

femto

Das DESY-Forschungsmagazin – Ausgabe 01/17



ZOOM

ULTRA KURZZEIT PHYSIK

Wenn ein Flügelschlag
ewig dauert

**Künstliche Seide
aus Kuhmolke**

**Fünf große Fragen
der Teilchenphysik**

**Eine Brille für
Röntgenlaser**



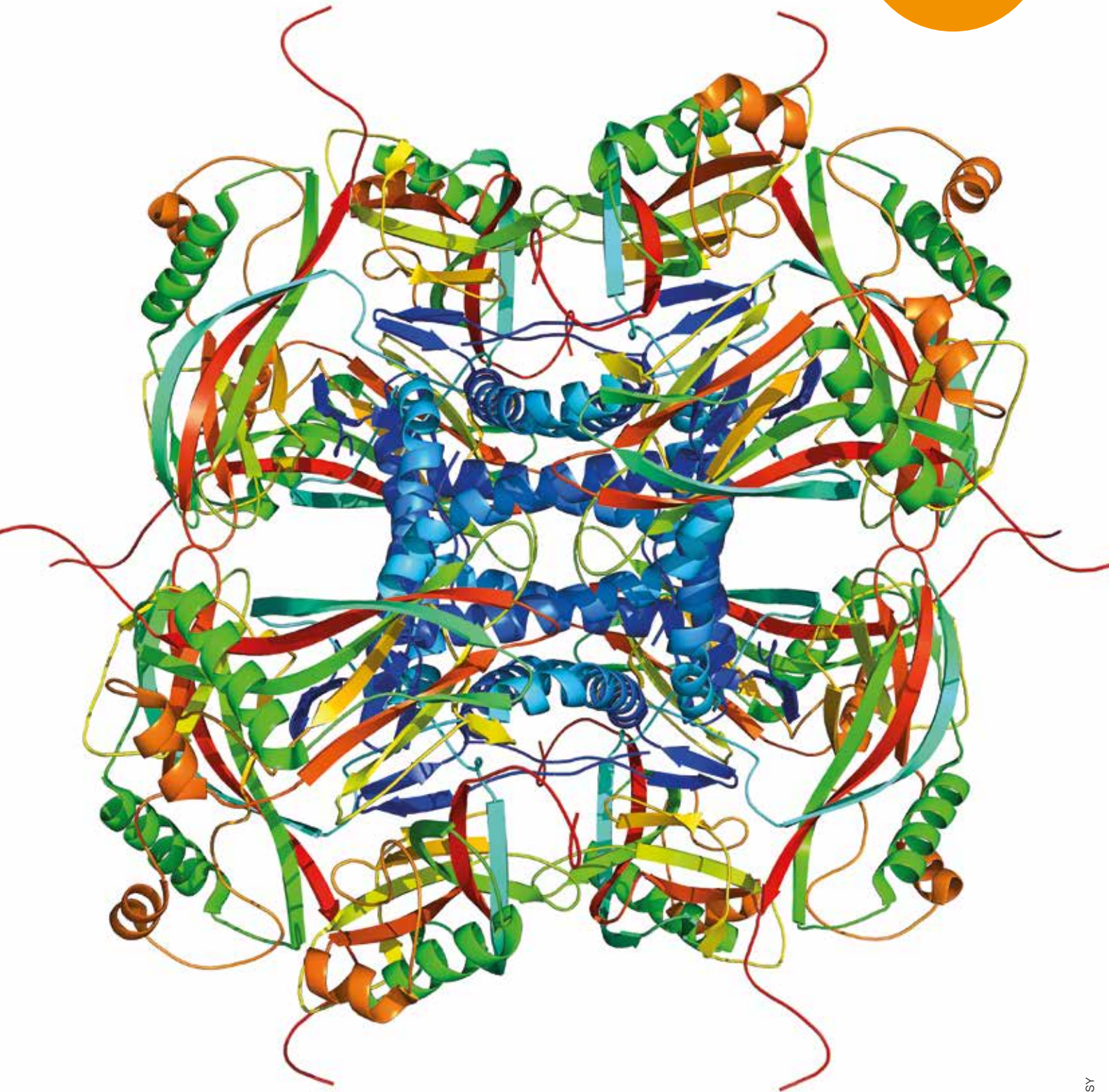
Apfelwickler-Virus-Kokon

Der Volksmund nennt ihn Obstmade. Der Apfelwickler ist ein Schmetterling, dessen Raupen sich durch Äpfel fressen und die Ernte schädigen. Beizukommen ist den Obstmaden mit einem speziellen Virus, das als biologisches Schädlingsbekämpfungsmittel eingesetzt wird. Dieses Granulovirus befällt und tötet die Raupen der Apfelwickler und bleibt dann zunächst mit seinem toten Wirt an Ort und Stelle liegen. Zum Schutz hüllt sich das Virus in einen Kokon aus Proteinkristallen, den kürzlich ein internationales Forscherteam mit den Röntgenpulsen des Freie-Elektronen-Laser LCLS am US-Forschungszentrum SLAC untersucht hat.

„Die eiförmigen Okklusionskörper des Granulovirus sind die kleinsten Proteinkristalle, die je für die Röntgen-Strukturanalyse benutzt worden sind“, erläutert Cornelius Gati von DESY. Die Virus-Kokons haben ein Volumen von etwa 0,01 Kubik-Mikrometern, das ist rund hundert Mal weniger als die kleinsten künstlich gezüchteten Proteinkristalle, die bislang mit der Kristallographie analysiert werden konnten. Die Abbildung zeigt die Bausteine des Virus-Kokons mit einer Detailgenauigkeit von 0,2 Nanometern (millionstel Millimetern) – das entspricht nahezu atomarer Auflösung.

PNAS, 2017; DOI: [10.1073/pnas.1609243114](https://doi.org/10.1073/pnas.1609243114)

femtoskop



Inhalt



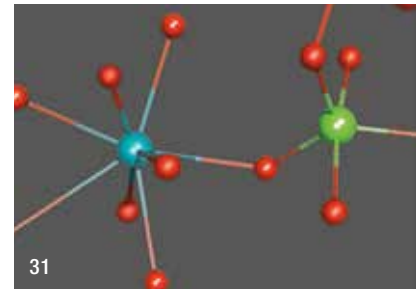
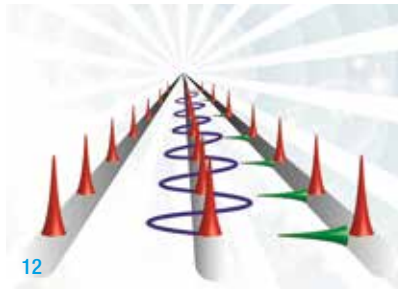
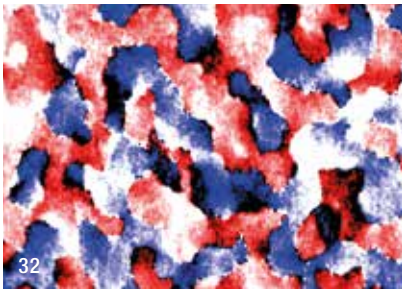
ZOOM

ULTRA KURZZEIT PHYSIK

Wenn ein Flügelschlag ewig dauert

Sein Schwirrflyug ist legendär: Kolibris surren mit 50 Flügelschlägen pro Sekunde durch die Luft. So schnell, dass unser Auge nicht mehr folgen kann. Doch selbst der schnellste Flügelschlag in der Vogelwelt wirkt geradezu lahm im Vergleich zu den Zeitdimensionen, mit denen die Ultrakurzzeitphysik heutzutage hantiert. Dank ausgeklügelter Lasertechnologien gelangen Forschern Schnappschüsse auf der Skala von Femto- und Attosekunden – unvorstellbar kurzen Zeitintervallen von zum Teil weniger als 0,000 000 000 000 001 Sekunden, kürzer als der millionste Teil einer milliardstel Sekunde. Auf diesen Zeitskalen spielen sich die grundlegenden Prozesse der Materie ab.

Seite 12–27



CAMPUS

- 06 Lichtblick für den Nahen Osten**
Röntgenquelle SESAME soll Zusammenarbeit stärken
- 08 Der Bernstein-Beweis**
100 Millionen Jahre altes Fossil löst Rätsel um Stummelfüßer
- 10 Künstliche Seide aus Kuhmolke**
Röntgenuntersuchung enthüllt entscheidenden Schritt
- 32 SMASH**
Fünf große Fragen der Teilchenphysik
- 37 Partnerschaft auf Abstand**
Präziser Test des quantenmechanischen Tunneleffekts
- 38 Eine Brille für Röntgenlaser**
Maßgeschneiderte Korrekturoptik bündelt Röntgenstrahl

ZOOM

- 12 Ultrakurzzeitphysik**
Wenn ein Flügelschlag ewig dauert
- 16 Ein Galopp durch die Kurzzeitphysik**
Schnappschüsse aus der Welt der Atome und Moleküle
- 20 Superzeitlupe zum Selbermachen**
„Flashmotion“ macht wissenschaftliche Methode anschaulich
- 22 Stoppuhr für Atome**
Nobelpreis für das „Pump-Probe“-Verfahren
- 23 Die rasante Welt der Biomoleküle**
Francesca Calegari nimmt die Bausteine des Lebens ins Visier
- 26 Energieforschung der Zukunft**
Simone Techert verfolgt chemische Reaktionen

SPEKTRUM

- 28 Forschung kurzgefasst**
- Licht-Licht-Streuung
 - Moleküle verformen sich bei Nässe
 - Gen-Schalter in Aktion
 - Neue Kristallstruktur in „Gummimetal“
 - Dynamik von Elektronenwolken
 - Goldregen im Röntgenlicht
 - Neue Form von Phosphorverbindung

RUBRIKEN

02 femtoskop
Apfelwickler-Virus-Kokon

18 femtopolis
Die Gegenwart dauert drei Sekunden

31 femtomenal
Helium unter Hochdruck

40 femtofinale
Mehr Pixel für neue Physik

Ein Lichtblick für den Nahen Osten

Die Röntgenquelle SESAME soll wissenschaftliche und politische Zusammenarbeit stärken

Manchmal braucht es einen Teilchenbeschleuniger, um die Menschen zusammenzubringen.

Was in der internationalen Politik oft nur unter großen Anstrengungen funktioniert, scheint in der Wissenschaft kein großes Problem zu sein: Im Projekt SESAME arbeiten Länder wie Israel, der Iran, die palästinensische Autonomiebehörde, die Türkei und Zypern trotz aller politischer Spannungen partnerschaftlich für ein gemeinsames Ziel. Sie haben in Jordanien ein Forschungszentrum errichtet, das die erste Synchrotronstrahlungsquelle der Region beherbergt. Nach der Eröffnung Mitte Mai soll SESAME (Synchrotron-light for Experimental Science and Applications in the Middle East) Wissenschaftlern aus den verschiedensten Forschungsrichtungen ermöglichen, Strukturuntersuchungen mit Röntgenstrahlung zu machen – von der

Durchleuchtung neuer Materialien bis zur Analyse von Biomolekülen. So soll die Forschungslandschaft der Region gestärkt werden. Vor allem junge Forscher sollen in der Region gehalten werden, um langfristig Know-how zu binden. Ein zweites, mindestens genauso wichtiges Ziel von SESAME ist es, den Austausch zwischen den Mitgliedsstaaten zu verbessern. „Es geht nicht nur darum, ein Forschungszentrum aufzubauen, sondern es ist ein friedensstiftendes Projekt, in dem viele Nationen zusammenarbeiten. Das beinhaltet viele Hürden, aber auch große Chancen, wenn das Projekt erfolgreich ist“, sagt Wolfgang Eberhardt, Experte für die Forschung mit Photonen, der für Deutschland als Beobachter im SESAME-Rat sitzt.

Der Weg zum fertigen Forschungszentrum war nicht einfach und von manchen Phasen des Stillstands geprägt. Die Idee für das Projekt hatten schon 1997 die Forscher Herman Winick vom US-Beschleunigerzentrum SLAC und Gustav-Adolf Voss, damals Beschleunigerdirektor bei DESY. Sie schlugen vor, den Berliner Beschleuniger BESSY I, der durch eine neuere Maschine ersetzt werden sollte, für eine Anlage im Nahen Osten zu spenden. Die Bundesregierung stimmte diesem Plan zu. Mit Unterstützung der UNESCO kam es zur Gründung von SESAME, das 2004 zu einem zwischenstaatlichen Projekt von Jordanien, Israel, dem Iran, Ägypten, Bahrain, der Türkei, Zypern, der palästinensischen

Autonomiebehörde und Pakistan wurde. Lange Zeit ging es mit SESAME allerdings nur langsam voran, was vor allem an fehlendem Geld lag.

Seit drei Jahren gibt es große Fortschritte, auch, da durch eine Millionenförderung der Europäischen Kommission ein neuer Speicherring mitfinanziert und aufgebaut werden konnte. Heute ist SESAME eine Synchrotronstrahlungsquelle der dritten Generation, für die BESSY I in verbesserter Version als Injektor dient. Ende 2016 konnte die Inbetriebnahme der Anlage beginnen, im Januar 2017 lief der erste Elektronenstrahl vollständig durch den Speicherring. In der zweiten Jahreshälfte sollen die Experimente an den beiden ersten Messstationen beginnen, im Laufe der Zeit werden weitere Stationen hinzukommen. „Viele Kritiker haben die Schwierigkeiten für zu groß gehalten und den möglichen Ertrag für zu gering. Wenn jetzt bald die ersten Forschungsergebnisse erscheinen, ist es wirklich eine tolle Sache“, sagt Eberhardt.

Vielfältige Experimente

Künftig wird ein neuer Vorsitzender den SESAME-Rat leiten, das oberste Entscheidungsgremium: Rolf-Dieter Heuer war lange Jahre Forschungsdirektor bei DESY, bevor er 2009 Generaldirektor des europäischen Teilchenforschungszentrums CERN bei Genf wurde. Heuer wird nun



Rolf-Dieter Heuer,
Vorsitzender des
SESAME-Rats

SESAME in die Betriebsphase führen. „SESAME bietet nicht nur vielfältige wissenschaftliche Möglichkeiten, von der Physik über Lebenswissenschaften bis hin zur Archäologie, einmalig in dieser Region. Diese Forschungsanlage soll auch als Brücke für die Völkerverständigung über politische, kulturelle und religiöse Weltanschauungen dienen – wie einst das CERN nach dem Zweiten Weltkrieg: Naturwissenschaft kennt keine nationalen, politischen oder weltanschaulichen Grenzen. Diese Chance gilt es zu nutzen!“, sagt Heuer.

SESAME soll dabei auch den Austausch mit Ländern in Europa und anderen Regionen stärken. Viele Staaten sitzen als Beobachter im SESAME-Rat und unterstützen das Projekt mit Geld oder durch Maschinen und Expertise, viele europäische Forschungszentren arbeiten eng mit SESAME zusammen. Bei DESY gab es mit Gustav-Adolf Voss von Beginn an einen starken Unterstützer des Projekts. „Gustav-Adolf Voss hat sehr dabei geholfen, SESAME strukturell aufzubauen. Es gab mit anderen Instituten zusammen ein umfangreiches Capacity-Building-Programm, in dem Wissenschaftler und Techniker aus der Region in den Forschungszentren ausgebildet wurden“, sagt Frank Lehner von DESY, der heute die Zusammenarbeit von DESY und SESAME organisiert. „Mehrere von ihnen kamen Anfang 2000 auch zu DESY.“

SESAME öffne dich!
Das internationale
Forschungszentrum
soll Wissenschaftlern
aus der ganzen Region
offenstehen.

Momentan läuft noch
die Inbetriebnahme
des SESAME-Beschleunigers.
Aber in der
zweiten Jahreshälfte
sollen die ersten
Experimente beginnen.



Völkerverständigung durch Forschung

Einer davon ist Hossein Delsim-Hashemi. Er erforschte kosmische Strahlung an der Sharif University of Technology im Iran, als er 2000 als einer von sieben Iranern zu einem SESAME-Workshop nach Jordanien kam. Er sollte eine Stelle in der SESAME-Injektor-Gruppe bekommen und kam für die Ausbildung zu DESY. „SESAME zeigt, dass die Länder der Region zusammenarbeiten und gemeinsame Ziele verfolgen können. So könnte das Projekt Wissenschaftlern ermöglichen, zusammenzukommen und vielleicht sogar in ihre Heimatländer zurückzukehren. In den beteiligten Ländern gibt es großes Potenzial“, sagt der Iraner, der sich allerdings gewünscht hätte, dass SESAME schon einige Jahre früher die Tore öffnet.

Auch nach der Emeritierung von Gustav-Adolf Voss unterstützt DESY das Projekt auf verschiedenen Wegen. Unter anderem versucht Lehner derzeit, Mittel für eine weitere SESAME-Messstation zu sammeln, die von Deutschland aus finanziert werden könnte. „Wir sollten ein deutliches Zeichen setzen, dass in Deutschland der Wille vorhanden ist, in den Ländern des

Nahen Ostens zukunftsweisende Projekte zu schaffen. SESAME ist ein solches Projekt, das in der Region Forschungskapazitäten aufbauen könnte, die nachhaltig dort bleiben“, betont Lehner. Zusätzlich ist DESY gemeinsam mit neun weiteren europäischen Forschungszentren Teil des EU-finanzierten OPEN-SESAME-Projekts, mit dem Wissenschaftler und Personal für SESAME ausgebildet werden sollen.

Aber auch andere Forschungszentren könnten von SESAME lernen. Denn in mindestens einem Bereich könnte das Forschungszentrum schon bald ein Vorreiter sein: Es gibt Pläne, den Stromverbrauch des Speicherrings vollständig durch Solarenergie zu decken. Dafür hat die jordanische Regierung Land ausgewiesen, mit EU-Mitteln werden Photovoltaikanlagen aufgebaut. Zusätzlich wird es eine Kooperation mit den lokalen Stromversorgern geben, die das Problem der Speicherung des Stroms lösen soll. Tagsüber wird überschüssiger Strom ins Netz eingespeist, nachts wird dafür dann Energie aus dem Netz bezogen. SESAME wird damit der erste Beschleuniger sein, der komplett aus nachhaltigen Energiequellen betrieben wird.

„Naturwissenschaft
kennt keine nationalen,
politischen oder welt-
anschaulichen Grenzen“

Rolf-Dieter Heuer

Der Bernstein-Beweis

100 Millionen Jahre altes Fossil löst Rätsel um Ausbreitung der Stummelfüßer



Unterer Jura
(vor ca. 200 Millionen Jahren)



Mittlere Kreidezeit
(vor ca. 100 Millionen Jahren)



Holozän (heute)



Das in Myanmar gefundene Bernstein-Fossil stammt aus der Mittleren Kreidezeit, als Indien noch eine Insel war.

■ kontinentale Kruste
■ heutiges Indien

Bernstein ist nicht nur ein hübscher Schmuck, sondern auch ein wertvolles Archiv für urtümliche Tier- und Pflanzenarten, die in dem Baumharz vor Jahrmillionen konserviert wurden. Dazu gehört auch der Vertreter einer Tiergruppe, die nur auf den ersten Blick unscheinbar und wurmartig aussieht: ein Stummelfüßer, der vor rund 100 Millionen Jahren nahezu perfekt in Bernstein eingeschlossen wurde und den Forscher im heutigen Myanmar entdeckt haben. Die Stummelfüßer (*Onychophora*), sind eine urtümliche Gruppe, die irgendwo zwischen Ringelwürmern und Gliederfüßern angesiedelt sind. Ihre Stummelbeine, an deren Spitze

jeweils ein Krallenpaar sitzt, heben sie von den beinlosen Würmern ab. Auch andere Merkmale der unscheinbaren Tierchen geben Hinweise darauf, wie sich die Entwicklung von den einfacher organisierten Ringelwürmern hin zu Krebsen und Insekten vollzogen haben könnte. Grund genug also, dem stummelfüßigen Bernsteinfossil mit einer ausgeklügelten Tomographietechnik zu Leibe zu rücken.

Mit Hilfe des intensiven Röntgenlichts der DESY-Lichtquelle PETRA III konnten Forscher der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking, der Universität Kassel und des Helmholtz-Zentrums Geesthacht das seltene

Bernsteinfossil extrem genau mit Hilfe der Mikrotomographie untersuchen, ohne es zu beschädigen. Die Studie zeigte nicht nur feinste Details im Körperbau, sondern lieferte auch die Lösung eines jahrzehntealten Rätsels um die Ausbreitung der Stummelfüßer in der Kreidezeit.

Heute findet man diese Tiergruppe vor allem in Gebieten, die einst Teile des Großkontinents Gondwana waren, der bis vor etwa 150 Millionen Jahren unter anderem Südamerika, Afrika, Indien, Australien und die Antarktis vereinte. Allerdings leben einige Stummelfüßer auch in Südostasien – einem Gebiet, das nie mit Gondwana verbunden war. Bislang gab es für dieses Auftreten zwei Hypothesen: Entweder haben die Stummelfüßer Südostasien von Afrika aus über Europa besiedelt, als die entsprechenden Landmassen zusammen den Superkontinent Pangäa bildeten (Eurogondwana-Hypothese), oder die Stummelfüßer sind durch die Kontinentaldrift nach Südostasien transportiert worden, so dass sie sich nach der Kollision von Indien mit Asien in Südostasien ausgebreitet haben („Out-of-India“-Hypothese). Den endgültigen Beweis gegen die „Out-of-India-Hypothese“ lieferte jetzt das Bernsteinfossil.

Es stammt aus dem südostasiatischen Staat Myanmar, der heute unter anderem an Thailand, China und Indien grenzt. Vor über 100 Millionen Jahren, zu der Zeit, als die Stummelfüßer in der Region des heutigen Myanmar lebten, war Indien jedoch noch nicht Teil des asiatischen Kontinents – das „Transportmittel“ des heutigen Subkontinents konnten sie also nicht genutzt haben. Sowohl das Alter des Fossils als auch dessen beeindruckende morphologische Ähnlichkeiten mit den heute in Indien lebenden Stummelfüßern ließen die Wissenschaftler darauf schließen, dass die Stummelfüßer bereits vor der Kollision Indiens mit Asien auf dem Landweg über Europa nach Südostasien eingewandert sein müssen. Erst nach der Kollision hatten sie dann die Möglichkeit, sich nach Indien auszubreiten.

„Die sogenannte ‚Out-of-India‘-Hypothese können wir jetzt ausschließen“, fasst Teamleiter Georg Mayer zusammen, der das Fachgebiet Zoologie an der Universität Kassel leitet. „Anders als Indien war Myanmar nicht vom Rest der südostasiatischen Platte isoliert, wurde also von der Kontinentaldrift nicht betroffen – der Stummelfüßer aus Myanmar ist jedoch mit der indischen Art am nächsten verwandt. Und er existierte deutlich vor der Kollision zwischen Indien und Asien.“

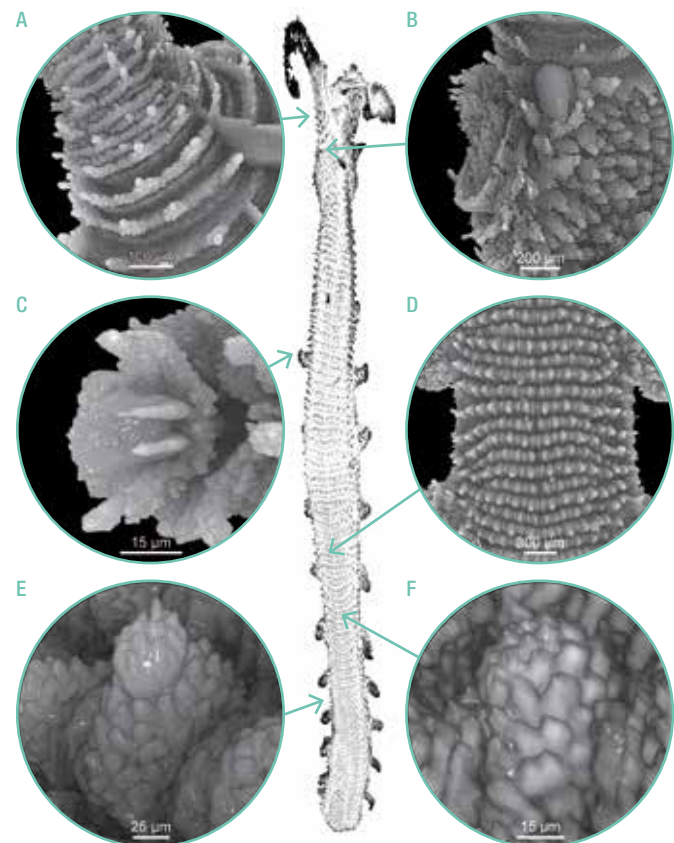
Auch über die evolutionäre Entwicklung des Stummelfüßers können die Forscher nun detailliertere Angaben machen, wie Mayer er-

läutert: „Beispielsweise sind bei dem Fossil, das uns vorliegt, sehr klar Augen zu erkennen. Diese sind den indischen Stummelfüßern im Laufe der Evolution verlorengegangen. Auch interessant für uns: Das Fossil hatte eindeutig Krallen. Bei früheren Fossilfunden konnten diese nicht gefunden werden.“ Die Bedeutung dieser Studie liegt auch in der Seltenheit der in Bernstein erhaltenen Stummelfüßer: Weltweit gab es bisher nur drei Bernsteinfossilien, die an verschiedenen Orten gefunden wurden.

.....
Current Biology, 2016; DOI: 10.1016/j.cub.2016.07.023

„Die sogenannte ‚Out-of-India‘-Hypothese können wir jetzt ausschließen“

Georg Mayer, Universität Kassel



Die Mikrotomographie mit Röntgenlicht zeigt Details im Körperbau des Bernsteinfossils.

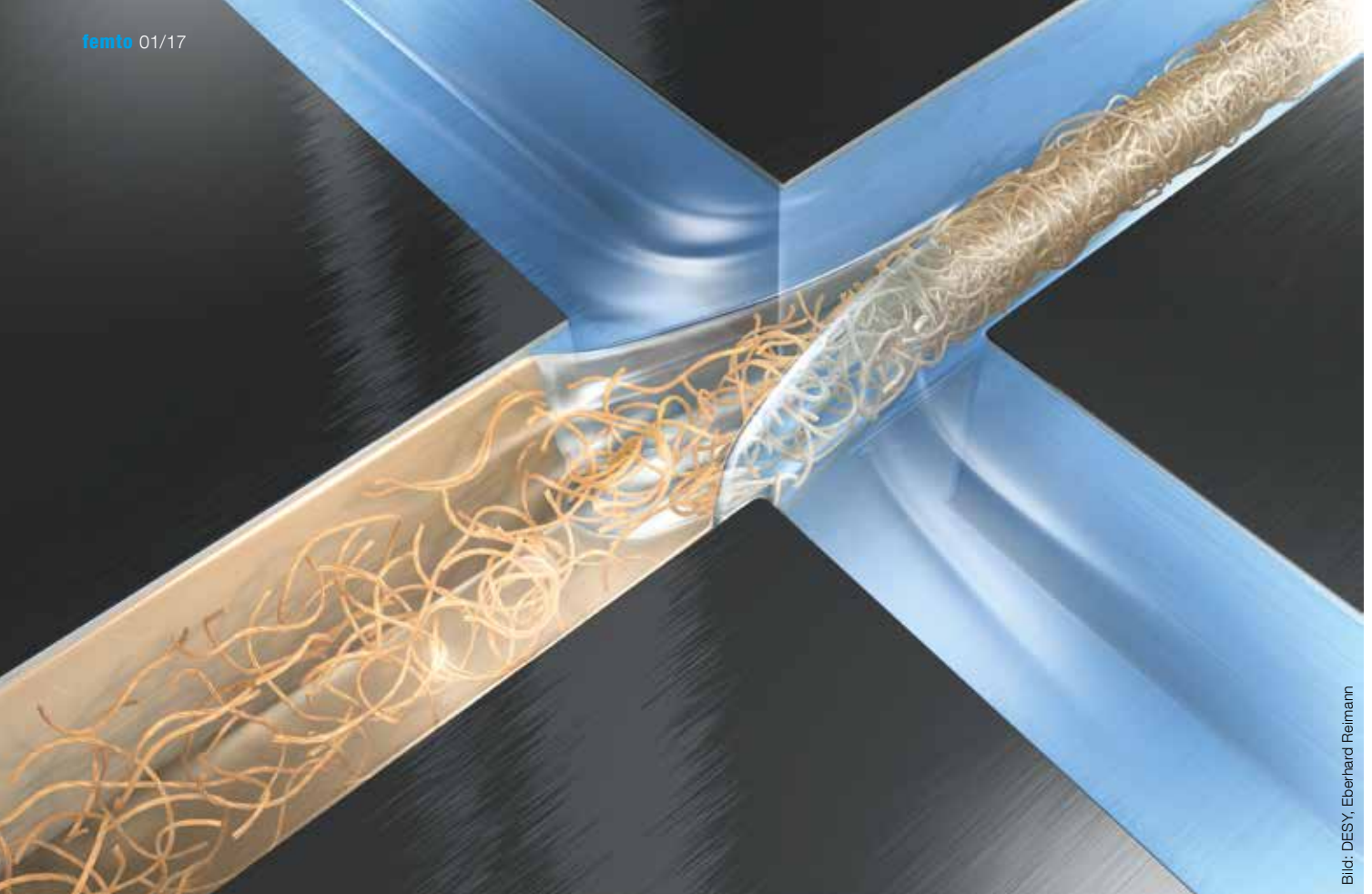


Bild: DESY, Eberhard Reimann

Künstliche Seide aus Kuhmolke

Röntgenuntersuchung enthüllt entscheidenden Schritt für die Produktion

Ein schwedisch-deutsches Forscherteam hat bei DESY einen zentralen Prozess für die künstliche Produktion von Seide entschlüsselt. Mit Hilfe von intensivem Röntgenlicht konnten die Wissenschaftler um Christopher Lendel und Fredrik Lundell von der Königlich-Technischen Hochschule (KTH) Stockholm beobachten, wie sich kleine Proteinstückchen – sogenannte Fibrillen – zu einem Faden verhaken. Dabei zeigte sich, dass die längsten Proteinfibrillen überraschenderweise als Ausgangs-

material schlechter geeignet sind als Proteinfibrillen minderer Qualität.

Seide ist ein begehrtes Material mit vielen erstaunlichen Eigenschaften: Sie ist ultraleicht, belastbarer als manches Metall und kann extrem elastisch sein. Bislang wird Seide aufwendig aus gezüchteten Raupen gewonnen. „Weltweit arbeiten zahlreiche Forschergruppen daran, Seide künstlich herzustellen“, betont Stephan Roth von DESY, der auch Professor an der KTH ist. „Solches Material könnte auch so modifiziert werden, dass es

neue Eigenschaften bekommt, und beispielsweise für Biosensoren oder selbstauflösende Wundverbände dienen.“

Die Natur nachzuahmen ist in diesem Fall allerdings besonders schwierig. Das schwedische Team setzt dabei auf eine Selbstmontage des biologischen Ausgangsmaterials. „Das ist ein im Grunde sehr einfacher Prozess“, erläutert Lundell. „Manche Proteine bilden unter den richtigen Umgebungsbedingungen von selbst Nanofibrillen. Diese Proteinfibrillen werden dann in einer Trägerflüssig-

Durch die Fokussierung mit Hilfe seitlicher Wasserstrahlen verknäulen sich die Proteinfibrillen zu einer Mikrofasern.

„Solches Material könnte auch so modifiziert werden, dass es für Biosensoren oder selbstauflösende Wundverbände dienen kann“

Stephan Roth, DESY

keit durch einen Kanal gepresst, in dem sie mit zusätzlichen seitlichen Wasserstrahlen so stark verdichtet werden, dass sie sich zusammenlagern und eine Faser formen.“ Die Forscher nennen letzteren Prozess hydrodynamische Fokussierung. Auf diese Weise hatte ein Team um Lundell auch bereits künstliche Holzfasern aus Zellulosefädchen hergestellt. „Tatsächlich hat der Prozess einige Gemeinsamkeit mit der Art und Weise, wie Spinnen ihre Seide produzieren“, sagt Lendel.

Die optimale Molke-Faser

Als Ausgangsmaterial nutzten die Forscher in der aktuellen Studie ein Molkeprotein, das unter dem Einfluss von Hitze und Säure Nanofibrillen bildet. Die längsten und dicksten Fibrillen entstehen bei einer Proteinkonzentration von weniger als vier Prozent in der Lösung. Sie werden im Mittel knapp 2000 Nanometer (millionstel Millimeter) lang und 4 bis 7 Nanometer dick. Bei einer Proteinkonzentration von mehr als sechs Prozent in der Lösung bleiben die Fibrillen dagegen mit durchschnittlich 40 Nanometern deutlich kürzer und werden auch nur 2 bis 3 Nanometer dick. Zudem sind sie wurmartig gekrümmt statt gerade und 15 bis 25 Mal weicher als die langen Fibrillen.

Im Labor zeigte sich jedoch, dass aus den langen, geraden Fibrillen schlechtere Fasern entstehen als aus den kurzen, gekrümmten. Mit DESYs extrem heller Röntgenlichtquelle PETRA III konnten die Wissenschaftler nun erkunden, warum dies so ist. „Die krummen Nanofibrillen verhaken sich viel

besser miteinander als die geraden. Im Röntgenstreubild sieht man, dass die Struktur der gekrümmten Fibrillen auch in der fertigen Faser erhalten bleibt“, berichtet Roth, der die DESY-Messstation leitet, an der die Versuche stattfanden.

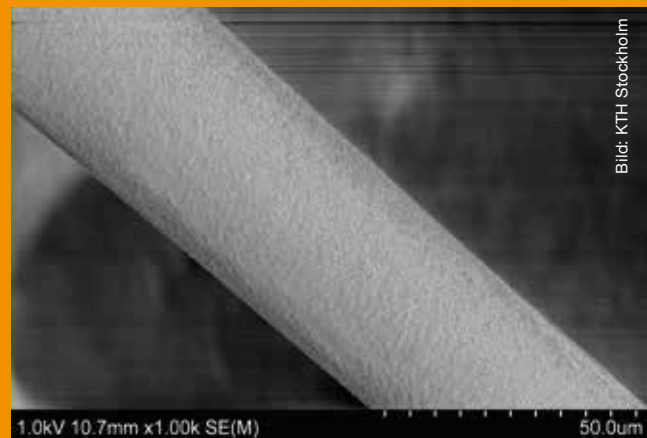
„Die stärksten Fasern entstehen bei einer ausgewogenen Balance zwischen einer geordneten Nanostruktur des Materials und einer Verflechtung der Fibrillen“, ergänzt Lendel. „Natürliche Seide hat eine noch komplexere Struktur aus evolutionär optimierten Proteinen. Sie fügen sich so zusammen, dass es sowohl Regionen mit starker Ordnung gibt, sogenannte Beta-Sheets, die der Faser Stärke verleihen, als auch Regionen mit geringer Ordnung, die der Faser Flexibilität geben. Die Faserstrukturen der künstlichen und der natürlichen Seide unterscheiden sich allerdings wesentlich. Insbesondere haben die Proteinketten in natürlicher Seide eine größere Zahl intermolekularer Wechselwirkungen, die die Proteine verbinden und zu einer stärkeren Faser führen.“

In den Versuchen entstanden etwa fünf Millimeter lange Seidenfasern von mittlerer Qualität. „Wir haben das Molkeprotein benutzt, um das zu Grunde liegende Prinzip zu verstehen“, erläutert Lendel. „Der gesamte Prozess lässt sich nun optimieren, um Fasern mit besseren oder maßgeschneiderten Eigenschaften herzustellen.“ Die Erkenntnisse könnten dabei auch der Entwicklung anderer Materialien mit neuartigen Eigenschaften dienen, etwa künstlichem Gewebe für die Medizin.

PNAS, 2017; DOI: 10.1073/pnas.1617260114

„Der gesamte Prozess lässt sich nun optimieren, um Fasern mit besseren oder maßgeschneiderten Eigenschaften herzustellen“

Christofer Lendel, Königlich-Technische Hochschule (KTH) Stockholm



Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer künstlich hergestellten Mikrofaser

ZOOM

ULTRA KURZZEIT PHYSIK

Wenn ein Flügelschlag ewig dauert

Sein Schwirrflug ist legendär: Kolibris surren mit 50 Flügelschlägen pro Sekunde durch die Luft. So schnell, dass unser Auge nicht mehr folgen kann. Doch selbst der mit großem Abstand schnellste Flügelschlag in der Vogelwelt wirkt geradezu lahm im Vergleich zu den Zeitdimensionen, mit denen die Ultrakurzzeitphysik heutzutage hantiert. Dank ausgeklügelter Lasertechnologien gelangen Forschern Schnappschüsse auf der Skala von Femto- und Attosekunden – unvorstellbar kurzen Zeitintervallen von zum Teil weniger als 0,000 000 000 000 001 Sekunden, kürzer als der millionste Teil einer milliardstel Sekunde – und billionen Mal kürzer als der Flügelschlag des Kolibris. Auf diesen unvorstellbar kurzen Zeitskalen spielen sich die grundlegenden Prozesse der Materie ab: die Reaktionskette der Photosynthese im Blattgrün, die chemischen Prozesse in einem Katalysator, die Bewegungen von Elektronen in Atomen und Molekülen. In welche Dimensionen die Forscher dabei vordringen, veranschaulicht Francesca Calegari, Expertin für Kurzzeitphysik bei DESY, so: „Eine Attosekunde verhält sich zu einer Sekunde wie eine Sekunde zum Alter des Universums!“



Selbst der sprichwörtliche Wimpernschlag ist billionenmal langsamer als die molekulare Maschinerie der Photosynthese. Die Grafik zeigt einige typische Prozesse, die in Zeiten zwischen einer Viertelstunde und einer Attosekunde ablaufen. Bei jedem Schritt verkürzen sich dabei die Zeiträume um das Tausendfache: Eine Millisekunde ist tausendmal kürzer als eine Sekunde, eine Mikrosekunde ist wiederum tausendmal kürzer, und so weiter.



900 Sekunden dauert das „**akademische Viertel**“, das tolerierte Zuspätkommen bei Vorlesungen.



Knapp **0,15 Sekunden** dauert ein menschlicher **Wimpernschlag**.

400 Mikrosekunden dauert die Hauptentladung eines **Blitzes** bei Gewitter.



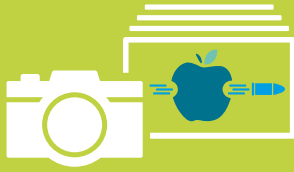
SEKUNDEN	MILLISEKUNDEN	MIKROSEKUNDEN
1 s	0,001 s	0,000 001 s

Einmal pro Sekunde. schlägt das **Herz** eines Menschen in Ruhe.



In **20 Millisekunden** schlägt der **Kolibri** einmal mit seinen Flügeln.

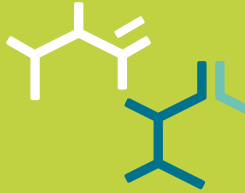




1 Mikrosekunde ist die Belichtungszeit moderner **Hochgeschwindigkeitskameras**. Sie schaffen bis zu eine Million Bilder pro Sekunde.



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



In **Pikosekunden** laufen **chemische Reaktionen** ab.

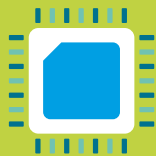
NANOSEKUNDEN
0,000 000 001 s

PIKOSEKUNDEN
0,000 000 000 001 s

FEMTOSEKUNDEN
0,000 000 000 000 001 s

ATTOSEKUNDEN
0,000 000 000 000 000 001 s

Kürzer als eine **Nanosekunde** ist die Taktzeit eines modernen **PC-Prozessors**.



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



EIN GALOPP DURCH DIE KURZZEITPHYSIK

Kalifornien, 1872. In dem noch jungen Bundesstaat war Leland Stanford ein wichtiger Mann. Der steinreiche Eisenbahnunternehmer wird später eine der erfolgreichsten Hochschulen der USA gründen – die Stanford-Universität. Doch seine Leidenschaft galt den Pferden. Stanford trieb eine Frage um: Wenn das Tier schnell trabt – hat es dann zu irgendeinem Zeitpunkt alle vier Hufe in der Luft? Des Rätsels Lösung sollte ein innovativer Fotograf liefern: Eadweard Muybridge entwickelte eine Technik, mit der eine spektakuläre Serienaufnahme gelang. Sie zeigt bis ins letzte Detail, wie ein Pferd beim Traben seine Beine bewegt. Die Bildfolge gilt als Geburtsstunde eines hochaktuellen Forschungszweigs – der Kurzzeitphysik.

Im Laufe der Zeit gelang es den Forschern, immer kürzere Zeitspannen einzufangen. Mittlerweile sind ihre Apparate in der Lage, Schnappschüsse im Bereich von Femto- und Attosekunden zu machen – Zeitintervalle von zum Teil weniger als 0,000 000 000 000 001 Sekunden, kürzer als der millionste Teil einer milli-

ardstel Sekunde. Auf diesen Zeitskalen spielen sich die grundlegenden Prozesse der Materie ab: Ein Sonnenstrahl trifft auf das Blattgrün einer Pflanze und bringt dort blitzschnelle Reaktionen in Gang – die Photosynthese. In Atomen springen Elektronen von einer Energiestufe auf die nächste – Quantensprünge werden messbar.

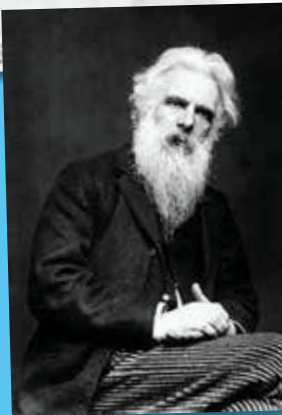
Die Verfahren, mit denen Wissenschaftler solche Zeitlupenaufnahmen der Extreme gelingen, sind raffiniert: Laserapparaturen erzeugen enorm kurze Lichtpulse, mit denen sich selbst ultraschnelle Prozesse wie die Bewegung eines Elektrons im Atom regelrecht „einfrieren“ lassen. Spezielle Nachweismethoden können die rasanten Prozesse festhalten. Und kilometergroße Beschleunigeranlagen, die intensive, ultrakurze Röntgenlichtblitze erzeugen, können nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich hochaufgelöste Messdaten liefern. In Hamburg betreibt DESY gleich mehrere dieser Supermikroskope. Der Campus ist eine Hochburg der Kurzzeitphysik, in der DESY, die Max-Planck-Gesellschaft und die Universität Hamburg eng zusammenarbeiten.

Die Grenzen unserer Wahrnehmung

Unsere Sinne sind nicht ansatzweise in der Lage, schnelle Naturprozesse zu erfassen: Das menschliche Auge kann pro Sekunde maximal 30 Lichtreize voneinander unterscheiden. Darüber nimmt es ein kontinuierliches Bild wahr. Davon profitiert die Fernsehtechnik: 50 Bilder pro Sekunde reichen, um die Illusion eines bewegten Bildes zu erzeugen. Um diese Grenzen der Wahrnehmung zu überwinden, bedarf es raffinierter Hochgeschwindigkeitstechniken. Die Grundzüge dafür entstanden vor nahezu 140 Jahren im Wilden Westen der USA.

Um das Rätsel des Pferdetrabs zu klären, stellte Stanford dem Fotografen Eadweard Muybridge eine erhebliche Summe in Aussicht. Das Problem: Mit den damaligen Kameras war es unmöglich, derart schnelle Bewegungen auf Platte zu bannen. Muybridge, ein unsterker Geist, ehrgeizig und besessen, musste sich etwas einfallen lassen: Zum einen erfand er einen Kameraverschluss mit kurzer Belichtungszeit. Zum anderen stellte er zwölf Kameras in einer Reihe auf. Jede von ihnen wurde durch eine Art Stolperdraht ausgelöst, den der Fotograf in den sandigen Boden verlegt hatte – dort, wo das Pferd entlanglaufen sollte. Als dann das Tier an den Kameras vorbeitrabte, berührte es einen Stolperdraht nach dem anderen und löste dadurch die Kameras aus. Das Resultat: Die erste Bilderfolge der Welt, der Vorläufer des Kinofilms. Als Leland Stanford die Ergebnisse sah, war er überrascht: Die Stellung der Beine beim Trab war anders als erwartet. Aber die Bilder bewiesen, dass das Pferd im schnellen »

1872



Fotopionier Eadweard Muybridge entwickelte eine Technik, die im Detail zeigt, wie ein Pferd seine Beine bewegt.

DIE GEGENWART DAUERT 3 SEKUNDEN

Wenn eine Femtosekunden-Forscherin voller Eifer in ihren Experimenten steckt, vergeht für sie die Zeit wahrscheinlich wie im Fluge. Ehe sie sich's versieht, sind wieder drei Stunden rum. Es ist nur noch schnell Zeit für ein belegtes Brötchen und eine Tasse Tee, bevor das nächste Meeting beginnt. Doch wie ewig dauert es, bis das Tee-wasser endlich kocht. Und die drei Minuten, die der Tee ziehen muss, schleppen sich fast länger dahin als die drei Stunden im Labor.

Zeit ist eben nicht nur eine physikalische Größe. Wie wir sie wahrnehmen, ist zutiefst menschlich und entsprechend unberechenbar. Zwischen der subjektiv wahrgenommenen Zeit und der objektiv messbaren bestehen oft deutliche Unterschiede. Wenn wir viel Neues

erleben, vergeht die Zeit für uns sehr schnell. Anders in der Rückschau: Wenn wir uns an die vielen Ereignisse erinnern, erscheint uns dieselbe Zeit im Nachhinein lang.

Quälend langes Warten hingegen kommt uns schier endlos vor. In der Erinnerung aber scheint diese ereignislose Zeit kurz. Im Nachhinein prägt die Menge an unterschiedlichen Erfahrungen, die aus dem Gedächtnis für den betreffenden Zeitraum abgerufen werden, die subjektiv empfundene Dauer. Je mehr man erlebt und sich daran auch erinnern kann, desto länger kommt einem eine Zeitspanne später vor.

Auch unsere Femtosekunden-Forscherin, die im Labor mit extrem präziser Zeitmessung arbeitet, erlebt in ihrem Alltag das ganze Spektrum subjektiven Zeitempfindens. Sie kann sich Zeit nehmen, sie anderen schenken, aber auch

stehlen. Sie kann Zeit gewinnen oder verlieren, sie anhalten, sparen oder totschießen. Ihre Wahrnehmung ist auf das begrenzt, was die menschlichen Sinne zu leisten vermögen. Optische Eindrücke müssen 20 bis 30 Millisekunden auseinanderliegen, um getrennt wahrgenommen zu werden, während für akustische Reize bereits drei Millisekunden ausreichen.

Und auch für unsere Forscherin dauert die Gegenwart maximal drei Sekunden. In diesem Zeitraum kann unser Gehirn Ereignisse unmittelbar zusammenbringen, wie etwa die Folge von Tönen in einer Melodie. Danach ist die sogenannte Integrationsfähigkeit des Gehirns erschöpft. Über die Kulturen hinweg sind beispielsweise Sprache und Bewegungen in Drei-Sekunden-Blöcke strukturiert. Biologen nennen diesen universellen Hirnmechanismus das Drei-Sekunden-Phänomen.

Bitte
3 Minuten
ziehen
lassen

› Trab mit allen Vieren vom Boden abhebt. Kurze Zeit später zeigte Muybridge das auch für den Galopp der Tiere. Die legendären Bildfolgen bildeten den Startschuss für das Einfrieren kleinster Momente. Nachfolgende Generationen verfeinerten die Technik und konnten dadurch immer kürzere Zeitspannen auflösen.

So entwickelten die Ingenieure im Laufe der Jahrzehnte mechanische Verschlüsse mit immer kürzeren Verschlusszeiten. Die besten schafften immerhin einen Wert von 1/8000 Sekunde. Später folgten die elektronischen Verschlüsse. Hier wird die Belichtung des Kamerachips elektronisch ein- und ausgeschaltet. Da im Gegensatz zum mechanischen Verschluss keine Massen mehr beschleunigt werden müssen, funktioniert das deutlich schneller: Moderne Hochgeschwindigkeitskameras schaffen bis zu eine Million Bilder pro Sekunde und ermöglichen dadurch höchst eindrucksvolle Zeitlupeneinstellungen etwa einer Gewehrkuugel, die in einen Apfel einschlägt – das Muybridge-Prinzip in Perfektion. Nur: „Diese Zeiträume im Mikrosekundenbereich sind auf der wissenschaftlichen Skala eher lang“, sagt der Physiker Markus Drescher von der Universität Hamburg. „Viele Prozesse in der Natur laufen deutlich rascher ab, millionen- oder sogar milliardenfach schneller.“ Insbesondere im Nanokosmos ticken die Uhren deutlich schneller, etwa wenn Stoffe chemisch miteinander reagieren.

Szenario für einen Wimpernschlag

Um dennoch solche Geschehnisse detailliert verfolgen zu können, brauchte es einen Paradigmenwechsel: Früher nutzte man eine dauerhafte Lichtquelle wie die Sonne, um deren Licht mit einem mechanischen oder elektronischen Verschluss zu „zerhacken“. Jetzt bleibt der Verschluss offen, und die Forscher erhellen das Szenario für einen Wimpernschlag mit extrem kurzen Blitzen. Bei diesem Verfahren hängt die mögliche Zeitauflösung von der Länge der Blitze ab. Konventionelle Blitzlampen können Lichtpulse mit einer Dauer von wenigen Mikrosekunden liefern – bereits deutlich besser als ein mechanischer Verschluss.

Doch der wahre Durchbruch erfolgte, als der US-Physiker Theodore Maiman 1960 den ersten Laser vorstellte – eine Vorrichtung basierend auf einem Rubinkristall, die ungemein gebündelte rote Lichtpulse abgab. „Danach ging in der technischen Entwicklung die Post ab“, sagt Drescher. „In jedem Jahrzehnt gelang es, die Pulse um durchschnittlich eine Größenordnung kürzer zu machen.“

Die Zeitskala von Attosekunden, also milliardstel milliardstel Sekunden, erreichte Drescher im Team des Physikers Ferenc Krausz um das Jahr 2000 in Wien. Wie die Technik funktioniert, demonstriert Drescher in einem seiner Labore auf dem Hamburger Campus – ein langgestreckter, fensterloser Raum, erfüllt vom Dröhnen und Rauschen der Pumpen und Klimaaggregate. Auf einem massiven, schwingungsgedämpften Tisch sind unzählige optische Elemente montiert sowie diverse wuchtige Gehäuse. „Ein Hochleistungslaser der Gigawatt-Klasse“, beschreibt Drescher. „In jedem seiner Infrarot-Pulse steckt eine Leistung von rund 100 Gigawatt.“

„In jedem Jahrzehnt gelang es, die Pulse um durchschnittlich eine Größenordnung kürzer zu machen“

Markus Drescher, Universität Hamburg

Diese hochintensiven Pulse lenken die Forscher in einen unscheinbaren Metallzylinder, gefüllt mit einigen Kubikzentimetern Edelgas, zum Beispiel Argon, Neon oder Xenon. Hier setzt ein besonderes, „nichtlineares“ Wechselspiel zwischen Laserpuls und Gasatomen ein: Das elektromagnetischen Feld des Laserpulses zerrt an den Elektronen der Atome, zieht sie ein Stückchen heraus und gibt einen Teil seiner Energie an sie ab. Dann aber wechselt das Feld des Laserpulses seine Richtung und kickt das Elektron zum Atom zurück. Dabei wird Energie in Form eines kurzwelligen Lichtblitzes frei. Das Entscheidende: Der Stoß ist derart schnell, dass der Blitz extrem kurz gerät – im Bereich von Attosekunden. ››



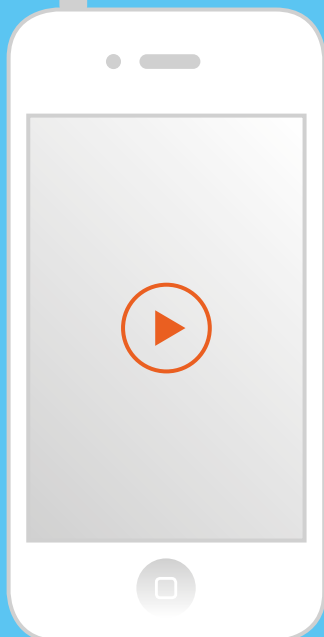
Markus Drescher ist Spezialist für Ultrakurzzeitphysik und Professor an der Universität Hamburg.

SUPERZEITLUPE ZUM SELBERMACHEN

Smartphone, Digitalkamera, LEDs, ein paar Elektronikbauteile. Viel mehr braucht es nicht, um jene Methode nachzuvollziehen, mit der Forscher ultraschnelle Prozesse filmen: Mit dem „Flashmotion“-Projekt macht das Team um Markus Drescher von der Universität Hamburg die wissenschaftliche „Pump-Probe“-Methode anschaulich.

Die Ergebnisse sind verblüffend: Eindrucksvolle Bilder zeigen in Superzeitlupe, wie ein Lego-Astronaut hinabfällt oder von einer Wippe nach oben geschleudert wird – Aufnahmen, die sonst nur mit teuren Hochgeschwindigkeitskameras machbar sind. Wer das selber ausprobieren möchte, findet die Bauanleitung unter:

<https://dynamix.desy.de/>



> Atome bei der Arbeit

Heute arbeiten überall auf der Welt Wissenschaftler mit der Methode und erreichen mittlerweile Pulsdauern von weniger als 100 Attosekunden. In diesem Bereich spielen sich einige fundamentale Naturprozesse ab – etwa die Bewegung von Elektronen in einem Atom. „Mit der Attosekunden-Physik können wir Elektronen im Atom quasi bei der Arbeit beobachten und dadurch die Grundlagen der Quantenmechanik überprüfen“, schwärmt Drescher, der federführend am Exzellenzcluster CUI mitarbeitet, dem Hamburg Centre for Ultrafast Imaging. Wie zum Beispiel läuft im Detail die Ionisierung ab, wenn ein Elektron sein Atom verlässt und einen geladenen Rumpf zurücklässt? Wie bewegen sich Elektronen während einer chemischen Reaktion?

„Mit der Attosekunden-Physik können wir Elektronen im Atom quasi bei der Arbeit beobachten“

Markus Drescher, Universität Hamburg

In Dreschers Labor auf dem DESY-Campus laufen diverse Experimente gleichzeitig,

mit denen sich ultraschnelle Prozesse im Femto- und Attosekundenbereich untersuchen lassen: Wie schnell schalten Magnete? Wie lange dauert es, wenn in einem Molekül eine chemische Bindung bricht? Und wie spielt sich die Spaltung eines Wassermoleküls durch UV-Strahlung ab, so wie es sich ständig in der oberen Erdatmosphäre abspielt?

Francesca Calegari, leitende Wissenschaftlerin bei DESY, beschäftigt sich mit ultraschnellen Vorgängen bei Biomolekülen. Mit Hilfe von Attosekunden-Pulsen hat sie untersucht, wie Aminosäuren – die Bausteine von Proteinen – auf Licht reagieren. „Langfristig hoffen wir, biochemische Reaktionen nicht nur beobachten, sondern gezielt kontrollieren zu können“, sagt die Physikerin. Die Vision: Eines Tages könnten sich mit ultrakurzen Laserblitzen neuartige Medikamente entwickeln und sogar herstellen lassen.

Andere Experten interessieren sich vor allem für Prozesse, die auf der Oberfläche von Kristallen und Nanostrukturen ablaufen. „Festkörper sind in der Attosekunden-Physik noch nicht besonders etabliert“, sagt Thorsten Uphues, Juniorprofessor am Center for Free-Electron Laser Science (CFEL), einer gemeinsamen Forschungseinrichtung von Max-Planck-Gesellschaft, Universität Hamburg und DESY. Der Grund: „Es ist schwierig, mit den etablierten Methoden der Attosekunden-Physik nahezu alle ultraschnellen Prozesse auf einer Oberfläche zu verfolgen.“

Unter anderem untersuchen Uphues und sein Team winzige Nanostrukturen, die sie künstlich auf die Oberfläche von Kristallen aufprägen, wobei chipähnliche Muster in der Größenordnung von Nanometern (millionstel Millimetern) entstehen.

Schießt man kurze Lichtblitze auf diese Oberflächen, legen Computersimulationen nahe, dass die Nanostrukturen mit laserähnlichen Schwingungsmustern antworten, die sich ähnlich wie ultraschnelle Transistoren verhalten. „Dieses Feld der Nanoplasmonik, bei dem man Ladungsverschiebungen mit ultrakurzen Lichtpulsen anregt, wird als mögliche Zukunft der Informationstechnologie betrachtet“, erläutert Uphues. Im Prinzip könnte das eine schnellere Datenübertragung und -verarbeitung ermöglichen. Im Gegensatz zu heute würden die Bauteile optisch angesteuert, nicht mehr elektrisch – was deutlich schnellere Schaltprozesse in Aussicht stellt.

Mit einer anderen Klasse von Festkörpern befasst sich Adrian Cavaliere vom Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie in Hamburg – mit Materialien, die urplötzlich von einem elektrischen Leiter zu einem Isolator mutieren können und umgekehrt. „Wir wissen, dass diese Übergänge extrem schnell passieren, innerhalb weniger Femtosekunden“, erläutert der Physiker.

Mit Hilfe von Lasern versucht sein Team, diese ultrafixen Phasensprünge präzise zu verfolgen – mit dem Ziel, sie eines Tages möglichst perfekt kontrollieren und nach Belieben zwischen Isolator und Leiter hin- und herschalten zu können. „Das wäre ein Schalter, den man extrem schnell mit Licht betätigt“, erläutert Cavaliere. „Solche Mechanismen könnten für die Elektronik der Zukunft sehr interessant sein, denn sie erlauben überaus schnelle Schaltvorgänge.“ >>

„Langfristig hoffen wir, biochemische Reaktionen gezielt kontrollieren zu können“

Francesca Calegari, DESY

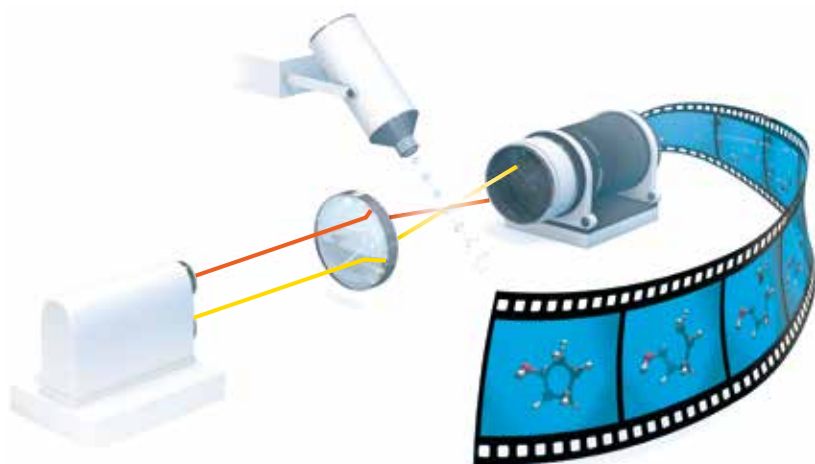
› Darüber hinaus versprechen kurze Laserpulse auch Anwendungen in der Medizin. So arbeiten Experten an einer lichtaktivierten Medikamentengabe für die Krebstherapie. Das Prinzip: Das Medikament befindet sich zwar überall im Körper, ist aber noch nicht aktiv. Eingeschaltet wird es erst durch ultrakurze Lichtpulse – und zwar nur dort, wo es wirken soll, im Tumorgewebe. Damit soll die Arznei, so die Hoffnung, eine maximale Wirkung bei minimalen Nebenwirkungen entfalten. Das Licht soll dabei mit dünnen Glasfasern zum Tumor geleitet werden. Kurze Pulse will man deshalb verwenden, da sie das Gewebe nicht erwärmen, also patientenschonend sind.

Experten wie Markus Drescher, Thorsten Uphues und Adrian Cavalieri arbeiten vorwiegend mit Lasersystemen, die auf Tische passen – auch wenn diese Tische bis zu einem Dutzend Meter lang sind. Doch bei DESY finden sich auch ungleich größere Forschungsgeräte – sogenannte

Freie-Elektronen-Laser (FEL) wie FLASH und der neue europäische Röntgenlaser European XFEL, an dem DESY maßgeblich beteiligt ist. Beide Anlagen basieren auf langen Teilchenbeschleunigern und können deutlich stärkere und kurzweiligere Strahlungspulse erzeugen als die Laser im Labor – ideal, um einzelne Atome in Kristallstrukturen zu erkennen. Die Kombination aus Labor-Lasersystem und den großen Freie-Elektronen-Lasern bietet einzigartige Möglichkeiten.

Superzeitlupe für chemische Reaktionen

Auch die Blitze aus den FEL-Giganten sind überaus kurz: Sie dauern einige Dutzend Femtosekunden. Das erlaubt Messungen, die sowohl räumlich als auch zeitlich extrem hoch aufgelöst sind – im Idealfall kann man in Superzeitlupe beobachten, wie einzelne Atome eine chemische Verbindung ››



Zwei Laserblitze treffen nacheinander auf eine Materialprobe. Der erste löst eine Reaktion aus, der zweite beobachtet das Geschehen. Dieses Spiel wird mehrfach wiederholt – und jedes Mal der zeitliche Abstand zwischen den beiden Blitzen verändert. Das Resultat: eine Serie von Schnappschüssen, die nacheinander abgespielt einen regelrechten Film ergeben.

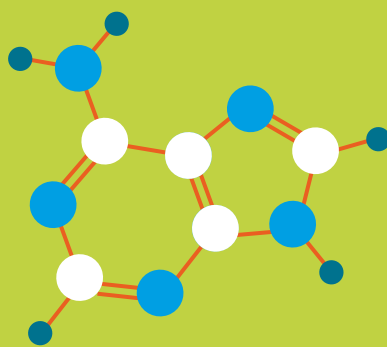
STOPPUHR FÜR ATOME

Auf der Basis von Kurzpuls-Lasern gelang kalifornischen Forschern um den Chemiker Ahmed Zewail 1987 ein Durchbruch: Sie entwickelten eine Methode, die einer ultraschnellen Stoppuhr für die Welt

der Atome und Moleküle entspricht. Das Prinzip: Zu Beginn muss man die Moleküle an den Start stellen. Danach kommt der Startschuss, er erfolgt mit einem ersten Laserblitz und startet die Reaktion. Kurz danach wird ein zweiter Laserpuls auf die Moleküle geschossen. Mit ihm lässt sich beobachten, was passiert ist. Indem man den Abstand zwischen dem ersten und dem zweiten Laserblitz variiert, lässt sich für

jeden Zeitpunkt der Reaktion ein Schnappschuss machen.

Diese Schnappschüsse können dann wie bei einer Diashow aneinandergelängt werden. Schritt für Schritt zeigt sie, wie die Reaktion abgelaufen ist. Für dieses „Pump-Probe“-Verfahren erhielt Zewail 1999 den Nobelpreis für Chemie. Er hatte einen neuen Forschungszweig begründet, die Femtochemie.



DIE **RASANTE** WELT DER BIOMOLEKÜLE

Mit Francesca Calegari kommt eine weltweit renommierte Expertin für Attosekunden-Physik nach Hamburg

„**E**ine Attosekunde verhält sich zu einer Sekunde wie eine Sekunde zum Alter des Universums!“ Wenn Francesca Calegari die Dimensionen veranschaulicht, mit denen sie in ihren Forschungsprojekten jongliert, meint man, ein gewisses Staunen herauszuhören. Ein Staunen über die unfassbar kurzen Zeitspannen, die heute mit hochraffinierten Lasertechnologien beobachtbar sind. Mit diesen Techniken nimmt die 36-jährige Italienerin besondere Proben ins Visier – organische Moleküle, zentral für Lebensprozesse. Jetzt zieht sie von Mailand nach Hamburg, um bei DESY als leitende Wissenschaftlerin zu forschen.

„Eine Attosekunde verhält sich zu einer Sekunde wie eine Sekunde zum Alter des Universums!“

Francesca Calegari, DESY

Unter anderem nimmt Calegari Aminosäuren unter die Zeit-Lupe, die Bausteine von Proteinen. „Aminosäuren wie das Phenylalanin fungieren als effiziente Lichtschlucker“, beschreibt die Physikerin. „Unter anderem konnten wir in unseren Experimenten beobachten, wie sich die Elektronen des Moleküls neu organisieren, nachdem eines von ihnen von einem extrem-ultravioletten

Laserblitz weggeschnippt wurde.“ Konkret begann die elektrische Ladung im Molekül innerhalb von wenigen Femtosekunden zwischen zwei wichtigen „Enden“ der Aminosäure hin- und herzuschwingen – Grundlagenwissen, das für Biologen wichtig sein könnte.

In Hamburg, wo Calegari zusätzlich eine Professur an der Universität antritt, will sie ihre Arbeiten fortsetzen. Ihr Plan: „Mit ultrakurzen Blitzen möchte ich Moleküle wie Adenin oder Thymin untersuchen, also die Bausteine der DNA“, sagt die Forscherin. Die Resultate könnten wichtig für die Medizin sein: Was etwa passiert im Detail, wenn Hautzellen durch ausgiebiges Sonnenbaden geschädigt werden? Sind es die allerersten, extrem schnellen Wechselwirkungen zwischen UV-Licht und Biomolekülen, die eine fatale Reaktionskaskade in Gang setzen? „Hier gibt es noch eine Forschungslücke, die ich gerne füllen würde“, sagt Calegari. „Vielleicht lässt sich dieses Wissen eines Tages sogar nutzen, um die Prozesse, die am Anfang der Reaktionskette stehen, kontrollieren zu können. Das könnte dann etwa für die Herstellung neuer Medikamente hilfreich sein.“

Derzeit schließt Francesca Calegari ihre Forschungsprojekte am Institut für Photonik und Nano-

technologien in Mailand ab. Anfang 2018 will sie endgültig nach Hamburg übersiedeln, um sich ein hochmodernes Attosekunden-Labor einzurichten. „DESY bietet ein hochattraktives, interdisziplinäres Umfeld“, sagt sie. „Hier kann ich mit Forschergruppen aus unterschiedlichen Richtungen kooperieren und meine Proben mit verschiedenen Lichtquellen untersuchen, zum Beispiel mit FLASH und dem European XFEL.“ Damit möchte sie die Biomoleküle aus mehreren Blickwinkeln studieren – komplementäre Informationen ergeben ein rundes Bild.

Und der Umzug in den Norden? „Im Gegensatz zu Mailand ist Hamburg zwar kein internationales Zentrum der Mode, aber es ist eine sehr schöne Stadt“, meint Calegari. „Es gibt hier viel mehr Grün als in Mailand, und das mag ich sehr.“



Francesca Calegari forscht im Bereich Attosekunden-Physik bei DESY und ist Professorin für Physik an der Universität Hamburg.

› eingehen. Hierbei liefern die Röntgenblitze eindeutige Information und lassen erkennen, wie im Detail chemische Bindungen entstehen beziehungsweise aufbrechen.

Simone Techert, leitende Wissenschaftlerin bei DESY, möchte mit Hilfe der hochintensiven Röntgenpulse aus dem Beschleuniger enträtseln, wie sogenannte Knäuel-Proteine im Detail beschaffen sind – Eiweiße ohne feste Struktur, die im Körper unter anderem den Transport von DNA-Molekülen regulieren. „Außerdem nutzen wir diese Anlagen, um Prozesse zu untersuchen, die für die Entwicklung effizienterer Solarzellen und neuartiger Photokatalysatoren wichtig sind“, sagt Techert. Letztere können unter Lichteinfluss chemische Reaktionen beschleunigen, etwa zu therapeutischen Zwecken in der Medizin.

„Wir untersuchen Prozesse, die für die Entwicklung effizienterer Solarzellen und neuartiger Photokatalysatoren wichtig sind“

Simone Techert, DESY

Und das Potenzial der großen Freie-Elektronen-Laser ist noch lange nicht ausgereizt. Auch hier geht die Entwicklung hin zu immer kürzeren Röntgenlichtpulsen, die aber trotzdem hochintensiv sind und die begehrten Lasereigenschaften haben. „In unseren Maschinenstudien konnten wir an FLASH bereits Pulslängen deutlich unter zehn Femtosekunden erreichen“, betont die DESY-Beschleunigerphysikerin Juliane Rönsch-Schulenburg. „Dazu manipulieren wir den Elektronenstrahl so, dass ultrakurze Elektronenpakete entstehen.“ – Der entscheidende Input für Laserpulse aus dem Beschleuniger, die so kurz sind, dass sich chemischen Reaktionen quasi live verfolgen lassen.

Bei Großgeräten wie FLASH und dem über drei Kilometer langen European XFEL wird jedoch eines zur Herausforderung: eine präzise Synchronisation zwischen verschiedenen Komponenten. Um eine chemische Reaktion filmen zu können, müssen die Forscher die Abstände zwischen einem Laserpuls, der die Reaktion in Gang setzt, und dem Röntgenpuls, der diese Reaktion anschließend beobachtet, möglichst genau kennen.

Um das zu gewährleisten, hat ein Team um den DESY-Wissenschaftler Cezary Sydlo ein hochpräzises Synchronisationssystem entwickelt. Für die nötige Femtosekunden-Genauigkeit konnten dabei nicht die sonst üblichen Hochfrequenzsignale genutzt werden. Stattdessen dient beispielsweise beim European XFEL ein Laser als Taktgeber, der 200 Femtosekunden kurze optische Pulse regelmäßig über insgesamt 21 Kilometer

Spezialglasfaser in der gesamten Anlage verteilt.

Da sich die Fasern durch Umwelteinflüsse wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Vibrationen verändern können, müssen ausgeklügelte Mechanismen diese Einflüsse korrigieren, um eine stabile Ankunftszeit der Taktpulse zu gewährleisten. Dazu wird ein kleiner Teil der Pulse am Ende der Glasfaserstrecke wieder zurückgeschickt, um so die Laufzeit messen und stabilisieren zu können. „Hierzu werden variable optische Verzögerungstrecken eingesetzt“, erläutert Sydlo. „Zum einen motorgetriebene Spiegel, und um schnelle Änderungen auszugleichen, wird eine Faser mittels eines Piezoelements gestreckt.“

An den Enden der Glasfasern werden die optischen Referenzpulse zur Synchronisation verschiedener zeitkritischer Systeme genutzt. Hierzu gehören insbesondere die optischen Laser, die für die Experimente ganz am Ende des 3,4 Kilometer langen European XFEL verwendet werden.

Um die Röntgenpulse exakt zum gewünschten Zeitpunkt am Experiment eintreffen zu lassen, messen die Forscher an verschiedenen Stellen die Ankunftszeit des Elektronenstrahls. Die unvermeidlichen Schwankungen können nur am Anfang des Beschleunigers durch extrem schnelle Regelungen korrigiert werden. „Auf diese Weise können wir die Röntgenpulse und die optischen Laserpulse mit einer Genauigkeit von unter zehn Femtosekunden miteinander synchronisieren – auch in Anlagen, die sich über viele Kilometer erstrecken“, betont Holger Schlarb, Beschleunigerexperte bei DESY.

Beschleunigung mit Terahertz

Unter kontrollierten Laborbedingungen können optische Lasersysteme zueinander sogar bereits mit einer Genauigkeit von unter einer Femtosekunde synchronisiert werden. So hat ein Team um den leitenden DESY-Wissenschaftler Franz Kärtner mit einem hochpräzisen Lasermetronom in einem 4,7 Kilometer großen Testnetzwerk für Laser- und Mikrowellensignale erstmals eine auf 950 Attosekunden genaue Synchronisation erreicht, die über mehrere Stunden stabil blieb.

„Zukünftige Entwicklungen werden diesen Wert noch weiter drücken“, meint Kärtner. „Das könnte Experimente am European XFEL erlauben, die innerhalb weniger Femtosekunden synchronisiert sind – oder letztendlich sogar darunter.“

In einer EU-geförderten Kooperation arbeitet Kärtner zusammen mit den DESY-Wissenschaftlern Henry Chapman und Ralph Aßmann sowie mit Petra Fromme von der Arizona State

„Die Attosekunden-Technik wird das Verständnis von Struktur und Funktion auf der molekularen und atomaren Ebene revolutionieren und fundamentale Prozesse in Chemie und Biologie enträtseln“, erwartet Kärtner.

Auch die lediglich 100 Femtosekunden langen Röntgenpulse des European XFELs selbst sollten sich noch deutlich kürzer machen lassen, um Experimente mit noch besserer Zeitauflösung zu erlauben. „Weniger als zehn Femtosekunden sollten in absehbarer Zeit möglich sein“, glaubt Kärtner. „Und ich würde mich sehr wundern, wenn in zehn Jahren noch kein Attosekunden-Puls bei einem Röntgenlaser erreicht worden sein sollte.“

University an einer äußerst vielversprechenden Röntgentechnik. Ziel des Projekts „Frontiers in Attosecond X-ray Science: Imaging and Spectroscopy“ (AXSIS) ist eine Art hoch auflösende Superzeitlupe, die chemische und biologische Vorgänge noch im Bereich von trillionstel Sekunden atomgenau beobachten kann. Dazu setzen die Forscher unter anderem auf neue Techniken zur Beschleunigung von Elektronen mit Hilfe sogenannter Terahertz-Strahlung.

Noch ist die Terahertz-Technik im Versuchsstadium, aber sie bietet vielversprechendes Potenzial: Da Terahertz-Strahlung eine deutlich kürzere Wellenlänge hat als die in großen Beschleunigern verwendeten Radiofrequenzen, könnten viele Komponenten dieser Anlagen um möglicherweise das Hundertfache schrumpfen. Diese neuartigen Lasersysteme sollen Röntgenblitze ermöglichen, die nur etwa 100 Attosekunden kurz, aber intensiv genug für viele Untersuchung sind.

Sogenannte modengekoppelte Laser können extrem genaue optische Pulszüge erzeugen, die sich als hochpräzise Taktgeber eignen. Forscher haben bei DESY so ein Laser-Metronom entwickelt, das zahlreiche Laser- und Mikrowellen-Quellen erstmals mit Attosekunden-Genauigkeit in einem kilometergroßen Netzwerk synchronisieren kann.

ENERGIEFORSCHUNG DER ZUKUNFT

Simone Techert leitet die Gruppe Chemische Strukturodynamik bei DESY und nutzt ultrakurze Licht- und Röntgenpulse unter anderem für die Energieforschung.

femto: Ihnen gelang es, eine Art molekularen Film mit Hilfe von Röntgenblitzen aufzunehmen. Wie ist Ihnen das gelungen?

Techert: Nach meiner Doktorarbeit ging ich 1997 an die gerade eröffnete Europäische Synchrotronstrahlungsquelle ESRF in Grenoble, damals die leistungsfähigste Röntgenquelle der Welt. In der dortigen Arbeitsgruppe haben wir einen Femtosekunden-Laser an das Synchrotron gekoppelt. Mit seinen ultrakurzen Lichtpulsen hatte dieser Laser eine chemische Reaktion ausgelöst, und mit dem Röntgenstrahl der ESRF konnten wir beobachten, wie diese Reaktion ablief. Wegen der schnellen Zeitauflösung war dies der erste Filmclip einer chemischen Reaktion untersucht mit hochenergetischer Röntgenstrahlung.

femto: Um welche Art von Reaktion ging es damals?

Techert: Wir haben organische Moleküle untersucht, die dem Photo-Reaktionszentrum in Zellen ähneln beziehungsweise sich von diesen ableiten lassen. Dieses Zentrum spielt eine wichtige Rolle bei der Photosynthese, wenn Pflanzen, Algen oder Bakterien Sonnenlicht in chemische Energie umwandeln. Wir konnten beobachten, wie sich – ausgelöst durch den Laserpuls – die Struktur der Moleküle veränderte.

femto: Seit einigen Jahren gibt es eine neue Generation von Röntgenquellen, die Freie-Elektronen-Laser. Sie können deutlich kürzere Röntgenblitze erzeugen als Ringbeschleuniger wie die ESRF. Inwieweit profitieren Sie davon?

Techert: Mit den Experimenten an der ESRF konnten wir die Reaktionen bis auf 50 Pikosekunden genau studieren. Das war aber noch zu langsam, um wirklich die allerersten Schritte zu beobachten, die sich abspielen, wenn man jede Form von lichtinduzierten Prozessen oder chemischen Reaktionen untersucht: Wie werden die Elektronen im Molekül angeregt und wohin bewegen sie sich? Freie-Elektronen-Laser ermöglichen Messungen im Femtosekundenbereich. Dadurch lassen sich die ersten Augenblicke von chemischen Reaktionen oder von künstlichen



Systemen, die das Photoreaktionszentrum simulieren, verfolgen. Besondere Impulse versprechen wir uns dabei vom European XFEL, dem leistungsstärksten Röntgenlaser der Welt. Messungen, die an anderen Anlagen eine Woche dauern, lassen sich mit ihm in einer Stunde erledigen.

femto: Was lässt sich mit diesen Erkenntnissen über das reine Grundlagenwissen hinaus anfangen?

Techert: Einige der von uns untersuchten Stoffe eignen sich für Solarzellen. Die Herausforderung dabei ist: Bei der Photosynthese in der Natur werden höchstens einige wenige Prozent des Lichts in Energie umgewandelt. Für Solarzellen ist das zu wenig, da hätte man gern 20 Prozent oder sogar mehr. Auf Basis unserer „molecular movies“ konnten wir bereits Moleküle entwickeln, die eine Effizienz von rund zehn Prozent zeigen. Damit haben wir gezeigt, dass man einen Freie-Elektronen-Laser für die Energieforschung nutzen kann.

femto: Als Sie Ihre ersten wissenschaftlichen Erfolge erzielten, bekamen Sie gleichzeitig Ihr erstes Kind. Wie ließ sich dies zeitlich mit der Karriere vereinbaren?

Techert: Ich hatte viel Glück. Damals arbeitete ich am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen. Und als ich meinen ersten Sohn bekam, nahm das Max-Planck-Institut das mit zum Anlass, seinen ersten Betriebskindergarten einzurichten. In gewisser Weise hatte das damals Signalwirkung. Das macht es heute für junge Mütter – und auch Väter – einfacher, Familie und Karriere zu vereinbaren.

femto: Ist es dennoch für Frauen schwieriger als für Männer, in der Forschung in eine Führungsposition zu kommen?

Techert: Ich beobachte bei meinen jüngeren Kolleginnen durchaus, dass sie sich mehr anstrengen müssen, um dieselbe Anerkennung zu ernten. Das steckt nach wie vor in der deutschen Forschungslandschaft. Dennoch hat sich in den letzten Jahren viel getan. Gerade bei DESY gab es große Fortschritte. Ich bin begeistert, wie viele Frauen hier mittlerweile leitende Wissenschaftlerinnen sind. Das ist wirklich vorbildlich.

femto: Was ließe sich trotzdem tun, um die Situation zu verbessern?

Techert: Zum Beispiel gibt es nach wie vor zu wenig Kindergartenplätze oder andere Kinderbetreuungsprogramme. Vor allem aber wird die Familienplanung durch das heutige Wissenschaftssystem erschwert, bei dem man sich nach der Promotion von Zeitvertrag zu Zeitvertrag hangelt. In Ländern wie Frankreich und den USA läuft das besser, da werden Frauen innerhalb des Wissenschaftssystems besser gefördert. Dort können junge Mütter für einige Jahre auf einer Karrierestufe bleiben, später dann aber dennoch aufsteigen. Das sollte man sich für Deutschland als Vorbild nehmen.



Simone Techert ist leitende Wissenschaftlerin der Gruppe Chemische Strukturdynamik bei DESY. Gleichzeitig ist sie Professorin an der Universität Göttingen und leitet eine Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen.

Moleküle verformen sich bei Nässe

Forscher vom Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie (MPSD) am Center for Free-Electron Laser Science (CFEL) und vom Hamburg Centre for Ultrafast Imaging (CUI) konnten in zwei Studien zeigen, dass Wasser eine Strukturänderung von flexiblen Molekülen begünstigt. Um die strukturellen Auswirkungen zu untersuchen, die Wasser in Kronenether und Biphenyl-Molekülen hervorruft, verwendeten die Forscher hochaufgelöste Rotationspektroskopie.

Kronenether sind zyklische Moleküle, die in ihrer Struktur einer Krone ähneln. Sie sind entscheidende Systeme in Katalyse-, Trennungs- und Einschlussprozessen. Die Forscher entdeckten, dass sich die bevorzugte Struktur der Kronenether bei der Bindung mit Wasser verändert. „Die unerwartete strukturelle Veränderung offenbart neue Möglichkeiten für Wirt-Gast-Wechselwirkungen“, sagt Cristóbal Pérez, Forscher am MPSD.

Biphenyl-basierte Systeme bestehen im Zentrum aus zwei Benzolringen (C_6H_6), die über eine Achse verbunden sind. Sie finden im Wirkstoffdesign für Arzneimittel Verwendung. Die Wissenschaftler zeigten, dass das Biphenyl-System bei Hydratation zwei zusammenhängende Wassermoleküle anlagert, die die Autoren „water-wire“ nennen. Dieser „Wasser-Draht“ verbindet die beiden Biphenyl-Ringe und fixiert ihre Position zueinander. „Das beobachtete Phänomen liefert uns neue Hinweise darüber, wie Wasser die Wechselwirkungen zwischen einem Molekül und einem potenziellen Rezeptor vermitteln kann“, sagt Sérgio Domingos, Forscher am MPSD.

The Journal of Physical Chemistry Letters, 2016;
DOI: 10.1021/acs.jpcclett.6b01939

The Journal of Chemical Physics, 2016; DOI: 10.1063/1.4966584

Die bevorzugte Struktur eines Kronenethers verändert sich, wenn Wassermoleküle daran binden (gestrichelte Linien).



Bild: Cristóbal Pérez et al., MPSD

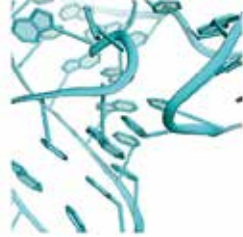
Licht-Licht-Streuung

Wissenschaftler der ATLAS Collaboration am Large Hadron Collider (LHC) beim Forschungszentrum CERN in Genf haben die Streuung von Licht durch Licht beobachtet. In diesem Prozess kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen zwei Photonen, die sich gegenseitig ablenken und dadurch ihre Richtung ändern. Es ist das erste Mal, dass dieses Phänomen in einem Teilchenbeschleuniger beobachtet werden konnte. Die Forscher untersuchten die Streuung in Kollisionen von Blei-Ionen am LHC.

„Gemäß der klassischen Elektrodynamik können sich zwei Lichtstrahlen nicht gegenseitig streuen. In der Quantenphysik ist es jedoch durchaus möglich, dass Licht durch Licht gestreut wird, auch wenn es scheinbar nur sehr selten vorkommt“, erklärt Mateusz Dyndal von DESY. Bisher wurde das Phänomen nur indirekt untersucht.

Blei-Ionen, die sich beinahe mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, produzieren ein sehr starkes elektromagnetisches Feld. Wenn nun zwei solche Ionen im LHC zusammenstoßen, können zwei Photonen wechselwirken, während die Ionen selbst intakt bleiben. In den Daten, die 2015 am LHC aufgenommen wurden, fanden Physiker am ATLAS-Experiment Belege für die Licht-Licht-Streuung. Weil die Wissenschaftler nur wenige Kollisionen beobachteten, in denen Licht-Licht-Streuung identifiziert wurde, ist die statistische Sicherheit und Genauigkeit ihrer Ergebnisse aber begrenzt. In vier Billionen Kollisionen, die ausgewertet wurden, gab es nur 13 passende Kandidaten.

Als Ergebnis der Licht-Licht-Streuung werden zwei Photonen mit niedriger Energie im ATLAS-Detektor beobachtet.



Der Riboswitch-„Knopf“ vor, während und nach (v.l.n.r.) dem Andocken des Signalmoleküls (grün).

Gen-Schalter in Aktion

Mit einem leistungsstarken Röntgenlaser hat ein internationales Forscherteam erstmals einen Gen-Schalter in Aktion beobachtet. Die Untersuchung unter Leitung von Yun-Xing Wang vom US-Krebsforschungsinstitut (National Cancer Institute) zeigt die ultraschnelle Dynamik eines sogenannten Riboswitches, der einzelne Gene an- und ausschalten kann.

„Die Untersuchung belegt, dass sich die Strukturveränderungen, die bei biochemischen Reakti-

onen oder bei Wechselwirkungen zwischen Molekülen ablaufen, mit Hilfe leistungsfähiger Röntgenlaser in Echtzeit aufzeichnen lassen“, erläutert DESY-Forscher Henry Chapman vom Hamburger Center for Free-Electron Laser Science (CFEL).

Die Wissenschaftler haben einen Riboswitch des Bakteriums *Vibrio vulnificus* untersucht. Dieses ist ein enger Verwandter des Cholera-Erregers und kann schwer zu behandelnde Infektionen auslösen, die häufig tödlich verlaufen. Um zu beobachten, wie der Schalter

aktiviert wird, kristallisierten die Forscher seinen „Einschaltknopf“, also den Part, an den das Signalmolekül bindet, das den Riboswitch aktiviert. So entdeckten die Wissenschaftler einen Zwischenzustand des Gen-Schalters, der zuvor noch nie beobachtet worden war und im lebenden Organismus vermutlich nur für Millisekunden existiert. Gen-Schalter könnten aussichtsreiche Angriffspunkte im Kampf gegen Infektionskrankheiten sein.

.....
Nature, 2016; DOI: 10.1038/nature20599

Neue Kristallstruktur in „Gummimetal“

Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Eisenforschung (MPIE) in Düsseldorf haben bei DESY einen neuen Phasenübergang in einer Titanlegierung beobachtet. Die Forscher untersuchten mit DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III die innere Struktur einer speziellen Legierung aus den (Übergangs-) Metallen Titan, Niob, Tantal und Zirkonium.

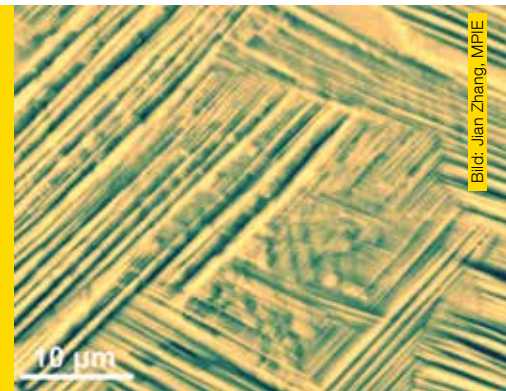
Diese Titanlegierung weist besondere mechanische Eigenschaften auf, weswegen sie auch als „gummetal“ bezeichnet wird, also übersetzt „Gummimetal“. „Bei Verformung wird sie nicht, wie sonst bei Metallen üblich, härter oder bricht,

sondern verbiegt sich fast schon honigartig“, erklärt Dierk Raabe, Direktor am MPIE. Das macht die Legierung attraktiv für verschiedene industrielle Anwendungen. In der Luftfahrt beispielsweise kann sie als eine Art Crashabsorber verwendet werden.

Wieso genau diese Legierung so stark verformbar ist, ist jedoch noch nicht ganz klar. Titanlegierungen kommen normalerweise in zwei verschiedenen Kristallstrukturen vor, der Alpha- und der Beta-Phase. Die Forscher des MPIE haben nun eine neue Struktur entdeckt, die sogenannte Omega-Phase, die beim Übergang zwischen diesen Phasen entsteht. Die Forscher hoffen,

dass die entdeckte Struktur helfen könnte, die Eigenschaften des Werkstoffs genauer zu verstehen und verbesserte Varianten der Titanlegierung zu entwickeln.

.....
Nature Communications, 2017;
DOI: 10.1038/ncomms14210



Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der verschiedenen Phasen in der untersuchten „gummiartigen“ Titanlegierung

Dynamik von Elektronenwolken

Ein amerikanisch-deutsches Forscherteam hat die ultraschnelle Dynamik von Elektronenwolken in Xenonatomen live untersucht. Mit Hilfe ultraschneller Attosekunden-Technologie konnten die Wissenschaftler das Verhalten der Elektronen im elektrischen Feld eines intensiven Laserpulses in Echtzeit messen.

Atome bestehen aus einem elektrisch positiv geladenen Kern, der von negativ geladenen Elektronen umkreist wird. Die Elektronen bilden quantenphysikalisch betrachtet eine unscharfe Wolke. Die Physiker schickten den hellen Blitz eines Infrarotlasers in eine mit

Xenonatomen gefüllte Kammer und zeichneten mit einer extrem schnellen UV-Kamera die Reaktion der Xenonelektronen auf.

Der Versuch zeigte überraschende Ergebnisse: Die Wissenschaftler hatten erwartet, eine Ionisierung der Xenonatome beobachten zu können, dass also Elektronen die Energie des eingestrahlten Lichts absorbieren und dadurch die Atome verlassen können. „Die quantenmechanische Berechnung zeigt jedoch, dass nur ein Teil des sogenannten Wellenpakets, mit dem die Elektronen in der Quantenmechanik beschrieben werden, tatsächlich ionisiert wird“, erläutert

Momentaufnahme der Elektronenwolke eines Xenonatoms, die durch das instantane elektrische Feld eines starken Laserpulses deformiert wird

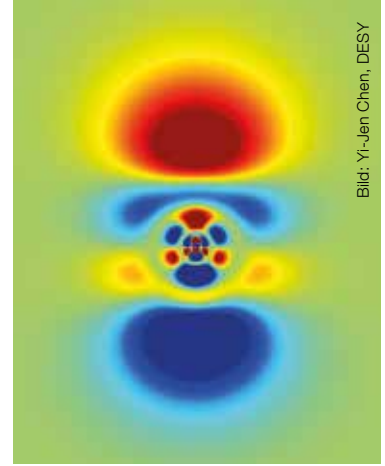


Bild: Yi-Jen Chen, DESY

DESY-Forscher Robin Santra. „Ein anderer Teil wird durch das oszillierende elektrische Feld des Lasers verzerrt und schnappt immer wieder in seinen Grundzustand zurück, wenn das oszillierende Feld gerade durch den Nullpunkt geht. Das kann man sich vorstellen wie eine Feder, die periodisch gespannt und wieder entspannt wird.“

Nature Physics, 2017;
DOI: 10.1038/NPHYS4027

Goldregen im Röntgenlicht

Metallische Nanobeschichtungen auf dünnen Polymerfilmen sind für verschiedene vielversprechende industrielle Anwendungen interessant. Wissenschaftler haben jetzt bei DESY in Echtzeit untersucht, wie sich die Struktur einer Goldbeschichtung während des sogenannten Sputterns entwickelt, eines industriellen Verfahrens zum Auftragen dünner Metallschichten. Für ihre Untersuchung haben die Wissenschaftler eine Nanoschicht aus Goldatomen auf dem Polymer Polystyrol aufgebracht. Dabei haben sie untersucht, wie verschiedene Sputterraten das Strukturwachs-

tum beeinflussen. „Man kann das Sputtern damit vergleichen, dass ein Regen aus Goldatomen auf eine Plastikfolie fällt. Je nachdem, ob es stärker oder schwächer ‚regnet‘, bilden sich bei gleicher Materialmenge andere Strukturen auf der Folie“, sagt Matthias Schwartzkopf von DESY.

Bei höheren Raten bilden sich lange, verzweigte Strukturen aus kleineren Clustern, während bei niedrigen Raten größere Klümpchen entstehen. Dadurch sind die Metallbeschichtungen bei hohen Raten glatter und kompakter. Aus diesen Beobachtungen können die Forscher ableiten, welche Sputterraten

für welche Anwendung besonders geeignet sein sollten. Soll das Material beispielsweise als Katalysator verwendet werden, braucht man eine Struktur aus vielen kleinen Goldclustern, das erreicht man mit einer hohen Sputterrate.

ACS Applied Materials & Interfaces, 2017;
DOI: 10.1021/acsami.6b15172

Zusammenhang zwischen Schichtstruktur und Geschwindigkeit der Beschichtung

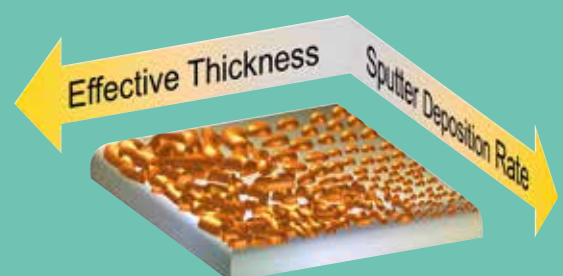
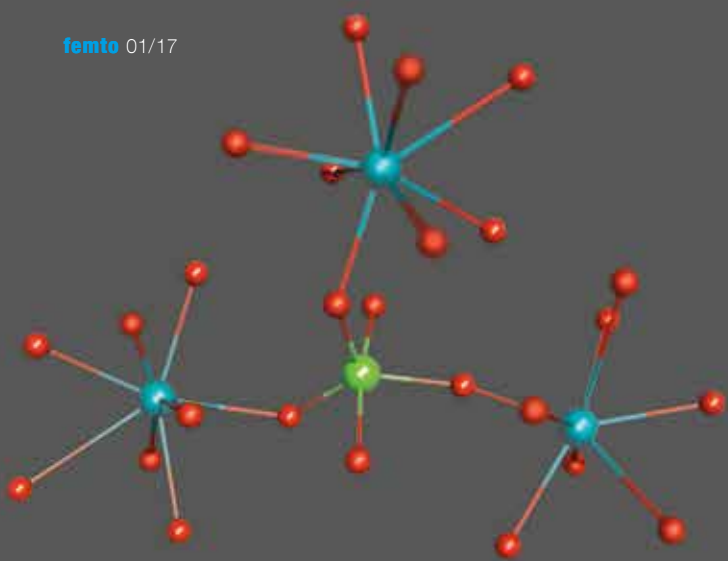


Bild: Matthias Schwartzkopf, DESY



Ein Teil der Kristallstruktur von Titanorthophosphat-V: Das zentrale Phosphoratom (grün) ist an fünf Sauerstoffatome (rot) gebunden, Titanatome sind blau dargestellt.

Bild: Elena Bykova, Universität Bayreuth

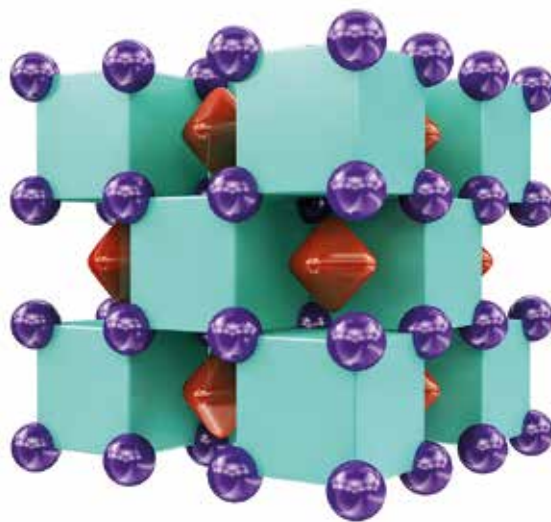
Neue Form von Phosphorverbindung

Wissenschaftler haben eine ungewöhnliche Phosphorverbindung entdeckt. In Hochdruckexperimenten bei DESY und an der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle ESRF beobachtete ein internationales Forscherteam eine spezielle Phosphorkonfiguration, in der ein zentrales Phosphoratom an fünf umgebende Sauerstoffatome gebunden ist. Diese sehr seltene Konfiguration ist zum ersten Mal überhaupt in einer anorganischen Phosphatverbindung nachgewiesen worden.

Die Wissenschaftler hatten untersucht, wie sich Titanorthophosphat bei Druckverhältnissen von bis zu 56 Gigapascal (GPa) verhält, das ist 500 000 Mal höher als der durchschnittliche Atmosphärendruck auf Meereshöhe. Mit der intensiven Röntgenstrahlung der Synchrotronstrahlungsquelle PETRA III konnten die Wissenschaftler vier Phasenübergänge bei steigendem Druck beobachten. „In der beim höchsten erreichten Druck beobachteten Phase war das zentrale Phosphoratom an fünf umgebende Sauerstoffatome gebunden – wir bezeichnen das als fünffache Koordination“, erklärt Maxim Bykov von der Universität Bayreuth. Die Forscher erwarten, dass fünffach koordinierter Phosphor chemisch besonders aktiv ist und daher eine wichtige Rolle in der Synthese neuer Verbindungen spielen könnte.

Angewandte Chemie, 2016; DOI: 10.1002/ange.201608530

fentomenal



113 GIGAPASCAL

– so hoch musste der Druck sein, um Helium dazu zu bringen, eine Verbindung mit einem anderen Element, Natrium, einzugehen.

Das entspricht einem Druck, der 1,1 Millionen Mal so hoch ist wie der Luftdruck am Erdboden, und zeigt, wie sehr man chemisch träge Edelgase wie Helium traktieren muss, um sie zu einer Reaktion zu bewegen. Unter Normalbedingungen verbindet sich das Edelgas überhaupt nicht mit anderen Elementen.

Umso außergewöhnlicher ist der Natrium-Helium-Kristall, den die Forscher unter anderem an einem speziellen Messplatz für Hochdruckexperimente an DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III erzeugten und analysierten. Die Ergebnisse könnten neue Erkenntnisse zu chemischen Vorgängen im Inneren von Gasplaneten oder Sternen bringen, in denen Hochdruck herrscht und Helium eine wichtige Rolle spielt.

SMASH soll fünf große Fragen der Teilchenphysik lösen

Erweiterung des Standardmodells liefert vollständiges Bild der Geschichte des Universums

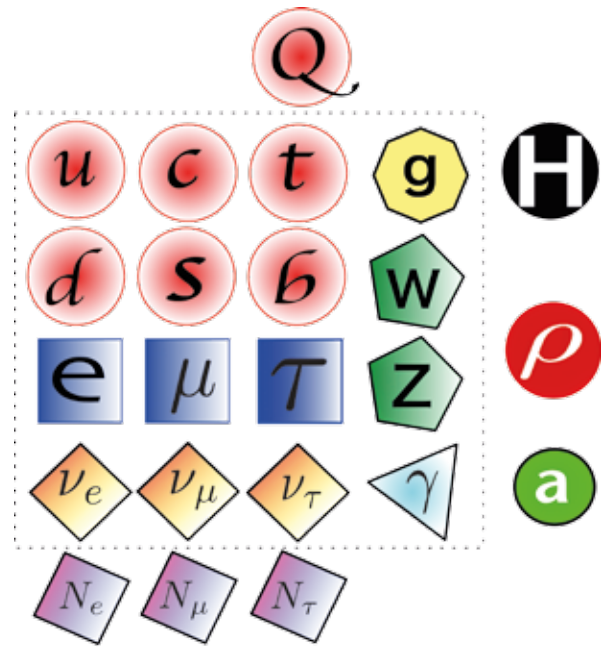
Teilchenphysiker auf der ganzen Welt sind auf der Suche nach Theorien, die unser Universum umfassender beschreiben können. Denn das Standardmodell der Teilchenphysik wurde zwar in Experimenten immer wieder eindrucksvoll bestätigt, erklärt jedoch in der gegenwärtigen Fassung nur rund 15 Prozent der Materie im Universum. Es beschreibt und ordnet alle bekannten fundamentalen Teilchen und Wechselwirkungen. Aber dies lediglich für die uns gewohnte Materie. Mehr als fünf Mal so häufig ist jedoch astrophysikalischen Beobachtungen zufolge eine rätselhafte Dunkle Materie. Ein internationales Forscherteam hat nun eine Erweiterung des Standardmodells entwickelt, die nicht nur die Dunkle Materie erklären, sondern gleich fünf große Probleme der Teilchenphysik auf einen Schlag lösen könnte.

Messungen aus der Astrophysik weisen darauf hin, dass es im Universum noch mehr geben muss als die uns vertraute Materie, aus der Sterne, Planeten, Pflanzen und Menschen bestehen. Das bekannteste Beispiel: Manche Galaxien drehen sich so schnell, dass sie eigentlich auseinander fliegen müssten. Eine unbekannte und unsichtbare Masse muss diese Galaxien mit ihrer zusätzlichen Schwerkraft zusammenhalten. Diese rätselhafte Dunkle Materie macht sich nur über ihre Schwerkraft bemerkbar, sie sendet kein Licht aus und absorbiert keines. Woraus sie besteht, ist völlig rätselhaft. Messungen zufolge ist sie über fünf Mal häufiger als die uns vertraute Materie und damit die zweitgrößte Komponente des Universums nach der ebenfalls mysteriösen Dunklen Energie, die das Weltall immer schneller aufzublähen scheint. Darüber hinaus gibt es noch viele weitere Beobachtungen, die Physiker vor Rätsel stellen. Forscher auf der ganzen Welt suchen daher nach der Physik jenseits des Standardmodells, die diese Phänomene erklären kann.

Simulation des Axion-Feldes im ganz jungen Universum, direkt nach der Phase der Inflation

Eine Antwort auf die offenen Fragen der Teilchenphysik?

Ein neues Modell versucht jetzt, gleich fünf große Probleme der Teilchenphysik in einer relativ kleinen Erweiterung des Standardmodells zu lösen. Guillermo Ballesteros von der Universität Paris und seine Kollegen präsentierten im Fachblatt *Physical Review Letters* ihr Modell SMASH (Standard Model Axion Seesaw Higgs portal inflation), das die folgenden fundamentalen Fragen beantworten soll:



1. Woraus besteht die Dunkle Materie, die nach Präzisionsmessungen mit dem europäischen Satelliten „Planck“ fast 85 Prozent aller Materie im Universum ausmachen muss, bisher aber vor den Augen der Forscher verborgen blieb?

2. Kurz nach seiner Entstehung vervielfachte sich die Größe des Universums in winzigen Sekundenbruchteilen mindestens um das Hundert Millionen Milliarden Milliardenfache (um den Faktor 10^{26}). Warum dehnte sich das Universum in dieser Phase der kosmischen Inflation so rasend schnell aus?

3. Bei der Entstehung des Universums hätte eigentlich genauso viel Antimaterie wie Materie entstehen müssen. Die Antimaterie scheint jedoch verschwunden. Wie konnte es zu diesem Ungleichgewicht kommen?

4. Die geisterhaften Neutrinos dürften entgegen experimentellen Beobachtungen dem Standardmodell zufolge gar keine Masse haben. Woher kommt die Masse der Neutrinos?

Das Standardmodell der Teilchenphysik enthält alle uns bekannten Bausteine der Materie und die Kräfte, die sie zusammenhalten. Die Materieteilchen sind sechs Quarks (in rot) und sechs Leptonen (in blau und orange). Die Kraftteilchen sind das Gluon für die starke Wechselwirkung (gelb), W- und Z-Boson für die schwache Wechselwirkung (grün) und das Photon (hellblau) für die elektromagnetische Wechselwirkung. Das Higgs-Teilchen (schwarz) ist für die Masse der Teilchen zuständig. SMASH fügt diesem Baukasten sechs weitere Teilchen hinzu: drei neue Neutrinos (lila), ein neues Quark (Q), das Axion (hellgrün) und das Rho (dunkelrot).

5. In der starken Wechselwirkung, einer der vier fundamentalen Kräfte im Standardmodell, wurde bisher eine viel zu kleine Verletzung der sogenannten Zeitumkehrinvarianz beobachtet. Das heißt, Prozesse laufen vorwärts fast genauso ab wie rückwärts. Eigentlich dürfte das aus verschiedenen theoretischen Überlegungen nicht der Fall sein. Was erhält die Zeitumkehrinvarianz?

Zur Lösung all dieser Rätsel braucht SMASH insgesamt nur sechs neue Teilchen. Das ist relativ wenig, gerade im Vergleich zu Modellen der Supersymmetrie, die eine Vielzahl neuer Teilchen beinhalten. „SMASH ist eigentlich eine Bottom-Up-Konstruktion“, erklärt DESY-Wissenschaftler Andreas Ringwald. „Wir sind vom Standardmodell ausgegangen und haben nur so wenig Neues hinzugefügt, wie nötig war, um die offenen Fragen zu beantworten.“ Dafür haben die Forscher verschiedene

bereits vorhandene theoretische Ansätze kombiniert und ein einfaches, einheitliches Modell entwickelt. Jedes neue Teilchen erfüllt eine bestimmte Funktion, um die offenen Fragen zu lösen.

„Wir sind vom Standardmodell ausgegangen und haben nur so wenig Neues hinzugefügt, wie nötig war, um die offenen Fragen zu beantworten“

Andreas Ringwald, DESY

Drei neue Neutrinos werden gebraucht, um die Masse der Neutrinos zu erklären. Sie bilden als schwere Teilchen sozusagen das Gegenstück zu den bekannten leichten Neutrinos. Der zugehörige Mechanismus heißt passend „seesaw mechanism“, also Wippenmechanismus. Gleichzeitig sorgt der Zerfall der schweren >>

Neutrinos zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Geschichte des Universums für das Übergewicht der Materie gegenüber der Antimaterie. Für die anderen drei Probleme spielt ein neues Feld eine entscheidende Rolle, das das ganze Universum durchzieht. Dieses Feld nimmt im frühen Universum sehr große Werte an, und die damit verknüpfte große Feldenergie führt zur kosmischen Inflation. Gleichzeitig enthält das Feld ein leichtes Teilchen, das Axion, das zwei weitere Probleme löst: Einerseits bildet es die Dunkle Materie, und andererseits erklärt es im Zusammenspiel mit einem zusätzlichen sogenannten Quark die Zeitumkehrinvarianz.

Ein konsistentes Bild der kosmischen Geschichte

Um die sechs neuen Teilchen komplett zu machen, kommt zu den drei Neutrinos, dem Axion und dem neuen Quark noch ein schwereres Teilchen hinzu, das ρ (Rho), das ebenfalls im neuen Feld enthalten ist. Zentral für SMASH ist zusätzlich eine neue globale Symmetrie, die beim Abkühlen des Universums sehr früh gebrochen wurde, wodurch die neu postulierten Teilchen ihre Masse erhalten haben. Dieser Mechanismus ähnelt dem Higgs-Mechanismus, durch den die Standardmodell-Teilchen ihre Masse erhalten. „Insgesamt ergibt sich ein vollständiges, konsistentes Bild der Geschichte des Universums von der Inflation bis heute“, betont Ringwald. „Und anders als in vielen älteren Modellen kann man die einzelnen wichtigen Werte sehr genau berechnen, beispielsweise den Zeitpunkt, an dem sich das Universum nach der Inflation wieder erhitzt hat.“ Das führt zu einer weiteren Stärke der Theorie: Das Modell kann relativ einfach experimentell überprüft werden. Denn ein großes Problem bei den vielen vorgeschlagenen Erweiterungen des Standardmodells ist, dass sie oft sehr kompliziert zu überprüfen sind. So gibt es

viele unterschiedliche theoretische Konzepte, die alle Erklärungen für verschiedene Phänomene bieten und das Standardmodell sinnvoll erweitern, aber bisher weder bestätigt noch widerlegt werden konnten. Bei SMASH könnten verschiedene Vorhersagen relativ bald überprüft werden, vielleicht schon in den nächsten zehn Jahren.

„Das Gute an SMASH ist, dass die Theorie falsifizierbar ist. Sie enthält beispielsweise sehr genaue Voraussagen zu bestimmten Messwerten der sogenannten kosmischen Hintergrundstrahlung“, erklärt Ringwald. Die kosmische Hintergrundstrahlung erfüllt den gesamten Kosmos und ist entstanden, als das Universum knapp 400 000 Jahre nach dem Urknall durchsichtig wurde. „Zukünftige Experimente, die diese Strahlung noch präziser messen, könnten SMASH also schon bald ausschließen – oder die Voraussage bestätigen“, betont Ringwald.

„Insgesamt ergibt sich ein vollständiges, konsistentes Bild der Geschichte des Universums von der Inflation bis heute“

Andreas Ringwald, DESY

Ein weiterer kritischer Test für das Modell ist die Suche nach Axionen. Für einen Nachweis dieser postulierten Teilchen ist es sehr hilfreich zu wissen, bei welcher Masse man nach ihnen suchen muss. Sonst würde die Fahndung sehr lange dauern, weil man einen viel zu großen Bereich durchkämmen muss. Die erwartete Masse eines Teilchens bestimmt wesentlich die Suchstrategie der Physiker. Dass SMASH eine genaue Einschätzung der Axionmasse liefern kann, verdanken die Forscher



Theoretische Physik ist das Arbeitsgebiet von DESY-Wissenschaftler Andreas Ringwald.

einer aufwendigen Supercomputer-Berechnung, die ein Team um Zoltán Fodor von der Bergischen Universität Wuppertal, der Eötvös-Universität in Budapest und dem Forschungszentrum Jülich im Fachjournal *Nature* veröffentlicht hat.

Auf der Suche nach der Masse des Axions

Nicht nur die SMASH-Forscher sind daran interessiert, genaue Werte für die Masse dieses bislang hypothetischen Teilchens zu bekommen. Axionen werden in vielen Theorien als Erklärung für die Dunkle Materie herangezogen. Denn Dunkle Materie könnte entweder aus vergleichsweise wenigen, aber sehr schweren Teilchen bestehen, oder aus sehr vielen ganz leichten. Die direkte Suche nach schweren Kandidaten für die Dunkle Materie mit Hilfe großer Detektoren in unterirdischen Laboren und die indirekte Suche an großen Teilchenbeschleunigern ist noch nicht abgeschlossen, aber bislang ergebnislos geblieben. Aus verschiedenen physikalischen Überlegungen sind die extrem leichten Axionen vielversprechende Kandidaten. Die Suche nach ihnen wurde bisher dadurch erschwert, dass die Berechnung ihrer Masse sehr kompliziert ist.

Die Forscher um Fodor haben nun mit der Hilfe des Jülicher Supercomputers JUQUEEN (BlueGene/Q) eine Erweiterung der Quantenchro- >>

Licht durch die Wand

ALPS II fahndet nach axion-artigen Teilchen

Bei DESY werden nicht nur neue Erweiterungen des Standardmodells theoretisch erdacht, sondern auch experimentell überprüft. Das Experiment ALPS (Any Light Particle Search) fahndet nach sogenannten axion-ähnlichen Teilchen, die extrem leicht sind und nur sehr gering mit anderen Teilchen wechselwirken, deutlich schwächer noch als die als scheinbar bekannten Neutrinos. Ihre Existenz könnte zwei ungeklärte kosmische Phänomene erklären: „Einerseits zeigen astrophysikalische Beobachtungen, dass sich extrem energiereiche Photonen, also Lichtteilchen, im Universum viel weiter ausbreiten, als es eigentlich möglich sein sollte. Und andererseits scheinen Sterne Energie in einer bisher unbekannt Form abzustrahlen“, berichtet Axel Lindner, Sprecher des ALPS-Experiments.

Weil diese hypothetischen Teilchen jedoch so schwach wechselwirken, ist es sehr schwierig, sie nachzuweisen. ALPS macht sich dabei eine bestimmte vorhergesagte Eigenschaft der Teilchen zunutze: In

einem starken Magnetfeld könnten sich Photonen in seltenen Fällen in die axion-ähnlichen Teilchen umwandeln und umgekehrt. Das führt zu einem im Prinzip einfachen, in der Praxis aber komplizierten Experiment: Zwischen zwei langen Reihen von Magneten wird Licht aus einem starken Laser auf eine lichtundurchlässige Wand geschossen. „Wenn die Theorie stimmt, wandeln sich einzelne Lichtteilchen im Magnetfeld in axion-ähnliche Teilchen um, passieren so die Wand und wandeln sich dann im Magnetfeld hinter der Wand wieder in Photonen um“, erklärt Lindner. Am Ende des Aufbaus wartet ein hochempfindlicher Detektor auf die Photonen.

Für das Experiment werden sogenannte Dipolmagnete aus dem großen HERA-Beschleuniger verwendet, der bis 2007 bei DESY in Betrieb war. Von 2007 bis 2010 lief bereits ALPS I mit diesem Aufbau, ALPS II wird nun die Empfindlichkeit der Suche wesentlich erhöhen. Der Laser ist stärker, deutlich mehr Magneten werden aneinandergereiht, und der Detektor ist noch empfind-



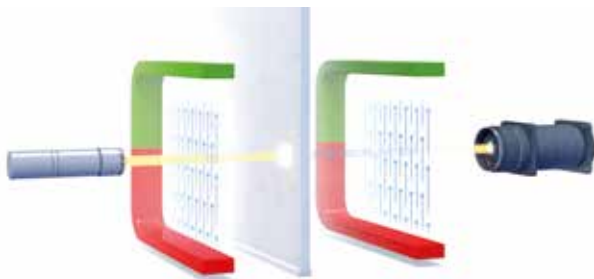
Aaron Spector, Postdoktorand der Universität Hamburg, bei Arbeiten an der ALPS-Optik

Bild: Marian Dürbeck, ALPS

licher. Zusätzlich verwendet ALPS II eine Technologie, die auch bei der Entdeckung der Gravitationswellen eine wichtige Rolle gespielt hat: optische Resonatoren, die vor und hinter der Wand die Wahrscheinlichkeit erhöhen, dass sich Photonen und axion-ähnliche Teilchen ineinander umwandeln.

Die Entwicklung der einzelnen Bestandteile von ALPS II ist beinahe abgeschlossen, die Anlage soll in den kommenden beiden Jahren aufgebaut werden und frühestens Ende 2019 mit der Datennahme beginnen. „Wenn alles klappt, wird ALPS II empfindlicher sein als alle anderen Experimente in diesem Gebiet“, sagt Lindner. „Dann können wir den Massebereich von der Nullmasse bis ungefähr 100 Mikroelektronenvolt absuchen und auch einen Blick in den Parameterbereich werfen, auf den die Astrophysik hinweist.“ Außer DESY sind auch das Albert-Einstein-Institut Hannover, die Universität Mainz und die Universität von Florida in Gainesville (USA) an dem Experiment beteiligt.

Bild: DESY/ALPS



Das Prinzip des ALPS-Experiments: Ein Lichtstrahl wird zwischen Magneten auf eine Wand gelenkt. Im Magnetfeld sollen sich einzelne Photonen in axion-ähnliche Teilchen umwandeln und so die Wand durchqueren. Hinter der Wand sollen sie sich in einem weiteren Magnetfeld zurück in Photonen umwandeln, um von einem Detektor erfasst zu werden.

› modynamik (QCD) berechnet, der Quantentheorie der starken Wechselwirkung. Ähnlich wie SMASH bietet diese Erweiterung eine Lösung für das Problem der Zeitumkehrinvarianz. „In der Quantenchromodynamik gibt es sogenannte topologische Quantenfluktuationen, die zu einer beobachtbaren Verletzung der Zeitumkehrinvarianz führen sollten“, berichtet DESY-Forscher Ringwald, der auch an dieser Studie beteiligt war. Die vorgeschlagene Erweiterung der Theorie gleicht diese Verletzungen der Invarianz durch die Quantenfluktuationen wieder aus, sagt aber gleichzeitig die Existenz eines sehr schwach wechselwirkenden Teilchens voraus, des Axions.

Die Ergebnisse zeigen unter anderem, dass Axionen, falls sie den Großteil der Dunklen Materie bilden, in den üblichen Einheiten der Teilchenphysik eine Masse von 50 bis 1500 Mikroelektronenvolt haben sollten und damit bis zu zehnmilli-

arden Mal leichter sind als das Elektron. Von diesen Leichtgewichten befinden sich im Schnitt etwa zehn Millionen in jedem Kubikzentimeter des Universums. Allerdings ist die Dunkle Materie im Kosmos nicht völlig gleichmäßig verteilt, sie bildet Klumpen und Äste in einer netzartigen Struktur. In unserer lokalen Umgebung in der Milchstraße gäbe es dadurch etwa eine Billion Axionen pro Kubikzentimeter. Im Rahmen von SMASH ergibt sich ein noch kleinerer Massebereich für die Axionen, da in dem Modell bestimmte Variablen genauer bestimmt sind, die den Wert der Masse beeinflussen. Hier muss die Axionmasse zwischen 50 und 200 Mikroelektronenvolt liegen.

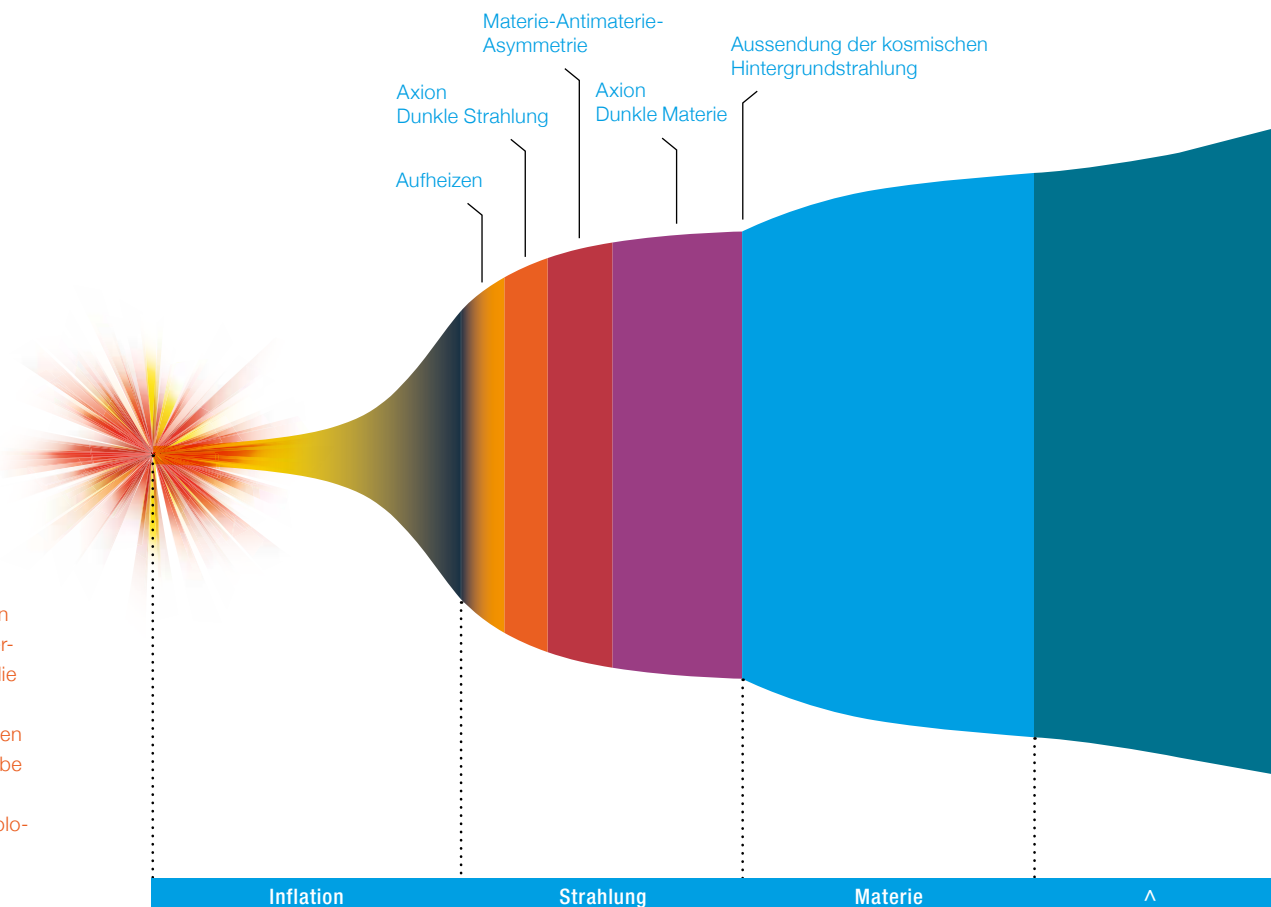
Diese Prognosen liefern Physikern einen konkreten Bereich, in dem die Fahndung nach Axionen am aussichtsreichsten erscheint. „Es ist davon auszugehen, dass die vorgelegten Ergebnisse zu einem Wettlauf um die Entdeckung dieser Teilchen führen werden“, sagt Fodor.

Ihr Nachweis würde nicht nur das Problem der Dunklen Materie des Universums lösen, sondern gleichzeitig die Frage beantworten, warum die starke Wechselwirkung so überraschend symmetrisch bezüglich der Zeitumkehr ist. Und sie wäre ein erster Schritt hin zur Bestätigung des SMASH-Modells. Es könnte sich also bald zeigen, ob es nur eine Theorie unter vielen ist oder ein großer Fortschritt auf dem Weg zum vollständigen Verständnis unseres Universums.

„Es ist davon auszugehen, dass unsere Ergebnisse zu einem Wettlauf um die Entdeckung dieser Teilchen führen werden“

Zoltán Fodor, Bergische Universität Wuppertal

Die verschiedenen Phasen der Geschichte des Universums nach SMASH und die dominanten Energiearten der verschiedenen Epochen der verschiedenen Epochen (untere Zeile, der Buchstabe Lambda repräsentiert die Dunkle Energie als Kosmologische Konstante).



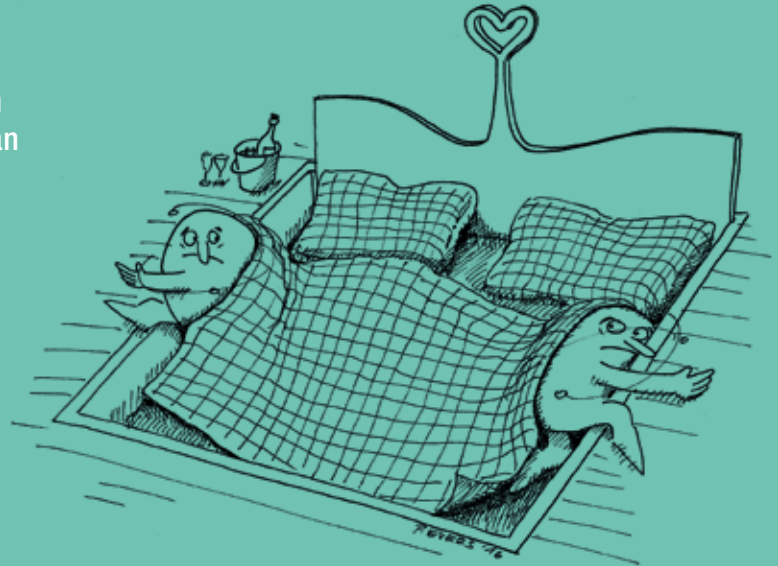
Partnerschaft auf Abstand

Tiefgekühlte Heliummoleküle erlauben präzisen Test des quantenmechanischen Tunneleffekts an DESYs Röntgenlaser FLASH

Heliumatome sind Einzelgänger. Nur wenn man sie stark abkühlt, bilden sie ein sehr schwach gebundenes Molekül. Dank des quantenmechanischen Tunneleffekts können sie dabei einen extrem großen Abstand voneinander halten. Wie Frankfurter Atomphysiker unter anderem mithilfe von DESYs Röntgenlaser FLASH bestätigen konnten, sind die Atome über 75 Prozent der Zeit so weit voneinander entfernt, dass ihre Bindung sich nur noch durch den quantenmechanischen Tunnel-effekt erklären lässt.

Die Bindungsenergie im Heliummolekül beträgt nur etwa ein Milliardstel der Bindungsenergie alltäglicher Moleküle wie Sauerstoff oder Stickstoff. Das Molekül ist außerdem so riesengroß, dass kleine Viren oder Rußpartikel zwischen den Atomen hindurchfliegen könnten. Physiker erklären dies durch den Tunneleffekt. Sie veranschaulichen die Bindung in einem klassischen Molekül durch eine Potentialmulde. Weiter als bis zu den „Wänden“ dieser Mulde können die Atome sich nicht voneinander entfernen. Doch in der Quantenmechanik dürfen die Atome auch in die Wände hinein tunneln. „Das ist, als ob jeder auf seiner Seite einen Stollen ohne Ausgang gräbt“, erklärt Reinhard Dörner vom Institut für Kernphysik an der Goethe-Universität Frankfurt.

Dörners Arbeitsgruppe hat diese Heliummoleküle in einem Experiment hergestellt und mithilfe des an der Goethe-Universität entwickelten Reaktionsmikroskops COLTRIMS untersucht.



WERDEN ZWEI ÜBERZEUGTE EINZELGÄNGER
IN EIN GEMEINSAMES BETT GEZWUNGEN, ZÜCKEN SIE
BIS ÜBER DEN RAND HINAUS VONEINANDER AB.

Mit COLTRIMS-Messungen an FLASH haben die Wissenschaftler die Stärke der Bindung mit bislang unerreichter Präzision ermittelt und den Abstand der beiden Atome im Molekül vermessen. „Das Heliummolekül stellt so etwas wie einen Prüfstein für quantenmechanische Theorien dar, denn der theoretisch vorhergesagte Wert der Bindungsenergie hängt empfindlich davon ab, wie gut alle physikalischen und quantenmechanischen Effekte berücksichtigt wurden“, erklärt Dörner.

Selbst die Relativitätstheorie, die sonst hauptsächlich für astronomische Berechnungen benötigt wird, müsse hier einbezogen werden. „Unterläuft ein kleiner Fehler, so ergeben die Rechnungen große Abweichungen oder besagen gar, dass ein Heliummolekül überhaupt nicht existieren kann“, sagt Dörner. Die von seiner Gruppe durchgeführten Präzisionsmessungen werden als Vergleichswert für zukünftige Experimente dienen.

Die jetzt präsentierten Ergebnisse bilden einen Teil der Forschungsarbeiten, für welche die Gruppe 2016 mit dem Helmholtz-Preis für Metrologie ausgezeichnet worden war, der vom unabhängigen Helmholtz-Fonds e.V. vergeben wird.

.....
„PNAS“, 2016; DOI: 10.1073/pnas.1610688113

Eine Brille für Röntgenlaser

Maßgeschneiderte Korrekturoptik bündelt Röntgenstrahl auf unerreichtes Ausmaß

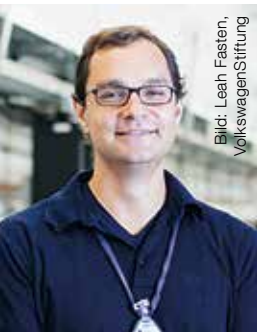


Bild: Leah Fasten, VolkswagenStiftung

DESY-Wissenschaftler
Andreas Schropp
forscht an
Röntgenoptiken.

Mit einer maßgeschneiderten Röntgenbrille haben Forscher den Strahl eines Röntgenlasers stärker gebündelt als jemals zuvor. Die individuell angefertigte Korrekturlinse beseitigt die unvermeidlichen Fehler der bisher verwendeten Röntgenoptik nahezu komplett und konzentriert so drei Viertel des Röntgenstrahls auf einen Fleck von rund 250 Nanometern (millionstel Millimetern) Durchmesser. Damit erreicht die Brille, die ein Team um den DESY-Wissenschaftler Christian Schroer entwickelt hat, fast das theoretisch Machbare. Der stark gebündelte Röntgenstrahl kann nicht nur bestimmte Untersuchungen verbessern, sondern auch neuartige Forschungsmöglichkeiten eröffnen.

„Da die Wellenlänge von Röntgenstrahlung sehr viel kleiner ist als von sichtbarem Licht, erfordert die Herstellung von Röntgenoptiken eine sehr viel größere Präzision“

Andreas Schropp, DESY

Röntgenstrahlung gehorcht zwar denselben optischen Gesetzen wie sichtbares Licht, lässt sich aber nur schwer fokussieren und ablenken: „Es gibt nur wenige Materialien, aus denen sich geeignete Röntgenlinsen und -spiegel bauen lassen“, erläutert Andreas Schropp von DESY. „Da die Wellenlänge von Röntgenstrahlung sehr viel kleiner ist als von sichtbarem Licht, erfordert die Herstellung solcher Röntgenoptiken zudem eine sehr viel größere Präzision als im optischen Wellenlängenbereich – schon sehr kleine Formfehler der Optik können sich störend auswirken.“ Die Produktion entsprechender Linsen und Spiegel hat zwar bereits eine hohe Genauigkeit

erreicht. Dennoch sind die häufig verwendeten Linsen aus dem Element Beryllium meist im Zentrum der Linse etwas zu stark gekrümmt, wie Schropp ausführt. „Beryllium-Linsen werden mit Hilfe von Präzisionsstempeln gepresst. Formfehler in der Größenordnung einiger hundert Nanometer sind dabei praktisch unvermeidlich.“ Dadurch wird mehr Licht als physikalisch unumgänglich aus dem Fokus herausgestreut, das sich relativ gleichmäßig über eine größere Fläche verteilt.

Für viele Anwendungen spielen diese Fehler keine Rolle. „Wenn Sie jedoch beispielsweise kleine Proben mit dem Röntgenlaser aufheizen möchten, soll so viel Röntgenlicht wie möglich auf eine möglichst kleine Fläche treffen“, sagt Schropp. „Dasselbe gilt für manche abbildenden Techniken, mit denen möglichst detailreiche Aufnahmen von winzigen Proben gewonnen werden sollen.“

Bündelung auf engstem Raum

Um die Fokussierung zu optimieren, vermaßen die Wissenschaftler zunächst minutiös die Fehler in ihrer portablen Beryllium-Röntgenoptik. Mit diesen Daten schnitten sie dann an der Friedrich-Schiller-Universität Jena eine passgenaue Korrekturlinse aus Quarzglas mit Hilfe eines Präzisionslasers. Die Wirkung dieser Brille testeten die Forscher am Röntgenlaser LCLS des US-Forschungszentrums SLAC in Kalifornien.

„Ohne die Korrekturlinse fokussierte unsere Optik rund 75 Prozent des Röntgenlichts auf eine Fläche mit etwa 1600 Nanometern Durchmesser. Das ist in etwa zehn Mal so groß

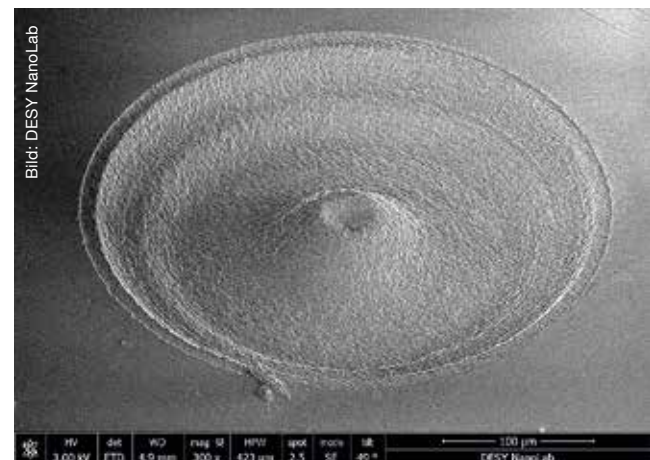


Bild: DESY NanoLab

Die Röntgenbrille unter dem Elektronenmikroskop

Profil des fokussierten
Röntgenstrahls ohne
(oben) und mit (unten)
Korrekturoptik

wie der theoretisch mögliche Wert“, berichtet Hauptautor Frank Seiboth von der Technischen Universität Dresden, der heute bei DESY arbeitet. „Mit der Brille schrumpfte diese Fläche auf rund 250 Nanometer Durchmesser und lag damit nah am theoretischen Optimum.“ Im Zentralbereich des Fokus landete so rund dreimal mehr Röntgenlicht als ohne die Korrekturoptik. Die sogenannte Halbwertsbreite des fokussierten Strahls, das klassische Maß für die Schärfe des Fokus, änderte sich dagegen kaum. Sie beschreibt die Grenze, an der die Helligkeit im Röntgenstrahl auf die Hälfte abgefallen ist, und lag mit und ohne Korrekturoptik etwas über 150 Nanometer.

Dieselbe Kombination aus mobiler Standardoptik und maßgeschneiderter Brille untersuchte das Team auch an DESYs Synchrotron-Röntgenquelle PETRA III und der britischen Diamond Light Source. In beiden Fällen lieferte die Korrekturlinse eine vergleichbare Verbesserung wie am Röntgenlaser. „Mit unserer Methode lässt sich im Prinzip für jede Röntgenoptik eine individuelle Korrekturlinse herstellen“, erläutert Forschungsleiter Schroer, der auch Physikprofessor an der Universität Hamburg ist.

„Diese sogenannten Phasenplatten können dabei nicht nur den aktuellen Röntgenlichtquellen zugute kommen, sondern insbesondere eine wesentliche Komponente für Röntgenlaser und die Synchrotronlichtquellen der nächsten Generation werden“, betont Schroer. „Die Fokussierung auf quasi das theoretisch Machbare ist nicht nur die Voraussetzung für eine wesentliche Verbesserung verschiedener experimenteller Techniken, sie kann auch völlig neue Untersuchungen

„Mit unserer Methode lässt sich im Prinzip für jede Röntgenoptik eine individuelle Korrekturlinse herstellen“

Christian Schroer, DESY

ermöglichen, etwa die nichtlineare Streuung von Lichtteilchen an Materieteilchen oder die Erzeugung von Materieteilchen aus der Wechselwirkung von zwei Lichtteilchen. Für diese Methoden muss die Röntgenstrahlung auf engstem Raum gebündelt werden, und eine effiziente Fokussierung ist daher unabdingbar.“

.....
Nature Communications, 2017; DOI: 10.1038/ncomms14623

Mehr Pixel für neue Physik

01 LARGE HADRON COLLIDER LHC

Der Large Hadron Collider (LHC) am Genfer Forschungszentrum CERN ist der größte Teilchenbeschleuniger der Welt. Die Wissenschaftler erforschen mit ihm die grundlegenden Bausteine und Prozesse im Universum, indem sie Protonen, Bausteine der Atomkerne, mit höchster Energie aufeinander prallen lassen.

LHC

Der LHC-Beschleunigerring hat einen Umfang von **27 Kilometern**. Das entspricht **einem Tagesmarsch** für einen Menschen.

03 PIXELDETEKTOR

In der jüngsten Betriebspause des LHC wurde der innerste Teil von CMS ausgetauscht: der Pixeldetektor. Er umgibt das Strahlrohr in wenigen Zentimetern Abstand und misst, in welchen Bahnen geladene Teilchen vom Kollisionspunkt wegfliegen.



Der neue Pixeldetektor besteht aus 1856 einzelnen Modulen, auf denen die Messeinheiten (Pixel) sitzen. Jedes **Modul** ist etwa so groß wie eine **Visitenkarte**.

02 CMS-DETEKTOR

Der CMS-Detektor ist eines der vier großen Nachweisgeräte am LHC, mit denen nach neuen Teilchen und Phänomenen gesucht wird, die aus den Kollisionen im LHC entstehen.



Der **CMS-Detektor** ist mit 15 Metern so hoch wie ein **mehrstöckiges Haus**. Mit 14 000 Tonnen ist er der schwerste Detektor, der jemals an einem Beschleuniger gebaut wurde.

Die einzelnen **Pixel** haben eine Fläche von 0,1 mal 0,15 Quadratmillimetern und befinden sich damit in der gleichen Größenordnung wie **Staubmilben**.



04 PIXEL

Ein Modul beherbergt jeweils 66 650 Pixel, die auf 16 Chips verteilt sind. Jedes Pixel kann ein Signal messen. Ein Kabel leitet die in einem Modul gemessenen Signale weiter.

05 UPGRADE

Durch das Upgrade kann der Pixeldetektor doppelt so viele Daten aufnehmen: Aus 66 Millionen Pixeln wurden 124 Millionen. Außerdem verarbeitet der Detektor die Daten schneller. Auch DESY und die Universität Hamburg haben maßgeblich daran mitgewirkt.



UND WOZU DAS GANZE?

Im Laufe seiner Betriebszeit erreicht der LHC immer höhere Kollisionsraten (Luminosität), weswegen der Pixeldetektor immer mehr Daten gleichzeitig verarbeiten muss. Durch das Upgrade wird er aufgerüstet, um den höheren Raten nachkommen zu können. Außerdem können die Teilchenspuren präziser rekonstruiert werden.



BIG BANG

Mehr Pixel, um dem Urknall und den Geheimnissen des Universums auf die Spur zu kommen.

Impressum

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

Redaktionsanschrift

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

Redaktion

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

An dieser Ausgabe haben mitgewirkt

Frank Grotelüschen, Nikolai Promies

Gestaltung und Produktion

Diana von Ilseemann

Bildbearbeitung und Herstellung

EHS, Hamburg

Redaktionsschluss

April 2017

femto

Das DESY-Forschungsmagazin

Abonnieren Sie
femto kostenlos!

www.desy.de/femto oder 040 8998-3613



Das Forschungszentrum DESY

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



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