinander in Verbindung setzen und sehr viel genauer auswerten. „Unerwünschte Variationen im Elektronenstrahl lassen sich beispielsweise auf konkrete Punkte im Laserpuls zurückführen, so dass wir jetzt genau wissen, an welcher Stelle wir ansetzen müssen, um einen noch besseren Teilchenstrahl zu bekommen“, sagt Maier.

„Dieser Ansatz legt die Grundlage für eine aktive Stabilisierung der Strahlen, so wie sie an allen modernen Beschleunigern weltweit eingesetzt wird“, erläutert DESY-Beschleunigerdirektor Wim Leemans. „Die Arbeit zeigt, dass Laser-Plasmabeschleuniger eine reproduzierbare und kontrollierbare Leistung bieten können. Das liefert eine konkrete Grundlage für die Weiterentwicklung dieser Technologie zu künftigen beschleunigerbasierten Lichtquellen.“ Eine Reihe technischer Herausforderungen gibt es vor einer Anwendung noch zu meistern. „Auch diese Herausforderungen können wir dank des langen und stabilen Betriebs unserer Anlage jetzt besser angehen“, erläutert Maier.

.....
Physical Review X,

DOI: 10.1103/PhysRevX.10.031039



Bei der Laser-Plasmabeschleunigung erzeugt ein starker Laserpuls (rot) im Wasserstoffgas eine Plasmawelle (blau), indem er Gasmoleküle von ihren Elektronen trennt. Die Elektronen surfen auf der Welle wie ein Wakeboarder hinter dem Heck eines Boots und werden dabei extrem beschleunigt.

femtofinale

Na, wie war's im
PARALLELUNIVERSUM ?

Das hast du mich
dort schon gefragt.



mahler

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.)

An dieser Ausgabe haben mitgewirkt

Frank Grotelüschen, Barbara Warmbein,
Britta Liebaug, Kerstin Straub

Schlussredaktion

Ilka Flegel

Gestaltung und Produktion

Ulrike Darwisch, Diana von Ilseemann

Bildbearbeitung und Herstellung

EHS, Hamburg

Redaktionsschluss

April 2021

femto

Das DESY-Forschungsmagazin

Abonnieren Sie
femto kostenlos!

www.desy.de/femto



Das Forschungszentrum DESY

DESY zählt zu den weltweit führenden Teilchenbeschleuniger-Zentren und erforscht die Struktur und Funktion von Materie – vom Wechselspiel kleinster Elementarteilchen, dem Verhalten neuartiger Nanowerkstoffe und lebenswichtiger Biomoleküle bis hin zu den großen Rätseln des Universums. Die Teilchenbeschleuniger 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 neue Fenster ins Universum.

DESY ist Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft, der größten Wissenschaftsorganisation Deutschlands.