



# MPIK-NEWS

Liebe Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, Ehemalige und Freunde des MPIK,



ich freue mich, Ihnen mitteilen zu können, dass das Kollegium des MPIK seit dem 1. Mai wieder fünfköpfig ist: Dr. Thomas Pfeifer hat den Ruf angenommen und leitet

nun die Abteilung „Quantendynamik und -kontrolle“. Mehr dazu finden Sie auf S. 4 zusammen mit einem neuen Ergebnis aus seiner bisherigen selbstständigen Max-Planck-Forschungsgruppe am MPIK.

Anfang Juni stimmte der Senat der MPG dem Vorschlag des Instituts für die vorgezogene Nachfolge von Werner Hofmann zu. Die Berufungsverhandlungen werden hoffentlich bis zu Jahresende abgeschlossen sein. Die fünfjährige Überlapp-Phase soll einen nahtlosen Übergang in der Leitung des CTA-Projekts (s. S. 2) gewährleisten.

Sehr erfreulich ist auch, dass der Aufbau des CSR nun in die Zielgerade eingebogen ist, und wir im März den ersten Strahl – wenn auch noch ohne Kühlung – speichern konnten, siehe nebenstehenden Bericht.

Anfang April begutachtete der Fachbeirat das Institut mit sehr positivem Ergebnis und anschließend tagte noch das Kuratorium. Der Fachbeirat bescheinigte dem Institut eine weltweit herausragende Rolle in den jeweiligen Forschungsgebieten.

Am 20. Juli wollen wir uns mit einem Tag der offenen Tür wieder einmal umfassend der Öffentlichkeit präsentieren. Von 10 bis 17 Uhr gibt es an zahlreichen Stationen eine Fülle an Informationen zu unserer Forschung und der unverzichtbaren Arbeit in den Infrastruktur-Einrichtungen. Schon jetzt lade ich Sie, Ihre Angehörigen sowie Freunde sehr herzlich zu diesem Ereignis ein.

Ihr

Prof. Dr. Klaus Blaum  
(Geschäftsführender Direktor)

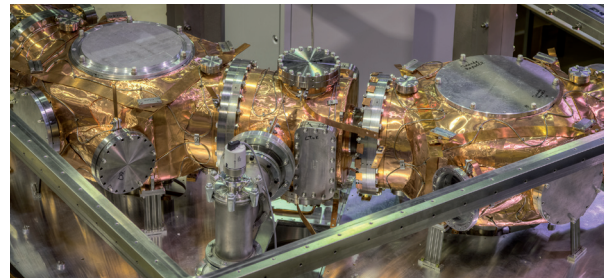
## Erster – noch ungekühlter – Strahl im CSR

Der CSR wird weltweit ein einzigartiges Forschungsinstrument darstellen. Der elektrostatische Speicherring (Umfang 35 m) wird mit Hilfe der Elektronenkühlung die Ionenstrahlen in Raum und Zeit komprimieren können. Abkühlbar auf  $-263^\circ\text{C}$  und mit einem in diesen mechanischen Dimensionen bisher nicht erreichten Vakuum unterhalb von  $10^{-13}$  mbar eröffnet er der Grundlagenforschung in den Bereichen Atom- und Molekülphysik herausragende Möglichkeiten.

Am 17.03.2014 hat der CSR einen weiteren wichtigen Meilenstein erreicht. Nach dem ersten Umlauf eines injizierten  $\text{Ar}^+$ -Strahls konnten diese Ionen bereits kurz danach für viele hundert Durchgänge auf einer stabilen Bahn gespeichert werden. Obwohl für diese Tests der gesamte Speicherring noch nicht abgekühlt werden und die Speicherzeit deshalb nur wenige Millisekunden betragen konnte, bestätigen sie die hochpräzise Realisierung der Ionenoptik und die

Qualität ihrer Planung aufgrund theoretischer Modelle und Berechnungen. Auch für spätere Experimente wichtige Teilchendetektoren wurden bereits erprobt.

Momentan befindet sich der CSR in der Schlussphase des mechanischen Aufbaus. Konstruiert nach dem Zwiebelprinzip – außen eine Isoliervakuumkammer zur Reduktion von Wärmeströmungen, anschließend 2 optisch dichte auf Zwischentemperaturen gehaltene thermische Schilde und ganz innen die Experimentierkammer – ist der CSR für den Betrieb bei tiefsten Temperaturen optimiert worden. Innerhalb der Experimentierkammer befinden sich auch die elektrostatischen Ablenkelektroden.



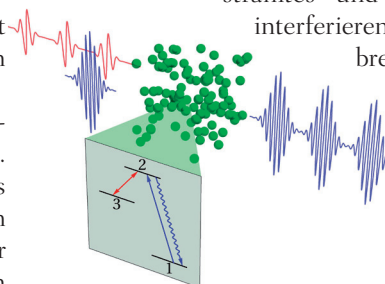
## Röntgen-Frequenzkamm

Frequenzkämme im optischen Bereich bestehen aus einer Serie von genau bekannten Lichtfrequenzen mit exakt gleichen Abständen und werden mit starken, gepulsten Lasern erzeugt. Frequenzkämme im Röntgenbereich würden strenge Tests physikalischer Theorien und exakte Messungen fundamentaler Konstanten erlauben. Deshalb wird intensiv nach Verfahren gesucht, um solche Frequenzkämme zu erzeugen. Eine neu vorgeschlagene Methode kommt als erste mit den Röntgenpulsen derzeit existierender Freie-Elektronen-Laser aus und liefert einen maximal breiten Frequenzkamm.

Die Physiker betrachten ein verdünntes Gas. Ein Röntgenlaserpuls hebt ein Elektron vom Grundzustand (1 in der Abbildung) auf einen

energierichen Zustand (2). Normalerweise würde das Elektron unter Aussendung eines Photons wieder in den Grundzustand zurückkehren. Ein zusätzlicher optischer Puls kurz danach transportiert es aber in den metastabilen Zustand (3), von dem aus es nicht direkt in den Grundzustand gelangen kann. Somit enthält das Gas Ionen in den Zuständen (1) und (3). Ein optischer Frequenzkamm bevölkert nun periodisch den strahlenden Zustand (2) aus (3), wodurch das Gas einen Zug von Röntgenpulsen aussendet. Eingestrahletes und emittiertes Röntgenlicht interferieren miteinander, wodurch ein

breiter Frequenzkamm im Absorptionsspektrum des durchgehenden Röntgenpulses erscheint. Mit den derzeit verfügbaren Röntgenlasern und  $\text{Be}^{2+}$ -Ionen sollte sich dieses Szenario realisieren lassen.



## Das Elektron auf der Waage

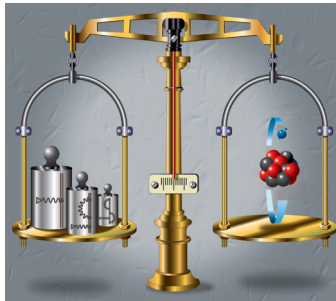
Wären Elektronen nur etwas schwerer oder leichter als sie es sind, sähe die Welt radikal anders aus. Ihre Masse bestimmt den Wert fundamentaler Naturkonstanten. Wie aber wiegt man ein Teilchen, das so winzig ist, dass es als punktförmig gilt?

Dazu waren ein experimenteller Trick und ein theoretischer Beitrag erforderlich. Die Physiker paarten dabei ein einzelnes Elektron mit einem nackten Kern des ungleich schwereren  $^{12}\text{C}$ -Isotops. Dieses Kohlenstoffisotop legt die atomare Masseneinheit fest. Damit ist die Masse von  $^{12}\text{C}$  per Definition exakt bekannt, und ihr Einsatz als Referenz schließt eine wichtige Fehlerquelle aus. Für die Messung wurde ein einzelnes  $^{12}\text{C}^{5+}$ -Ion in einer Penningfalle präpariert und aus der Umlauffrequenz seine Masse präzise bestimmt.

Beim zweiten Schritt, der nun zur Ermittlung der Elektronenmasse nötig war, hilft die Quantenmechanik. Elektronen besitzen einen Spin, und dieser macht sie zu einem winzigen Magneten. Im starken Magnetfeld einer Penning-Falle vollführt dieser Spin wie ein winziger Kreisel eine Präzessionsbewegung. Diese ist zwar extrem schnell, aber präzise messbar. Ent-

scheidend dabei ist: Die Umlauffrequenz des Kohlenstoffions in der Falle und die Wackelfrequenz der Elektronenpräzession stehen in einem exakten Verhältnis. Die Quantenmechanik verknüpft auf diese Weise die Masse des Kohlenstoffions fest mit der Masse des Elektrons, die dadurch messbar wird.

Allerdings muss dazu der  $g$ -Faktor oder gyromagnetischer Faktor exakt bekannt sein. Den Theoretikern gelang es, diesen genauer als je zuvor berechnen und damit die bis dato höchste Präzision bei der Bestimmung der Elektronenmasse erreichen. Das Ergebnis ist eine ungeheuer präzise Zahl: Das Elektron wiegt demnach ein  $1836,15267377$ stel der Protonenmasse. Das ist um einen Faktor 13 genauer als der bisherige Wert.



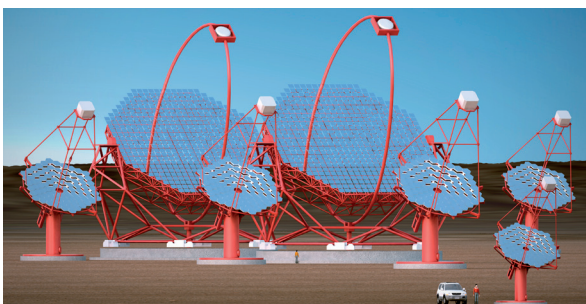
## CTA-Standortverhandlungen

ESO (European Southern Observatory) in Chile und Aar in Namibia sowie Leoncito in Argentinien als dritte Option wurden aus den Bewerbern auf der Südhalbkugel für konkrete Verhandlungen ausgewählt. Diese Entscheidung haben im April Vertreter der Geldgeberländer auf Basis der Empfehlungen einer unabhängigen Standortauswahl-Kommission getroffen. Der Standort soll am Jahresende endgültig festgelegt werden.

Bezüglich des nördlichen Standorts für das CTA-Observatorium – zur Auswahl stehen Orte in Mexiko, Spanien und den USA – sind noch einige Fragen zu klären. Die Entscheidung für Verhandlungen soll aber so bald wie möglich getroffen werden.

CTA – Cherenkov Telescope Array – ist ein multinationales, weltweites Projekt, um ein einzigartiges Instrument zu bauen, das den Kosmos im Licht höchstenergetischer Photonen erkunden soll. Mehr als 1000 Wissenschaftler und Ingenieure aus 5 Kontinenten, 28 Ländern und über 170 Forschungsinstituten sind an dem Projekt beteiligt. CTA wird um eine Größenordnung empfindlicher sein als bisherige Instrumente und so neue Einsichten in einige der extremsten Vorgänge im Universum ermöglichen. CTA wird aus über 100 Tscherenkov-Teleskopen mit 23-m, 12-m und 4-m-Spiegeln bestehen, die in einem größeren Array auf der Südhalbkugel und einem kleineren auf der Nordhalbkugel angeordnet sein werden.

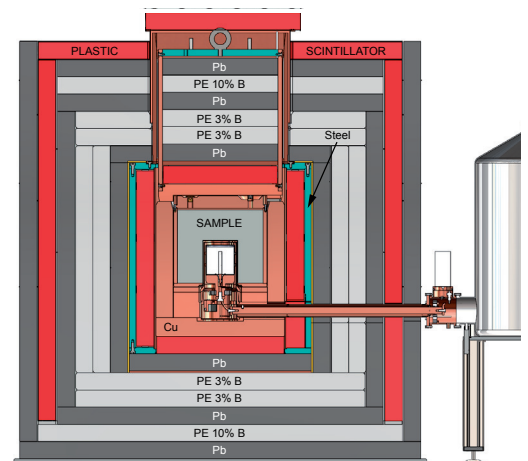
Zunächst wurden potenziell infrage kommende Standorte auf der Nord- und der Südhalbkugel identifiziert. Es folgten ausführliche Untersuchungen der Umweltbedingungen, Simulationen des wissenschaftlichen Potenzials und Baukostenschätzungen. Die Standortauswahl-Kommission, die aus internationalen Experten für die Bewertung von Standorten für astronomische Observatorien besteht, hat diese Untersuchungen begutachtet und eine unabhängige Beurteilung der vorgeschlagenen Standorte erstellt.



## Weltrekord im MPIK-Keller

Ahnlich wie bei der Ernte einer Trockenbeerenauslese, wo nur die besten Trauben verwendet werden, muss bei den Experimenten im Gran-Sasso-Untergrundlabor das eingesetzte Material nach sehr geringem Gehalt an natürlicher Radioaktivität ausgesucht werden. Gut geeignet hierfür ist die Germanium-Gamma-spektrometrie. Sie erkennt die z. B. bei der Suche nach Dunkler Materie oder dem Doppelbetazerfall störende Strahlung von Uran, Thorium oder Kalium. Seit 16 Jahren werden im Gran Sasso unter 1400 m Fels Messungen mit den weltweit empfindlichsten Germanium-Spektrometern, GeMPI genannt, ausgeführt. Im MPIK-Low-Level-Labor, wo die kosmische Strahlung nur etwa um den Faktor 2 (1 Million im Gran Sasso) abgeschwächt ist, ist es mit einem neuen Spektrometer, genannt GIOVE, gelungen die bisher 100 mal geringere Empfindlichkeit deutlich zu verbessern. Der Wegfall des Probenverkehrs und die viel leichtere Zugänglichkeit im Haus vereinfachen zudem die Materialauswahl.

GIOVE besitzt ein inneres und ein äußeres Vetosystem zur Unterdrückung der Untergrundereignisse, die von der kosmischen Strahlung verursacht werden. Um radioaktive Isotope in der Luft auszuschließen, werden die Messproben luftdicht in speziellen Kupferbehältern eingeschlossen, unter Stickstoffspülung in das Handschuhsystem eingeschleust und in die Messkammer unter dem 700 kg schweren Abschirmstopfen abgesenkt. Massive Blei- und Kupferschichten schirmen gegen die Gammastrahlung aus den Laborwänden ab. Die Zwischenlagen aus boriiertem Polyethylen halten Neutronen vom Detektor fern. Die ausgeklügelte Kombination aus aktiver und passiver Abschirmung erlaubte es, ein Spektrometer aufzubauen, das bis auf etwa einen Faktor 5 an die GeMPI herankommt – in dieser geringen Tiefe ein beachtlicher neuer Rekord.

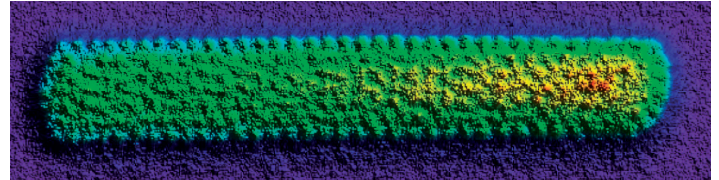


## Eine Bremse für kreiselnde Moleküle

Chemische Reaktionen aus dem Weltall lassen sich künftig leichter auch auf der Erde untersuchen. Ein internationales Team, an dem Forscher der dänischen Universität Aarhus und des MPIK beteiligt sind, hat einen effizienten und vielseitigen Weg gefunden, die Rotation von Molekülonen zu bremsen. Die Rotationsgeschwindigkeit der Teilchen entspricht einer bestimmten Rotationstemperatur. Die Forscher haben diese Temperatur der Moleküle mithilfe eines extrem verdünnten kühlenden Gases auf etwa  $-265\text{ °C}$  gesenkt – ein Rekordwert. Von dem niedrigen Wert ausgehend kann die Temperatur bis zu  $-210\text{ °C}$  dann gezielt eingestellt werden. Die genaue Kontrolle über die Rotation der Moleküle ist nicht nur wichtig, um chemische Umwandlungen im All besser nachvollziehen zu können, sondern auch um etwa die quantenphysikalischen Aspekte der Photosynthese detaillierter zu verstehen oder um Molekülonen in der Quanteninformationstechnologie zu nutzen.

In ihren Experimenten verwendete das Team eine Wolke aus Magnesium- und Magnesiumhydrid-Ionen. Diese sperrten die Forscher in eine Ionenfalle, CryPTE<sub>x</sub> genannt, wo sie mit Laser-

strahlen gekühlt werden. Auf diese Weise senken die Forscher die translationale Temperatur der Wolke auf  $-273\text{ °C}$ , bis einige 100 Teilchen zu einem regelmäßigen Coulomb-Kristall erstarren. Darin sind die Abstände der Teilchen anders als normalen Kristallen sehr groß. Daher sind die Teilchen, die der Kühllaser zum Leuchten bringt, im Lichtmikroskop auf ihren fixen Positionen zu erkennen. Um die Drehung der Molekülonen zu bremsen und somit die Rotationstemperatur zu erniedrigen, ließ das Team nun ein extrem verdünntes, kaltes Heliumgas in die Falle strömen. In dem Ionenkristall stoßen die gemächlich fliegenden Heliumatome mit den Magnesiumhydrid-Ionen zusammen, die Billionen Male pro Sekunde um sich selbst kreiseln. Durch die Stöße bremsen sie die Molekülonen allmählich ab.

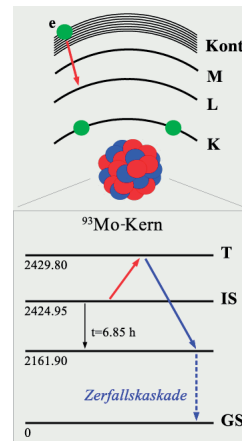


## Elektronen wirksamer als Röntgenlaser

Eine interessante – zumindest hypothetische – Möglichkeit zur Energiespeicherung bieten langlebige, angeregte Kernzustände, sogenannte Kernisomere. Diese können sehr große Mengen an Energie in wenig Material speichern. Wie können die Kernisomere kontrolliert und effizient auf- und entladen werden? Da es fast unmöglich ist, den direkten Zerfall der langlebigen Zustände zu beeinflussen, benutzt man einen Umweg über einen anderen Kernzustand. Dieser Übergang lässt sich mit externen Feldern oder Elektronen leichter „triggern“. Um die in dem Kernisomer gespeicherte Energie freizusetzen, muss man erst den langlebigen Kernzustand weiter anregen. Der dadurch erreichte Zustand ist dann kurzlebig, und falls sein Zerfallsweg nicht über den Iso-

mer-Zustand führt, wird die gesamte Energie freigesetzt. Ein geeigneter Kern ist  $^{93}\text{Mo}$ . Eine Trigger-Anregung von 5 keV setzt die Gesamtenergie von 2,4 MeV als Gammalicht frei. Photonen von 5 keV sind bei heutigen Röntgen-Freie-Elektronen-Lasern verfügbar.

Intensive Röntgenstrahlen erzeugen beim Auftreffen auf einen Festkörper ein Plasma. Unter bestimmten Bedingungen kann die Rekombination eines freien Elektrons mit einem hochgeladenen Ion die gleichzeitige Anregung des Atomkerns bewirken. Dafür müssen die beim Einfangen freigesetzte Energie und die Kernübergangsenergie überein-



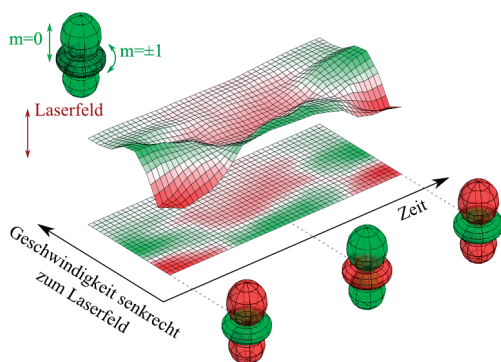
stimmen. Was auf den ersten Blick als störender Nebeneffekt erscheint, führt tatsächlich zu einer deutlich höheren Rate für den Kernanregungsprozess. So deuten die theoretischen Rechnungen darauf hin, dass die Röntgenphotonen ausgerechnet die passenden Ionen und Elektronen im Plasma erzeugen, die Kernanregung durch Elektroneneinfang ermöglichen. Auf diese Weise werden um einige Größenordnungen mehr Kerne angeregt als alleine durch Absorption von Photonen im Kern. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit, mit dem das Kernisomer entladen wird, immer noch zu gering, um von effizienter Kontrolle zu sprechen.

## Schwingende Elektronenwolke

Mit ultraschnellen Laserblitzen gelang es, die Elektronenbewegung in einem Atom abzulichten. Untersucht wurde die Überlagerung zweier Quantenzustände in Argon-Ionen, die sich als schwingende Ladungswolke zeigt. Die Auswertung lieferte ein direktes Abbild der zeitlichen Entwicklung einer Wellenfunktion mehrerer Elektronen. Um Störeffekte zu eliminieren, wurde die Differenz zwischen der Geschwindigkeitsverteilung für einen

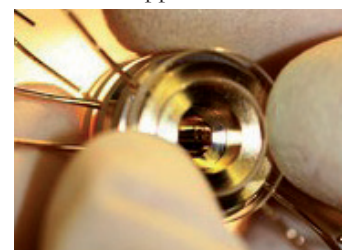
Zeitpunkt und der gemittelten Verteilung bestimmt.

Das Ergebnis stimmt gut mit Simulationsrechnungen überein und testet Modelle der Tunnelionisation.

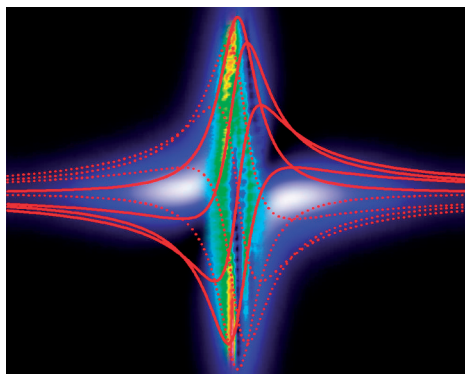


## Das Proton als Magnet

Im Urknall entstanden gleich viel Materie und Antimaterie – um sich gegenseitig wieder auszulöschen. Doch ein kleiner Materieüberschuss überlebte und formte das Universum. Die Ursache dafür gehört zu den größten Rätseln der Physik. Ein präziser Vergleich der Eigenschaften von Materie und Antimaterie könnte zu seiner Lösung beitragen. Zu diesen Eigenschaften zählt das magnetische Moment des Protons, das eine wissenschaftliche Kooperation nun so präzise wie nie zuvor bestimmt hat. Ein in einer Penningfalle gespeichertes Proton schwingt darin hin und her. Mit seiner Ladung produziert es damit einen extrem schwachen Strom, den die hochsensitive Apparatur erfassen kann. Als winziger Stabmagnet darf das Proton in einem von außen angelegten Magnetfeld nur in zwei entgegengesetzte Richtungen zeigen. Je nach Orientierung schwingt das Proton in der Falle schneller oder langsamer.



# Quantensystemen „zuhören“ und „zusehen“: Thomas Pfeifer neuer Direktor am MPIK



Dr. Thomas Pfeifer hat den Ruf zum wissenschaftlichen Mitglied und Direktor am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg angenommen. Der wissenschaftliche Fokus der neuen Abteilung liegt auf den Grundlagen der Quantendynamik kleiner Systeme (Atome, Moleküle, Ionen, Kerne) und deren Wechselwirkung und Steuerung mit starken Feldern.

Thomas Pfeifers Abteilung „Quantendynamik und -kontrolle“ vereint die wissenschaftliche Expertise seiner bisherigen selbstständigen Max-Planck-Forschergruppe und der ehemaligen Abteilung Ullrich. Als Werkzeuge dienen präzise, zum Teil auf kürzesten Zeitska-

len aufgelöste, spektroskopische („hören“) und abbildende („sehen“) experimentelle Methoden. Thomas Pfeifer und seine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter suchen nach Antworten auf eine Reihe von fundamentalen Fragen: Was passiert, wenn man grundlegende Wechselwirkungsprozesse wie z.B. die Absorption bzw. Emission von Licht, Ionisation oder das Brechen von Molekülbindungen gezielt als Funktion der Zeit verändert? Wann wird aus quantenmechanischer Interferenz eine klassische Wahrscheinlichkeit? Wie und wie schnell verändert sich Materie unter dem Einfluss von Laserfeldern? Können wir die Erkenntnisse nutzen, um Chemie mit dem Laser zu steuern? Was lernen wir aus der Verbindung von Präzisionspektroskopie, höchster Zeitauflösung und intensiven Feldern? Findet man ein intuitiveres physikalisches Verständnis von Quantendynamik am Übergang zwischen Frequenz- und Zeitdarstellung?

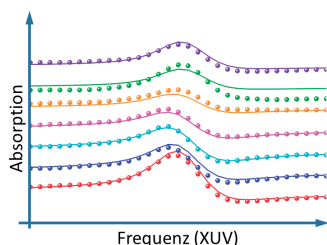
Thomas Pfeifer studierte Physik an der Universität Würzburg und der University of Texas in Austin, USA und promovierte 2004 in Würzburg, bevor er als PostDoc an die University of California in Berkeley

ging. Seit 2009 war er Leiter einer selbstständigen Max-Planck-Forschungsgruppe am MPIK, die aus einem themenoffenen internationalen Wettbewerb hervorging. Kürzlich erhielt er für sein Projekt „X-MUSIC“ einen Consolidator Grant des Europäischen Forschungsrats und wurde 2013 mit dem Heinz Maier-Leibnitz-Preis ausgezeichnet, dem wichtigsten Preis für junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in Deutschland. Er ist auch als Dozent an der Universität Heidelberg tätig.



## Ein Phasenschieber für Atome

Schwingungen und Wellen sind neben ihrer Frequenz und Amplitude durch ihren zeitlichen Verlauf bezüglich eines vorgegebenen Zeitpunkts bestimmt, die Phase. Die Quantenmechanik beschreibt



Bewegung von Teilchen (dargestellt durch Wellenfunktionen) durch die Überlagerung mehrerer angeregter Zustände mit definierter Phasenbeziehung (Kohärenz). Unter dem Einfluss zusätzlicher äußerer Felder führt Licht-Materie Wechselwirkung (Kopplung) zu weiteren Beiträgen zur Phasenentwicklung und Veränderungen der Besetzungswahrscheinlichkeit der Zustände, z. B. durch Quantenübergänge. Während die Besetzungswahrscheinlichkeit (das Quadrat der quantenmechanischen Zustandsamplitude) direkt experimentell zugänglich ist, so ist die Phasenänderung einzelner gebundener Zustände, insbesondere in starken

Laserfeldern, keine direkt messbare Größe.

Eine zustandsselektive Methode zur Messung der vollständigen quantenmechanischen Information, Amplitude und Phase hat nun die INTERATTO-

Gruppe gefunden und dabei einen kontrollierten Phasenschieber für atomare Zustände realisiert. Die Methode basiert auf der Analyse von Spektrallinienformen unter dem Einfluss äußerer Laserfelder.

Die Methode ist weder auf Helium noch auf die hier untersuchten doppelt angeregten Zustände beschränkt, sondern erlaubt in jeder Form der Spektroskopie die Untersuchung zeitabhängiger Zustandsveränderungen. Sie könnte in der Zukunft präzise Tests fundamentaler Dynamik und zeitabhängiger Wechselwirkung in kleinen Quantensystemen erschließen: Ein Phasensprung in der Entwicklung der Quantendynamik.

## Personalien

### Preise und Ehrungen

**Dr. Thomas Pfeifer** erhielt für sein Projekt „X-MUSIC“ einen Consolidator Grant des ERC.

**Dr. Robert Wolf** erhielt den Wolfgang-Paul-Promotionspreis der Deutschen Gesellschaft für Massenspektrometrie und den „GENCO Award“ der GSI Exotic Nuclei Community.

**Dr. Felix Mackenroth** und **Dr. Marc Weber** erhielten für ihre Dissertationen Otto-Hahn-Medaillen der MPG.

### Selbstständige Gruppe

**Prof. Dr. Alexei Smirnov** leitet seit 01.05. die Max-Planck-Fellow-Gruppe „Theoretische Neutrino- und Astroteilchenphysik“.

### Habilitationen

**Daniel Fischer:** Few-particle quantum-dynamics in ion-atom collisions.

**Frank Rieger:** Gamma-ray astrophysics.

### Dienstjubiläen

40 Jahre MPG:

**Friedrich Töpfer, Peter Zobel**

## Impressum

Herausgeber: Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg · info@mpi-hd.mpg.de

Redaktion: Dr. Bernold Feuerstein, Dr. Gertrud Hönes

Weitere Informationen zu den Artikeln unter: [www.mpi-hd.mpg.de/mpik/de/aktuelles/presseinformationen](http://www.mpi-hd.mpg.de/mpik/de/aktuelles/presseinformationen)