

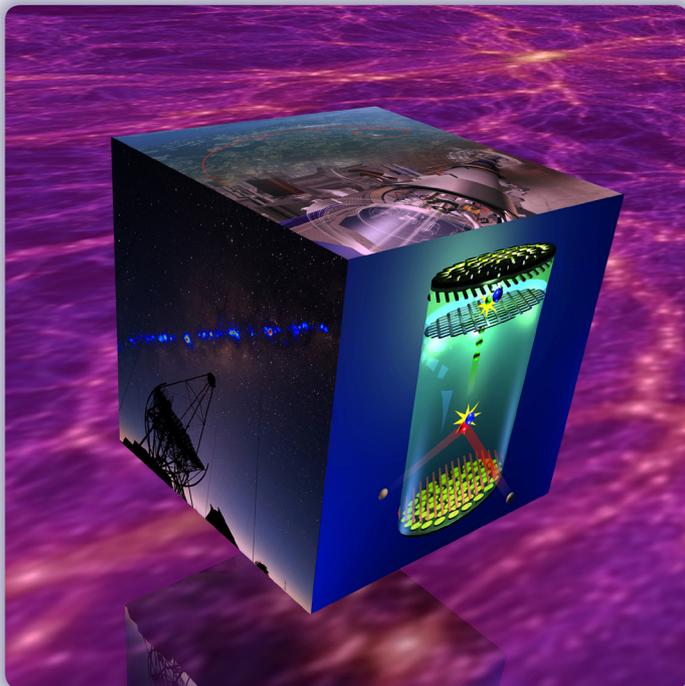


# MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR KERNPHYSIK HEIDELBERG

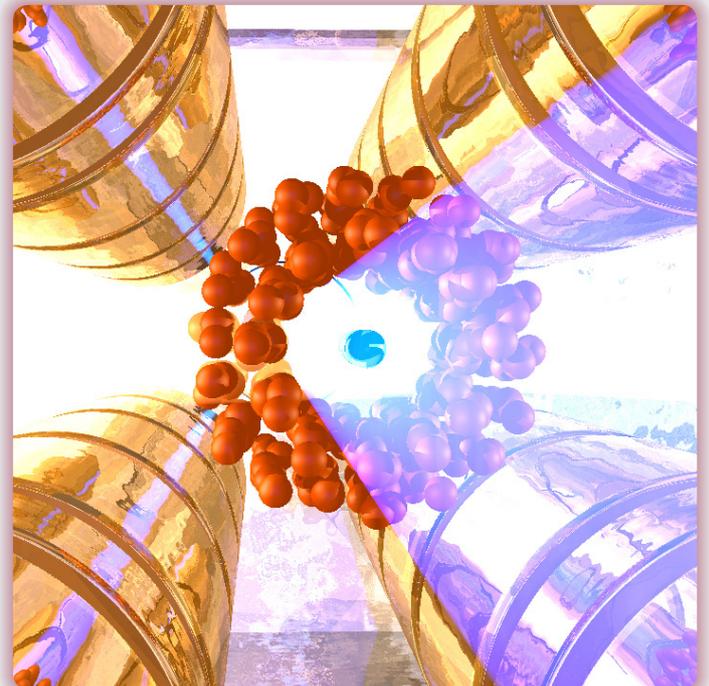


## Das Institut und seine Forschungsgebiete

ASTROTEILCHENPHYSIK



QUANTENDYNAMIK



### **Astroteilchenphysik:**

*Komplementäre Strategien zur Suche nach Dunkler Materie:  
direkt, indirekt und an Beschleunigern.*

*Hintergrund: Millenium-Simulation (MPI für Astrophysik)*

### **Quantendynamik:**

*Ionenfalle CryPTEx: in einem lasergekühlten Ionenkristall  
werden hochgeladene Ionen gekühlt und an definierten  
Positionen eingebettet.*



# MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR KERNPHYSIK HEIDELBERG

## Das Institut und seine Forschungsgebiete

---

### *Astroteilchenphysik*

**Das Universum bei höchsten Energien  
Unsichtbare Teilchen  
Die Suche nach neuer Physik**

---

### *Quantendynamik*

**Höchste Präzision  
Schnellste Bewegungen beobachten  
Die Extreme erkunden**

---

### *Infrastruktur*

**Wissenschaftlicher und technischer Service**

---

#### Impressum

Herausgeber: Max-Planck-Institut für Kernphysik, Öffentlichkeitsarbeit, Heidelberg 2018  
Redaktion: Bernold Feuerstein, Gertrud Hönes



## Überblick

Das Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) ist eine Forschungseinrichtung der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V., die Grundlagenforschung auf allen Gebieten der Wissenschaft betreibt.

Das MPIK wurde 1958 von Wolfgang Gentner gegründet. Es ging aus dem von Walther Bothe von 1934 bis 1957 geleiteten Institut für Physik im MPI für medizinische Forschung hervor. Seit 1966 wird das MPIK von einem Direktorenkollegium geführt. Ursprüngliche wissenschaftliche Ziele waren kernphysikalische Grundlagenforschung und Anwendung kernphysikalischer Methoden auf Fragen der Physik und der Chemie des Kosmos.

Heute konzentrieren sich die Aktivitäten auf die interdisziplinären Gebiete **Astroteilchenphysik (Synergien von Teilchenphysik und Astrophysik)** und **Quantendynamik (Dynamik von Atomen und Molekülen)**.

Wissenschaftler des MPIK arbeiten mit anderen Forschungsgruppen in der ganzen Welt zusammen. Sie wirken in zahlreichen internationalen Kollaborationen teilweise federführend mit. Besonders intensive Beziehungen bestehen zu einigen Großforschungseinrichtungen wie GSI Helmholtzzentrum und FAIR (Darmstadt), DESY (Hamburg), CERN (Genf), INFN-LNGS (Assergi L'Aquila) und LCLS (Stanford).



*Klaus Blaum Christoph H. Keitel Manfred Lindner Thomas Pfeifer Jim Hinton*

In der Region kooperiert das Institut eng mit der Universität Heidelberg, an der alle Direktoren und weitere Mitarbeiter des Instituts lehren. Zur strukturierteren Promovierenden-Ausbildung wurden zusammen mit weiteren Instituten drei International Max Planck Research Schools (IMPRS) gegründet.

Die zentralen Infrastrukturgruppen am MPIK sind tragende Säulen einer erfolgreichen wissenschaftlichen Arbeit: Feinmechanik- und Elektronik-Werkstätten jeweils mit ange-

schlossenen Lehrwerkstätten, Konstruktionsbüro, Informationstechnologie, Strahlenschutz, Arbeitssicherheit und Umwelt, Bibliothek, Öffentlichkeitsarbeit und Medientechnik, Verwaltung sowie Betriebstechnik.

Außer den wissenschaftlichen Abteilungen gibt es am Institut einige selbstständige Gruppen, die von jungen Forschenden geleitet werden, sowie Max Planck Fellows. Wissenschaftlich sind sie jeweils mit einer Abteilung verbunden und verbreitern deren Themenfeld.

## Die wissenschaftlichen Abteilungen

### Prof. Dr. Klaus Blaum - Gespeicherte und gekühlte Ionen

Die Abteilung beschäftigt sich mit Präzisionsexperimenten an gespeicherten und gekühlten Ionen sowie mit der Erforschung elementarer Prozesse in Molekülionen. Dafür werden kurzlebige Radionuklide, hochgeladene Ionen oder einfache Molekülionen in Penningfallen oder Speicherringen nahezu unter Weltraumbedingungen gefangen. Dazu kommt die Entwicklung neuer Speicher-, Kühl- und Nachweistechiken für Zukunftsexperimente.



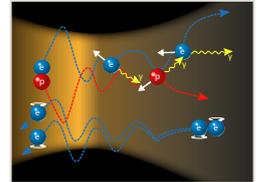
### Prof. Dr. Jim Hinton - Nichtthermische Astrophysik

Die Forschung der Abteilung umfasst zwei Gebiete. Die Hochenergie-Astrophysik untersucht Quellen und Beschleunigungsprozesse hochenergetischer Teilchen im Universum mit Teleskopen für atmosphärische Tscherenkow-Strahlung und dichten Teilchendetektorfeldern. Teilchenphysikalische Experimente zu Bildung und Zerfällen schwerer Quarks und zum neutrinolosen Doppelbetazerfall testen das Standardmodell der Teilchenphysik.



### Honorarprof. Dr. Christoph H. Keitel - Theoretische Quantendynamik und Quantenelektrodynamik

Die Abteilung zielt auf ein detailliertes Verständnis des quantenmechanischen Zusammenspiels aller Bestandteile atomarer, ionischer oder nuklearer Systeme mit Laser- und Röntgenfeldern, wobei relativistische und QED-Effekte berücksichtigt werden. Dazu kommen theoretische Vorschläge zur Optimierung diverser Anwendungen wie hochpräziser Tests, Kern-Quantenkontrolle, Teilchenbeschleunigung oder Erzeugung neuer Teilchen.



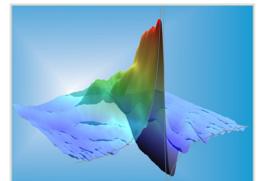
### Prof. Dr. Dr. h.c. Manfred Lindner - Teilchen- und Astroteilchenphysik

Die Abteilung befasst sich experimentell und theoretisch mit aktuellen Fragestellungen der Teilchen- und Astroteilchenphysik. Die experimentellen Aktivitäten konzentrieren sich auf Projekte der Neutrinophysik und der Suche nach Dunkler Materie. Die breiter angelegten theoretischen Aktivitäten reichen von der Interpretation von Ergebnissen experimenteller Projekte bis zu formalen Fragen, die sich im größeren Kontext ergeben.



### Prof. Dr. Thomas Pfeifer - Quantendynamik und -kontrolle

Der wissenschaftliche Fokus der Abteilung liegt auf den Grundlagen der Quantendynamik kleiner Systeme (Atome, Moleküle, Ionen, Kerne) und deren Wechselwirkung und Steuerung mit starken Feldern. Präzise, spektroskopische („hören“) und abbildende („sehen“) experimentelle Methoden dienen als Werkzeuge, um Antworten auf fundamentale Fragen zur Natur von Bewegungen auf sehr kurzen und sehr langen Zeitskalen zu finden.





# DAS UNIVERSUM BEI HÖCHSTEN ENERGIEN

*Gammaquellen entlang der Milchstraße, gesehen vom H.E.S.S.-Tscherenkow-Teleskopsystem in Namibia.*

**Was sind die kosmischen Quellen hochenergetischer Gammastrahlung?  
Wie und wo werden kosmische Teilchen beschleunigt?  
Welche Wirkung haben ultrarelativistische Teilchen auf astrophysikalische Systeme?**

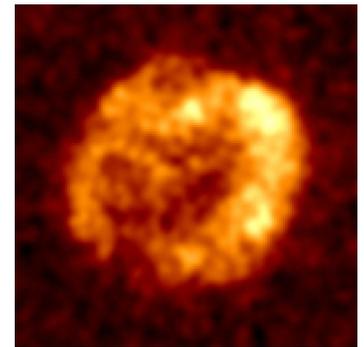
## Kosmische Beschleuniger – Astronomie bei höchsten Energien

Auf dem Gebiet der Hochenergieastrophysik arbeiten am MPIK experimentell und theoretisch orientierte Astrophysiker eng zusammen. Mit dem High Energy Stereoscopic System H.E.S.S. in Namibia und dem High Altitude Water Cherenkov Detector HAWC in Mexiko beobachten sie sehr hochenergetische (VHE) Gammastrahlen aus dem Kosmos, um damit die extreme Beschleunigung von Teilchen in den kosmischen Quellen und die Rolle dieser Teilchen in astrophysikalischen Systemen zu verstehen.

Im Gegensatz zur elektromagnetischen Strahlung in den meisten anderen Wellenlängenbereichen können Gammastrahlen im VHE-Bereich nicht als thermische Strahlung erzeugt werden; nur im Urknall waren die Temperaturen kurzzeitig hoch genug. VHE-Gammastrahlen entstehen, wenn stark beschleunigte geladene Teilchen mit dem umgebenden Medium reagieren – entweder interstellares Gas oder Strahlungsfelder. Im Gegensatz zu den geladenen Teilchen, auch kosmische Strahlung genannt, breiten sich die Gammastrahlen geradlinig von der Quelle zum Beobachter aus und ermöglichen so, die Quellen abzubilden und die astrophysikalischen Prozesse zu studieren.

Geladene Teilchen gewinnen zunehmend Energie, indem sie immer wieder in die Schockfront gigantischer Schockwellen von Supernovaexplosionen oder in die Plasmajets aus der unmittelbaren Umgebung Schwarzer Löcher in den Zentren von Galaxien zurück diffundieren. Am Institut wird daran gearbeitet, die Vorgänge in den unterschiedlichen Typen von kosmischen Beschleunigern zu modellieren und theoretisch zu beschreiben.

Zu den neuesten Ergebnissen von H.E.S.S. gehören die Beobachtung von Gammastrahlenausbrüchen und – erstmals aufgelöst – die Emission der Jets aktiver Galaxien im hochenergetischen Gammalicht. Die Zeitschrift *Astronomy & Astrophysics* gab 2018 einen Sonderband über die Messungen in der Milchstraße heraus. Dort hat H.E.S.S. mehr als 80 Quellen entdeckt, die überwiegend auch bei anderen Wellenlängen sichtbar sind. Am häufigsten handelt es sich dabei um Supernova-Überreste oder Pulsarwindnebel. Das Zentrum der Milchstraße ist von besonderem Interesse, und H.E.S.S. hat VHE-Gammastrahlung aus



*Der Supernova-Überrest RX J1713-3946 im hochenergetischen Gammalicht..*



Als nächstes, wesentlich leistungsstärkeres Observatorium ist CTA, Cherenkov Telescope Array, mit insgesamt rund 100 Teleskopen in drei verschiedenen Größen an zwei Standorten in Chile (Paranal) bzw. auf der Kanareninsel La Palma in Vorbereitung. CTA wird eine bessere Auflösung, höhere Empfindlichkeit, einen größeren Energiebereich und eine mehrere Quadratkilometer große Sammelfläche bei den höchsten Energien haben. Das MPIK entwickelt neuartige Kameras für mittelgroße und kleine Teleskope.

An hochgelegenen Orten lassen sich die Schauerteilchen – rund um die Uhr – direkt nachweisen, und zwar mit wassergefüllten Detektoren, worin sie ebenfalls Tscherenkow-Licht erzeugen. 300 dicht beieinanderstehende Tanks auf 4100 m Höhe bilden das Haupt-Detektorfeld von HAWC. Die Tanks sind mit hochreinem Wasser gefüllt und mit Lichtsensoren bestückt. Um sie herum stehen 350 locker angeordnete kleinere „Outrigger“-Tanks, die wesentlich die Charakterisierung von Teilchenschauern verbessern, die im Randbereich des Hauptfeldes auftreffen. Das MPIK spielt eine zentrale Rolle bei der Planung eines weiterentwickelten Gammastrahlenobservatoriums mit großem Blickfeld auf der Südhalbkugel, das Southern Wide-field Gamma-ray Observatory (SWG0). SWGO basiert auf denselben Nachweisprinzipien wie HAWC, soll aber eine größere Fläche bedecken und einen breiteren Energiebereich erfassen.



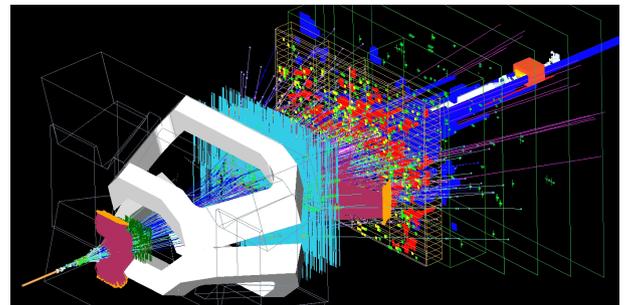
Ein „Outrigger“-Tank vor dem Hauptdetektorfeld von HAWC in Mexiko.

## Das frühe Universum – Elementarteilchen bei höchsten Energien

In hochenergetischen Kollisionen zwischen Atomkernen entstehen kurzlebige Teilchen, die normalerweise in der Natur nicht vorkommen, aber in dem extrem heißen und dichten Zustand unmittelbar nach dem Urknall existierten. Solche Teilchenkollisionen ermöglichen die Erforschung der fundamentalen Wechselwirkungen zwischen den elementaren Bestandteilen unserer Welt und geben Einblicke in die Physik am Beginn des Universums.

Eine Gruppe am MPIK ist Mitglied der LHCb-Kollaboration, die eines der vier großen Experimente am Large Hadron Collider (LHC) des CERN betreibt. In Proton-Proton-Kollisionen macht LHCb Präzisionsmessungen der starken, der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung und erforscht in Proton-Kern-Kollisionen Kerneffekte. Drittens bieten Kern-Kern-Kollisionen Einblicke in kollektive Phänomene in ausgedehnten Systemen aus freien Quarks und Gluonen, dem sogenannten Quark-Gluon-Plasma.

Diese Messungen beleuchten die Eigenschaften des weniger als eine Nanosekunde alten Universums. Gleichzeitig helfen sie zu verstehen, wie hochenergetische kosmische Strahlung mit der Atmosphäre reagiert, was für die Interpretation der Daten von Tscherenkow-Detektoren wichtig ist.



Darstellung eines Teilchenschauers im LHCb-Detektor, der von einer Proton-Blei-Kollision im LHC ausgeht.



# UNSICHTBARE TEILCHEN

Das XENON-Experiment im Gran-Sasso-Untergrundlabor in Italien.

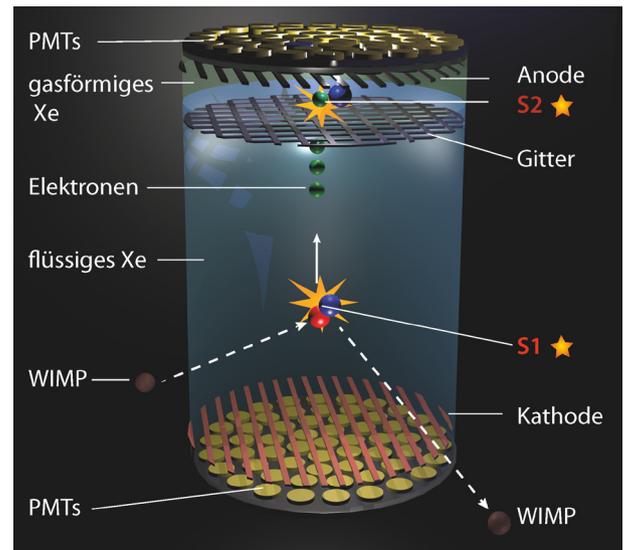
**Woraus besteht Dunkle Materie und wie kann man sie finden?  
Sind Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen?  
Wie groß ist ihre Masse und wie wandeln sie sich ineinander um?**

## Dunkle Materie – Strukturbildner im Universum

Astronomische Beobachtungen wie der Umlauf der Sterne in Galaxien, Gravitationslinsen in Galaxienclustern oder der kosmische Mikrowellenhintergrund legen es nahe, dass das Universum zu etwa 27% aus Dunkler Materie (DM) besteht, während der Anteil normaler sichtbarer Materie nur etwa 5% beträgt. Der Rest ist die mysteriöse Dunkle Energie, die für die beobachtete beschleunigte Ausdehnung des Universums verantwortlich gemacht wird.

Aufgrund theoretischer Überlegungen sind schwach wechselwirkende schwere Teilchen, WIMPs genannt, aussichtsreiche Kandidaten für Dunkle Materie, da solche Teilchen im frühen Universum in der erforderlichen Menge entstanden sein sollten, und weil – ohnehin notwendige – Erweiterungen des Standardmodells der Teilchenphysik sie vorschlagen. Forscher am MPIK betrachten aber auch alternative Möglichkeiten, die durch andere theoretische Aspekte motiviert sind. Beispiele sind „Axionen“, „sterile Neutrinos“ oder nur über die Schwerkraft wechselwirkende Teilchen. Außerdem soll eine Analyse der Daten verschiedener Experimente im Zusammenhang deren Widersprüche aufklären und zu einem globalen Bild führen.

Das MPIK beteiligt sich an der direkten Suche nach WIMPs mit den XENON-Experimenten im Gran-Sasso-Untergrundlabor in Italien, die hochreines flüssiges Xenon als Detektormedium verwenden. Die Detektoren sind in der Lage, Szintillationslicht und elektrische Ladung korreliert zu messen, die bei den erwarteten seltenen Stößen von WIMPs mit Xenon-Atomen entstehen. XENON1T hat die weltweit höchste Empfindlichkeit derartiger Experimente erreicht und ist weit in den vorhergesagten Parameterbereich von WIMPs und anderen DM-Teilchen eingedrungen, hat



Funktionsweise der XENON-Detektoren. PMT steht für Photomultiplier (Lichtsensoren), S1 und S2 sind das prompte Lichtsignal bzw. das verzögerte Ladungssignal.

aber kein Signal gesehen. Diese hohe Empfindlichkeit ermöglichte es, quasi nebenbei eine Halbwertszeit von unvorstellbaren  $1.8 \times 10^{22}$  Jahren für den doppelten Elektroneneinfang in  $^{124}\text{Xe}$  zu messen. Ein größerer Detektor (XENONnT) mit der dreifachen aktiven Xenonmasse, der dieselbe Infrastruktur nutzt, ist am Start und soll eine 10-fache Steigerung der Empfindlichkeit bringen.

Außerdem suchen die H.E.S.S.-Teleskope nach hochenergetischen Gammastrahlen aus der Annihilation von Dunkle-Materie-Teilchen im DM-Halo der Milchstraße.

---

### Low-Level-Techniken



Das Germanium-Spektrometer GIOVE im Kellerlabor des MPIK.

Bei Experimenten, die seltene Ereignisse suchen, spielen Identifizierung und Reduktion des störenden Hintergrunds eine entscheidende Rolle. Das MPIK hat jahrzehntelange Erfahrung und Expertise mit Low-Level-Techniken. Das Untergrundlabor des Instituts ist gegen kosmische Strahlung abgeschirmt und bietet ideale Bedingungen für die Entwicklung von Detektoren für derartige Experimente. Hochempfindliche Gammaskpektrometer und Proportionalzähler dienen der Überprüfung von Materialien auf radioaktive Verunreinigungen und sind die Basis von Analysetechniken für extrem niedrige Konzentrationen von Radioisotopen.

Die natürlich vorkommenden Radioisotope  $^{222}\text{Rn}$  und  $^{85}\text{Kr}$  sind die am meisten störenden Verunreinigungen, für die verschiedene Abschirmungs-, Mess- und Reduktionsmethoden angewandt werden. „Auto-Ema“ extrahiert vollautomatisch das aus festem Material austretende Radon. Das erleichtert seine empfindliche Messung und somit die Materialauswahl für Detektoren. Edelgas-Massenspektrometrie ist mittlerweile so empfindlich, dass  $^{85}\text{Kr}$  in Xe auf  $10^{-23}$  genau kontrollierbar ist. Neue Oberflächen-Beschichtungstechniken sollen den Hintergrund in bisher unerreichtem Maß verringern, um höchste Sensitivität für Dunkle Materie zu erzielen.

---

### Neutrinos – Teilchen mit verblüffenden Eigenschaften

Neutrinos sind elektrisch neutrale Elementarteilchen mit winziger Masse, von denen es drei Sorten gibt. Neben Photonen sind sie die häufigsten Teilchen im Universum, aber wir bemerken sie nicht, weil sie nur selten mit Materie wechselwirken und diese nahezu ungehindert durchdringen. Ihr Nachweis erfordert empfindliche Detektoren mit bester Abschirmung gegen Störeinflüsse.

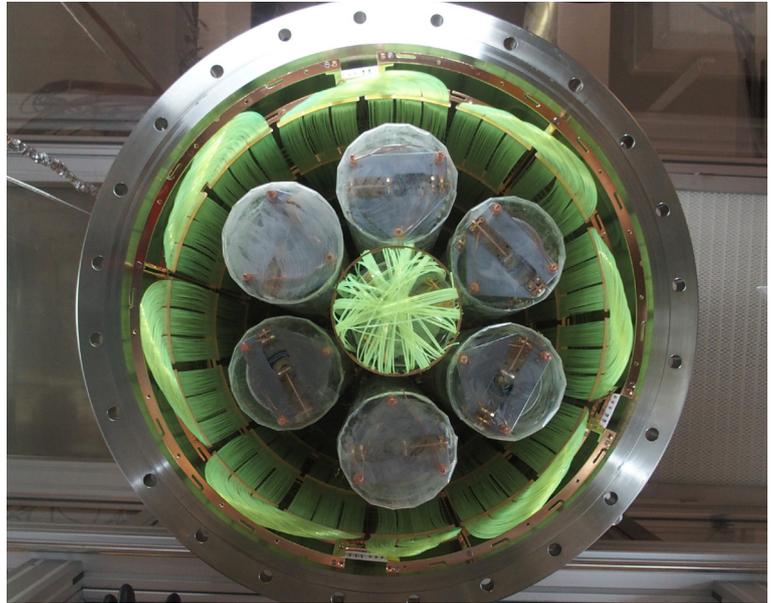
Beim Betazerfall, wenn ein Neutron in ein Proton und ein Elektron zerfällt, wird auch ein Antineutrino frei und es entsteht das Element mit der nächsthöheren Ordnungszahl. Manche Atomkerne, darunter das Germanium-Isotop  $^{76}\text{Ge}$ , zeigen statt des einfachen den doppelten Betazerfall: es zerfallen zwei Neutronen gleichzeitig – mit Emission von zwei oder möglicherweise keinem Neutrino. Das GERDA-Experiment suchte nach dem neutrinolosen doppelten Betazerfall in reinen, stark mit  $^{76}\text{Ge}$  angereicherten Germaniumkristallen. Sollte er möglich sein, ist der neutrinolose Doppelbetazerfall extrem selten. Bisher fand man

keinen Hinweis auf den Zerfall – nur dass dessen Halbwertszeit in  $^{76}\text{Ge}$  mindestens  $1,8 \times 10^{26}$  Jahre beträgt. Das Nachfolgeprojekt LEGEND200 basiert auf GERDA und wird mit wesentlich mehr Germanium die Empfindlichkeit stark erhöhen. Ein Signal würde zeigen, dass Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen, sogenannte Majorana-Teilchen sind, und man könnte daraus ihre Masse ableiten.

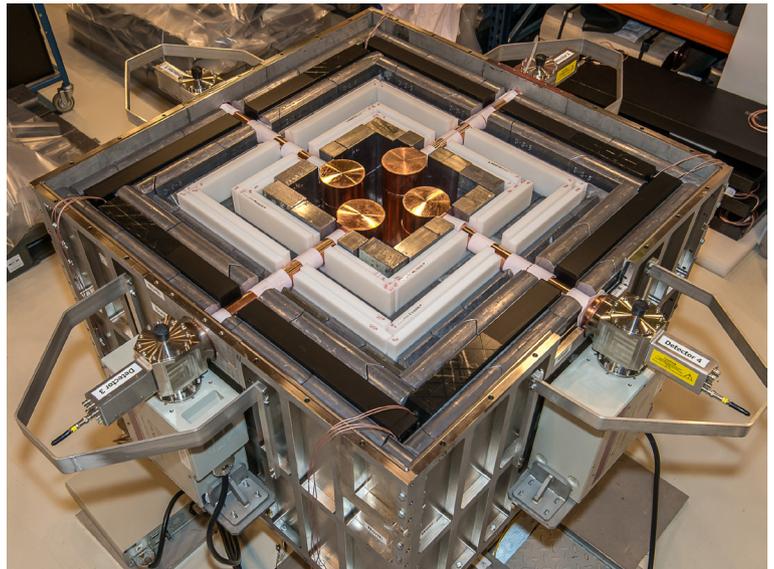
Für die Ruhemasse der Neutrinos sind bisher nur Grenzen und Differenzen bekannt. Andere Experimente zur Bestimmung der Neutrinomasse beruhen auf dem Einfang eines Elektrons durch ein Proton im Kern. Zusätzlich ist die Kenntnis der exakten Massendifferenz zwischen Mutter- und Tochterkern erforderlich. Eine Gruppe am MPIK führt derartige Präzisionsmessungen durch.

Die drei Neutrinosorten Elektron-, Myon- und Tauon-Neutrino wandeln sich periodisch ineinander um („Neutrino-Oszillationen“). Deshalb misst man mit zunehmendem Abstand von einem Kernreaktor, der eine starke Quelle von Elektron-Antineutrinos ist, immer weniger dieser Neutrinos. So konnte unter anderen das Double-Chooz-Experiment bestätigen, dass alle Oszillationen stattfinden und diese genau vermessen. Allerdings messen viele Experimente bei Kernreaktoren insgesamt etwa 6% weniger Neutrinos als erwartet. Das STEREO-Experiment versucht herauszufinden, ob sogenannte sterile, also nicht wechselwirkende, Neutrinos für diese Reaktor-neutrino-Anomalie verantwortlich sind. Der mehrteilige Detektor misst mit seinem flüssigen Gadolinium-haltigen Szintillator Elektron-Antineutrinos. Eine Umwandlung in sterile Neutrinos würde sich in deren Energiespektren zeigen.

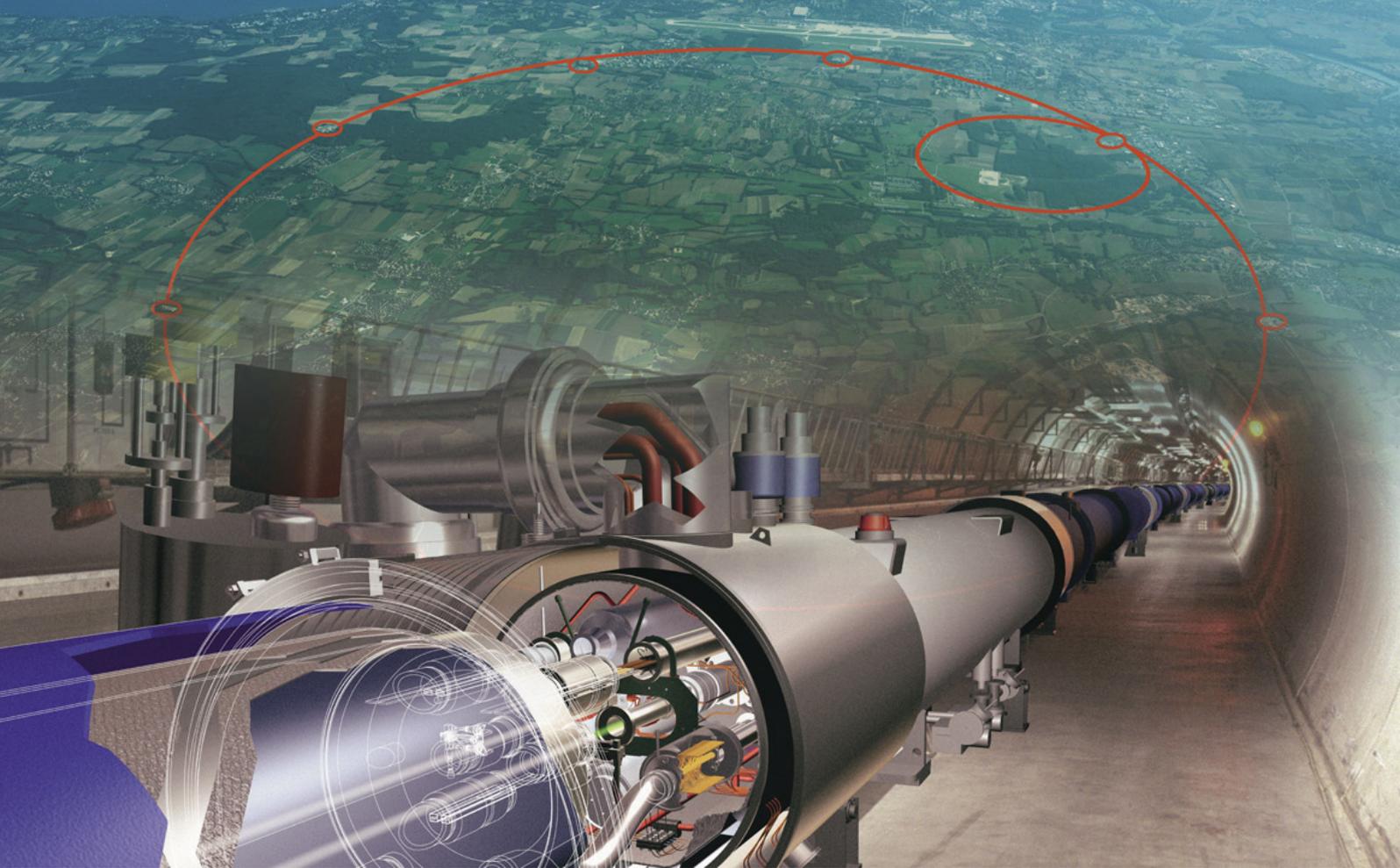
Reaktor-neutrinos nutzt auch das CONUS-Experiment, das die kohärente Neutrino-Kern-Streuung, also die Streuung von Neutrinos am Kern als Ganzem, erforscht. Hochreine Germaniumdetektoren mit niedriger Energieschwelle registrieren den winzigen Energieübertrag bei diesem Streuprozess, der aber erheblich wahrscheinlicher ist als die Wechselwirkung von Neutrinos mit Elektronen.



*Die Germaniumdetektoren von GERDA in ihrer Abschirmung.*



*Schichten von Blei und Polyethylen schirmen die gekühlten Germaniumdetektoren von CONUS gegen Radioaktivität ab.*



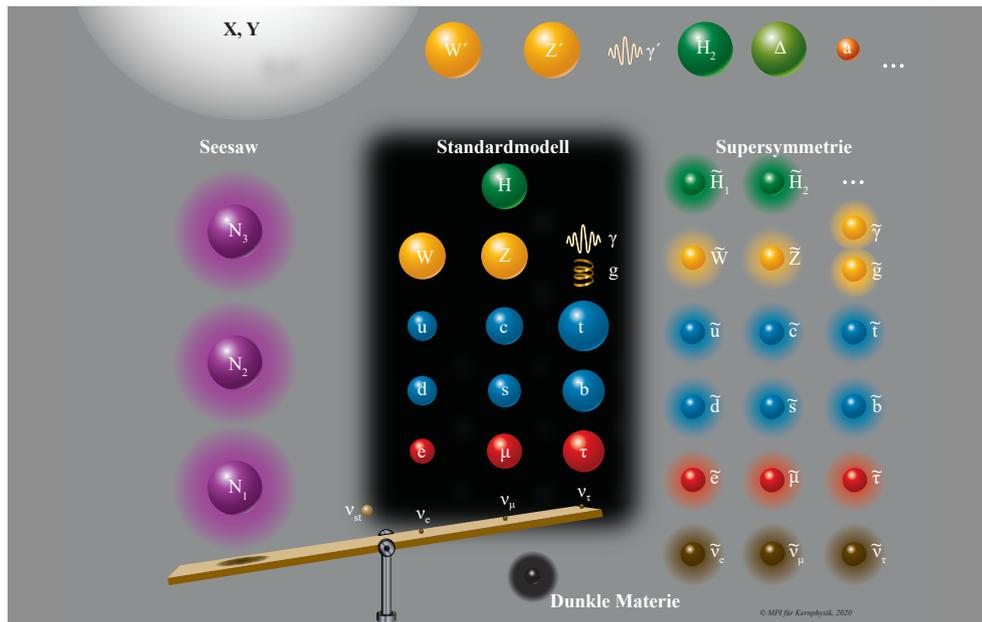
# DIE SUCHE NACH NEUER PHYSIK

Ein Upgrade des LHC könnte Physik jenseits des Standardmodells finden (Bild: CERN).

**Wie muss das Standardmodell der Elementarteilchenphysik erweitert werden?  
Warum gibt es im Kosmos praktisch keine Antimaterie?  
Wie lassen sich die fundamentalen Naturkräfte vereinheitlichen?**

## Der Ursprung von Masse – Physik jenseits des Standardmodells

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik beschreibt erfolgreich das Verhalten aller bekannten Elementarteilchen (und ihrer Antiteilchen): je 6 Quarks und Leptonen, außerdem Eichbosonen, die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen vermitteln, und das Higgs-Boson. Dessen Entdeckung 2012 warf eine Reihe fundamentaler Fragen auf, mit denen sich Theoretiker am MPIK beschäftigen.



Elementarteilchen des Standardmodells (schwarz unterlegt) und hypothetische Teilchen.

Sowohl Dunkle Materie und der Beweis endlicher Neutrinomassen als auch theoretische Unzulänglichkeiten verlangen eine Erweiterung des Standardmodells, das nur bis zu einer bestimmten Energie gültig zu sein scheint, ab der „neue Physik“ ins Spiel kommt. Im Kontext derzeitiger und zukünftiger Experimente der Teilchenphysik sowie der Kosmologie studieren Theoretiker des MPIK Supersymmetrie und die Große Vereinheitlichte Theorie als erfolversprechende Erweiterungen des Standardmodells.

Grundlegende theoretische und phänomenologische Studien dienen der Erforschung des Ursprungs von Neutrinomassen und -mischungen. Dass Neutrinos so leicht sind, erklärt der „Seesaw“-Mechanismus anhand neuer schwerer Teilchen, die in der Tat von vielen Theorien jenseits des Standardmodells vorhergesagt werden. Möglicherweise haben Neutrinomasse und Dunkle Materie denselben Ursprung. Gesamtziel der theoretischen Arbeiten ist ein tieferes Verständnis der fundamentalen Naturgesetze.

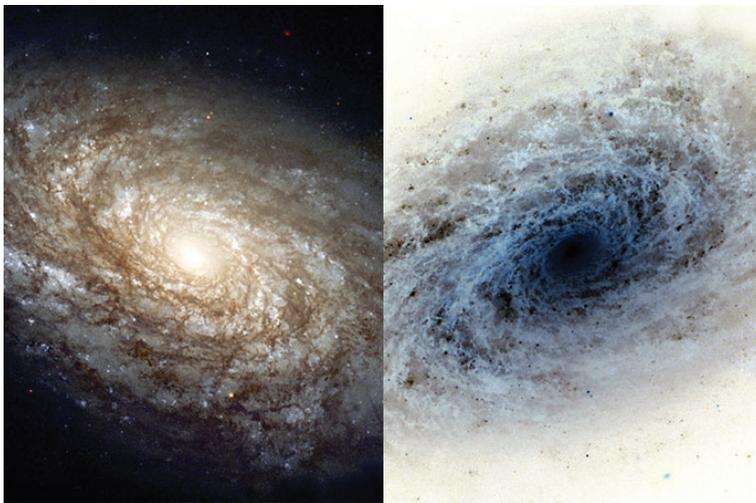
### Materie und Antimaterie – Suche nach dem entscheidenden Unterschied

Es gibt keine Hinweise, dass irgendwo im sichtbaren Universum nennenswerte Mengen Antimaterie existieren. Weil im Urknall gleich viele Teilchen und Antiteilchen entstanden sein müssen, muss es einen grundlegenden Unterschied zwischen ihnen geben. Sonst hätten sie sich komplett vernichtet, und das Universum bestünde aus reiner Strahlung.

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik kann den beobachteten Materieüberschuss im Universum nicht erklären. Diese Symmetrieverletzung muss im frühen Universum passiert sein. Ein Szenario, in dem Neutrinos die entscheidende Rolle spielen, ist die sogenannte Leptogenese, die Theoretiker am MPIK untersuchen. Die Asymmetrie bei leichten Teilchen führt dann zur beobachteten Asymmetrie bei schweren Teilchen.

Das LHCb-Experiment am Large Hadron Collider (LHC) des CERN sucht nach Materie/Antimaterie-Unterschieden. Bei Proton-Proton-Kollisionen entstehen – neben vielen anderen Teilchen – sogenannte B-Mesonen, schwere Teilchen, die aus je einem leichten Quark und schweren Antiquark bestehen; bei ihren Antiteilchen ist es umgekehrt. Messungen ihrer Zerfälle, die zu gleichen Anteilen von Materie und Antimaterie führen, zeigen, dass hierbei die Antimaterie schneller verschwindet – allerdings im Rahmen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik.

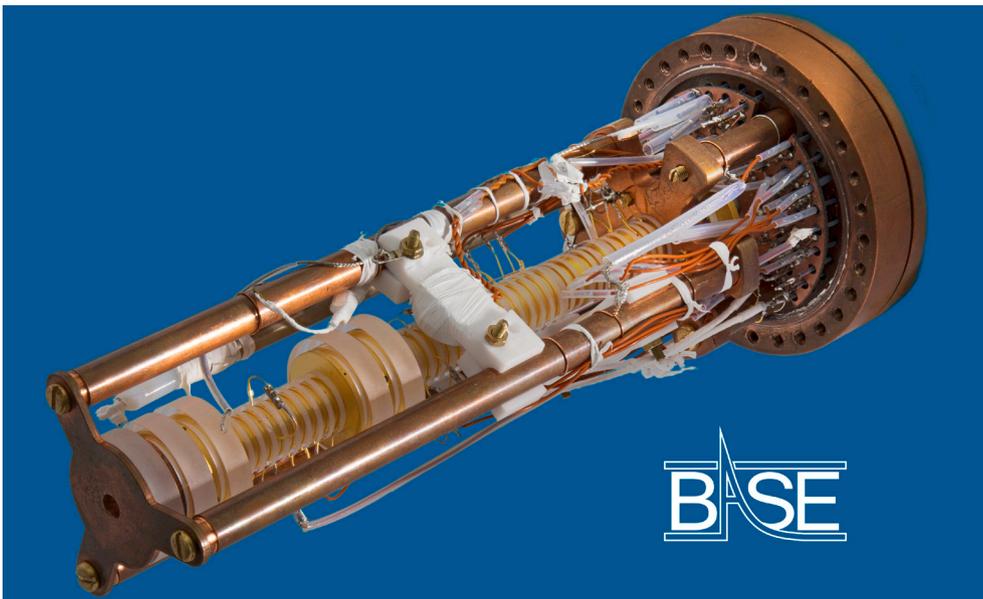
Messungen sowohl der Massen als auch der magnetischen Momente von Antiproton und Proton in Penningfallen ergaben bisher trotz höchster Präzision keinerlei Unterschiede. Fortschritte in der Messtechnik könnten das Rätsel aber doch noch lösen.



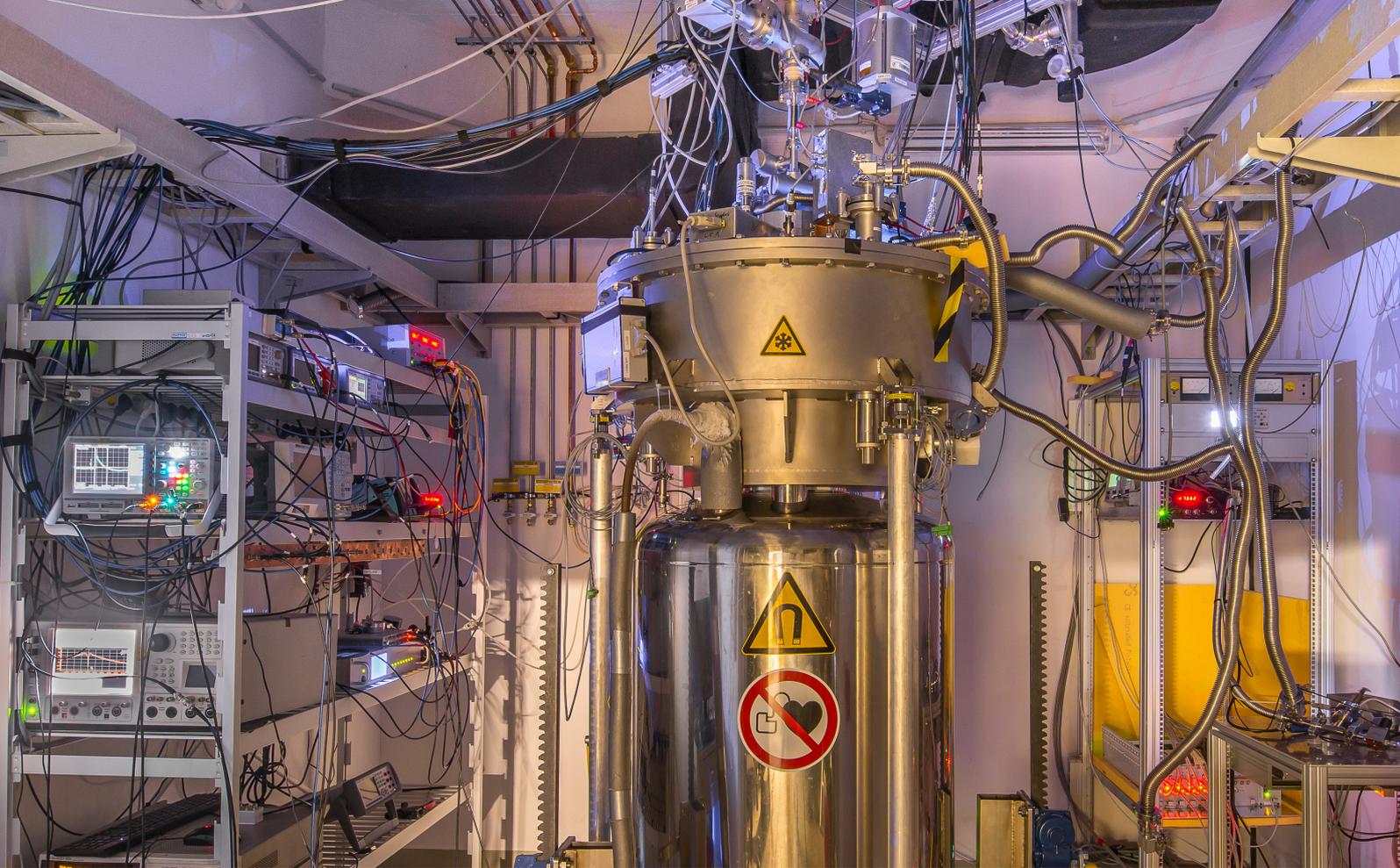
*Trotz intensiver Suche haben astronomische Beobachtungen keinerlei Hinweis auf die Existenz von Antigalaxien geliefert. Foto links: Hubble Space Telescope*



Der LHCb-Detektor hat mit rund 20 m Länge und 10 m Höhe die Ausmaße eines Einfamilienhauses.



Das filigrane Penningfallensystem zur Messung des magnetischen Moments des Antiprotons hat eine Länge von ca. 15 cm.



# HÖCHSTE PRÄZISION

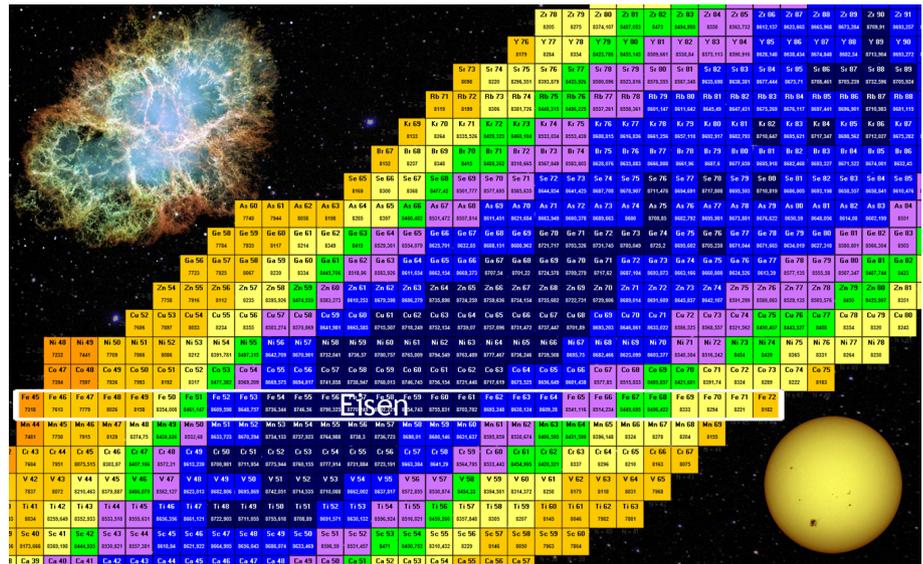
**Was können wir aus der exakten Masse von Kernen lernen?  
Welche Eigenschaften haben hochgeladene Ionen?  
Sind Naturkonstanten wirklich konstant?**

**Kerne – von den Bausteinen der Materie zur Entstehung der Elemente**

Eine möglichst exakte Kenntnis der Eigenschaften von Atomkernen ist für die physikalische Grundlagenforschung von großer Bedeutung. Kürzlich gelangen am MPIK die weltweit genauesten Messungen der atomaren Massen des Elektrons und des Protons, also des einfachsten Atomkerns, mittels Massenspektrometrie in Penningfallen. Die Masse des Protons erwies sich als kleiner als der bisher akzeptierte Wert. Dies trägt dazu bei, Unstimmigkeiten bei den Massen leichter Kerne zu verstehen.

Die chemische Zusammensetzung unseres Universums weist überraschende Besonderheiten auf: Die Sonne besteht hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium; Eisen ist auf der Erde viel häufiger als schwere Elemente wie Gold. Die Nukleosynthese durch Fusions- und Einfangprozesse folgt Reaktionswegen, die teils noch unverstanden sind. Während Kernfusion bis zum Eisen führt, entstehen schwerere Elemente durch Einfang von Protonen oder Neutronen unter extremen Bedingungen wie in Supernovaexplosionen oder in Akkretionsscheiben um Schwarze Löcher oder Neutronensterne.

Basierend auf Einsteins Prinzip der Masse-Energie-Äquivalenz kann man



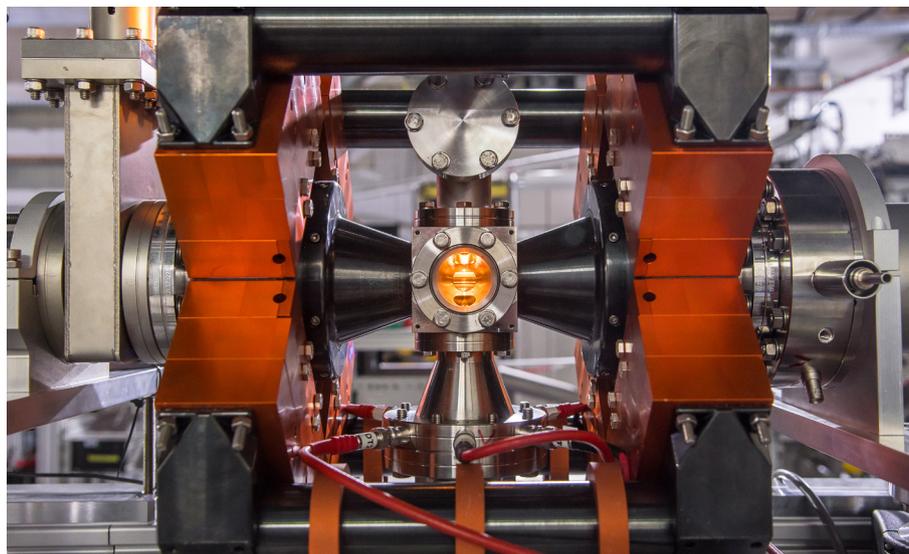
Der Farbcode der Nuklidkarte zeigt die Bindungsenergie pro Nukleon: die stabilsten Nuklide rund um Eisen sind dunkelblau dargestellt.

mittels hochpräziser Massenmessungen Bindungsenergien von Nukliden bestimmen, die für Reaktionswege der Nukleosynthese entscheidend sind. Massenbestimmungen dieser meist kurzlebigen exotischen, (z. B. neutronenreichen) Kerne dienen der Erkundung der „Terra incognita“ der Nuklidkarte. Dies hilft herauszufinden, wie viele Nuklide es insgesamt gibt. Wissenschaftler des MPIK erforschen die Struktur von Kernen fernab der Stabilität in Kombination mit theoretischen Modellen.

### ***Ionenfallen***

Durch die Überlagerung elektrischer und magnetischer Felder in extremem Vakuum gelingt es, Ionen in Fallen zu fangen. In einer Penningfalle lässt sich ein einzelnes Ion speichern, das darin eine charakteristische oszillierende Kreisbewegung ausführt. Ionenmasse und weitere Eigenschaften wie das magnetische Moment des gebundenen Elektrons in hochgeladenen Ionen folgen aus der Umlauffrequenz, sofern Ladungszustand und Magnetfeldstärke bekannt sind, selbst bei nur Millisekunden lebenden exotischen Teilchen. Penningfallen-Massenspektrometer sind am MPIK und extern im Einsatz, z. B. bei der GSI und am CERN, wo exotische Nuklide oder Antiprotonen zur Verfügung stehen.

In einer Elektronenstrahl-Ionenfalle (EBIT) werden durch Beschuss mit energiereichen Elektronen hochgeladene Ionen (HCIs) erzeugt, eingefangen und elektronisch auf mehrere Millionen Grad aufgeheizt, also atomare Materie unter extremen Bedingungen produziert. Präzise spektroskopische Instrumente dienen dazu, diese zu untersuchen. Sowohl stationäre als auch mobile EBITs stehen dafür zur Verfü-



*Eine neu entwickelte Miniatur-EBIT.*

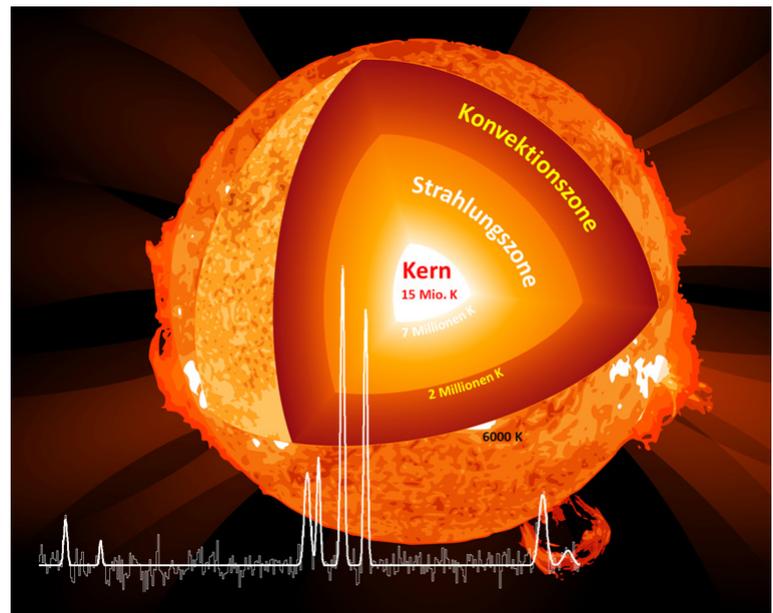
gung. Die Entwicklung von EBITs gipfelt u. a. in der Tip-EBIT am PENTATRAP-Experiment, die Laser-Desorption und anschließende Ionisation kombiniert. Das erweitert den Bereich verfügbarer HCIs auf seltene Isotope, die nur in winzigen Mengen synthetisiert werden. MPIK-Wissenschaftler haben in Kooperation mit der Universität Aarhus eine neue kryogene Ionenfalle (Cryogenic Paul Trap Experiment: CryPTEx) aufgebaut, in der es möglich ist, durch Laserkühlung Ionenkristalle zu erzeugen und darin hochgeladene Ionen zu kühlen.

## Hochgeladene Ionen – Materie unter extremen Bedingungen

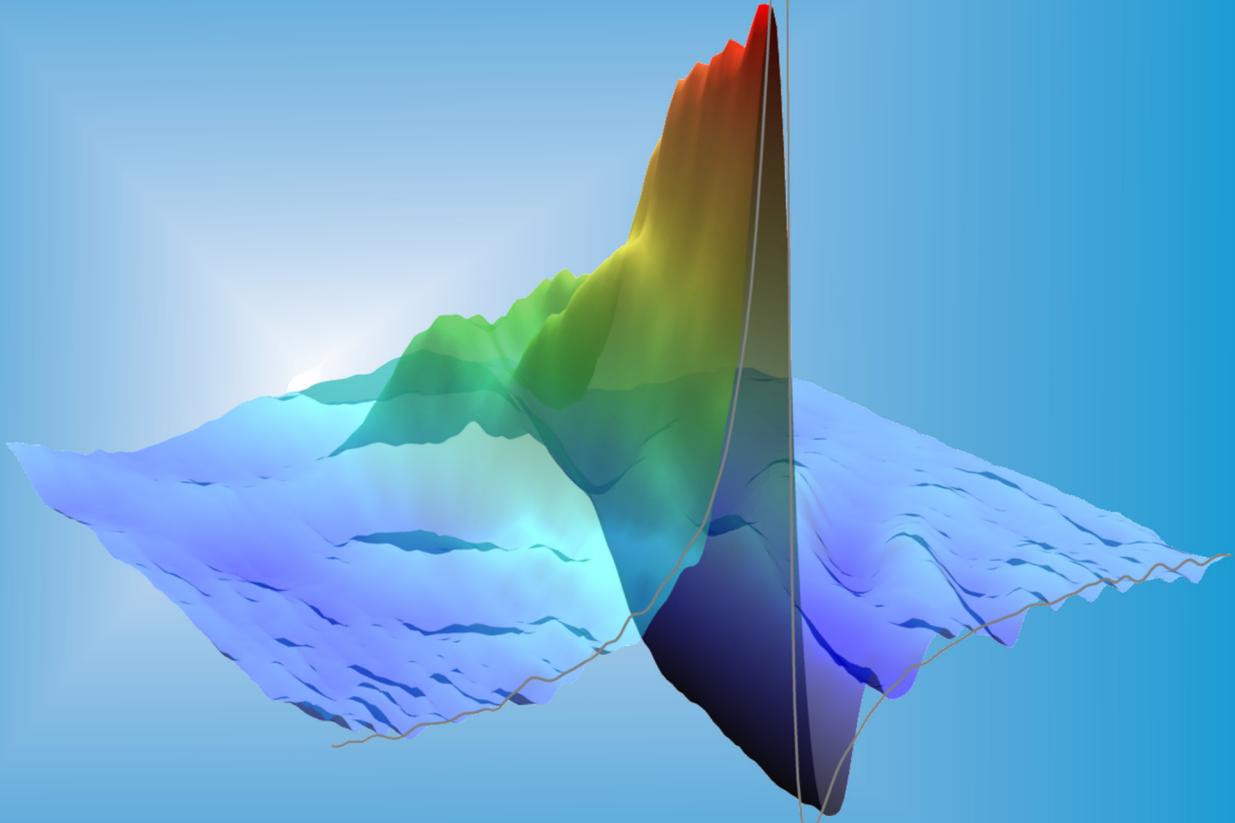
Hochgeladene Ionen (HCIs) finden sich in mehr als eine Million Grad heißen Umgebungen wie Atmosphären und Kernen von Sternen, Supernovaüberresten, Akkretionsscheiben um Neutronensterne oder Schwarze Löcher. Man geht davon aus, dass die meiste sichtbare Materie im Universum hoch ionisiert ist. Die Analyse des beobachteten Lichts (sichtbar, UV, Röntgen) von diesen Ionen erfordert theoretische Unterstützung durch Strukturberechnungen, die jedoch oft nicht genau genug sind, um z. B. die Temperatur des heißen Mediums zu bestimmen. Hochpräzisions-Spektroskopie an kontrolliert erzeugten hochgeladenen Ionen in einer EBIT liefert direkte experimentelle Informationen. Ein Beispiel ist die Untersuchung der Röntgenabsorption von hochgeladenen Eisen-Ionen am Synchrotron PETRA III (DESY), die wichtige neue Erkenntnisse für den Strahlungstransport in Sternen lieferte.

Die kryogene Ionenfalle CryPTEx erlaubt die effiziente Kühlung gefangener hochgeladener Ionen für hochpräzise Laserspektroskopie. Gemeinsam mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (Braunschweig) trägt das MPIK zur Entwicklung neuer optischer Uhren mittels Quantenlogik-Spektroskopie bei und hat einen Frequenzkamm für UV- und fernes UV-Licht gebaut. Das Fernziel ist ein Test der Zeitabhängigkeit von Naturkonstanten.

Zu den ersten Ergebnissen des PENTATRAP-Experiments gehörte kürzlich die erstmalige Entdeckung langlebiger metastabiler angeregter Zustände in hochgeladenen Schwermetall-Ionen. Diese Technik könnte die Methode der Wahl werden, um für HCI-Uhren geeignete metastabile Elektronenkonfigurationen zu suchen. Das ebenfalls neue ALPHA-TRAP-Experiment ermöglicht die Messung der magnetischen Eigenschaften (Grundzustands-g-Faktor) hochgeladener Ionen mit relativen Unsicherheiten im Bereich von  $10^{-9}$ . Die ersten Ergebnisse stimmen hervorragend mit neuesten QED-Berechnungen überein.



*Spektrum von Eisen-Ionen, die den Strahlungstransport in der Sonne bestimmen.*



# SCHNELLSTE BEWEGUNGEN BEOBACHTEN

Das Entstehen einer spektralen Absorptionslinie  
(Fano-Profil).

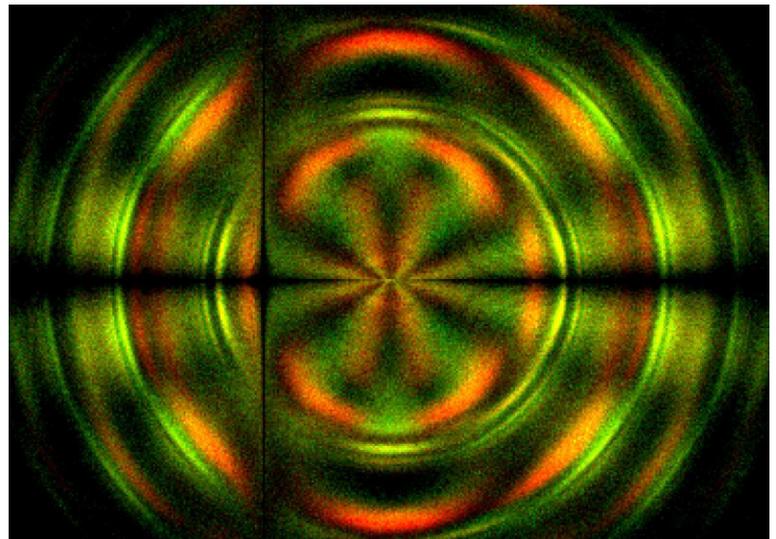
**Welche Rolle spielt die Zeit in Quantensystemen?  
Wie kann man chemische Reaktionen mit dem Laser steuern?  
Wie bilden sich Moleküle im Weltraum?**

### Ultrakurze Laserblitze – der Mikrokosmos in extremer Zeitlupe

Wie entwickelt sich ein Quantensystem in der Zeit und können wir diese Bewegung sichtbar machen oder gar kontrollieren? Dieser alte Wunschtraum der Physiker seit den Anfängen der Quantenmechanik ist heute ein reales und wachsendes Forschungsgebiet. Die Zeitskalen für die hier ablaufenden Vorgänge sind extrem kurz: In chemischen Reaktionen verlagern sich Atome innerhalb von 10 bis einigen 100 Femtosekunden ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ); noch schneller sind die Elektronen, welche die chemische Bindung vermitteln: hier sind Attosekunden ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ) das charakteristische Zeitmaß.

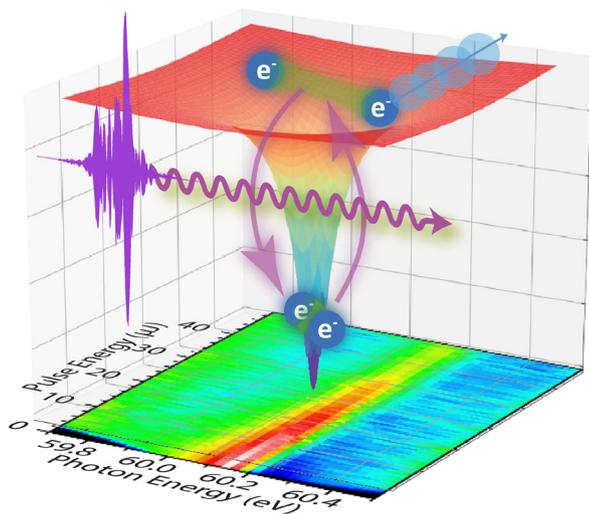
Zeitaufgelöste Experimente beruhen auf ultrakurzen Laserpulsen, mit denen man die atomare oder molekulare Dynamik extrem präzise steuern kann. Elektronen werden durch ein starkes Laserfeld von einem Atom getrennt und hin- und hergetrieben, kehren zu ihm zurück und sondieren dabei seine Struktur. Die Wellennatur des Elektrons erzeugt Interferenzeffekte wie in einem Hologramm, woraus sich die zeitabhängige Wechselwirkung mit den restlichen Elektronen des Atoms ergibt.

Mit einer „Pump-Probe“-Anordnung lassen sich Molekülbewegungen wie Schwingung und Rotation verfolgen: der erste „Pump“-Laserpuls präpariert das System in der gewünschten Weise und startet die zeitliche Entwicklung, die dann der zweite Laserpuls abtastet. Die Beobachtung chemischer Reaktionen in Echtzeit mit Femtosekunden-Auflösung ist ein vielversprechendes Forschungsgebiet. In Kombination mit Reaktionsmikroskopen gelingt es, die extrem



Mit einem Reaktionsmikroskop aufgenommenes Bild von Wellenpaketen eines Elektrons, während es ein Atom verlässt.

## Schnellste Bewegungen beobachten



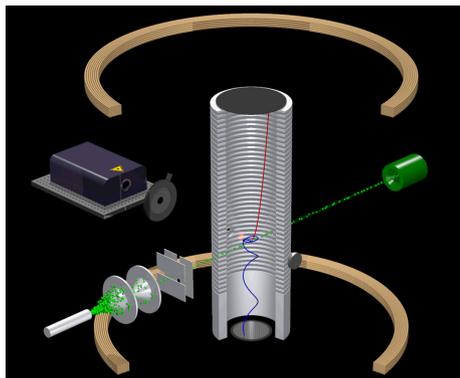
Schematische Darstellung der gekoppelten Anregung eines Elektronenpaares (blau) im Heliumatom durch einen intensiven ultrakurzen XUV-Laserpuls (violett).

kurze Zeitspanne zu bestimmen, in der sich Atome innerhalb eines Moleküls umlagern.

Die Beobachtung der Elektronenbewegung benötigt noch kürzere Lichtblitze in der Größenordnung von Attosekunden. Eine Möglichkeit ist die Erzeugung hoher Harmonischer der Wellenlänge eines Femtosekunden-Lasers. Damit erreicht man heute die geforderten Pulsdauern von unter 100 as in einem Wellenlängenbereich von wenigen 10 nm. Einen Prototyp für die korrelierte Bewegung von Elektronen stellt das Helium-Atom dar. Durch Beschuss mit Ultraviolett-Attosekunden-Pulsen lassen sich beide Elektronen gleichzeitig anregen. Das so präparierte Zwei-Elektronen-Wellenpaket lässt sich mit einem weiteren Femtosekunden-Laserpuls zeitabhängig abtasten und rechnerisch anhand bekannter statischer Wellenfunktionen rekonstruieren. Die Laserpulse können den elektronischen „Paartanz“ sogar steuern. Eine gezielte Manipulation der Elektronenpaare in Molekülen könnte eines Tages die Chemie beeinflussen und bisher unmögliche Synthesen ermöglichen.

Spektroskopie – die Messung von Absorption oder Emission von Licht, das mit Materie wechselwirkt – ist eines der wichtigsten Werkzeuge der Physik. Bei resonanter Wechselwirkung entstehen Linienspektren. Unter bestimmten Bedingungen interferieren diese mit einem kontinuierlichen Hintergrund, sodass asymmetrische Linienformen auftauchen („Fano-Profil“). Dies entspricht der Überlagerung gekoppelter Schwingungen. Mit ultrakurzen Laserpulsen kann man die zeitliche Entwicklung und damit die Quanteninterferenz kontrollieren, um z. B. eine spektrale Absorptions- in eine Emissionslinie umzuwandeln und die ultraschnelle Bildung einer Fano-Resonanz auf der Femtosekunden-Zeitskala aufzulösen.

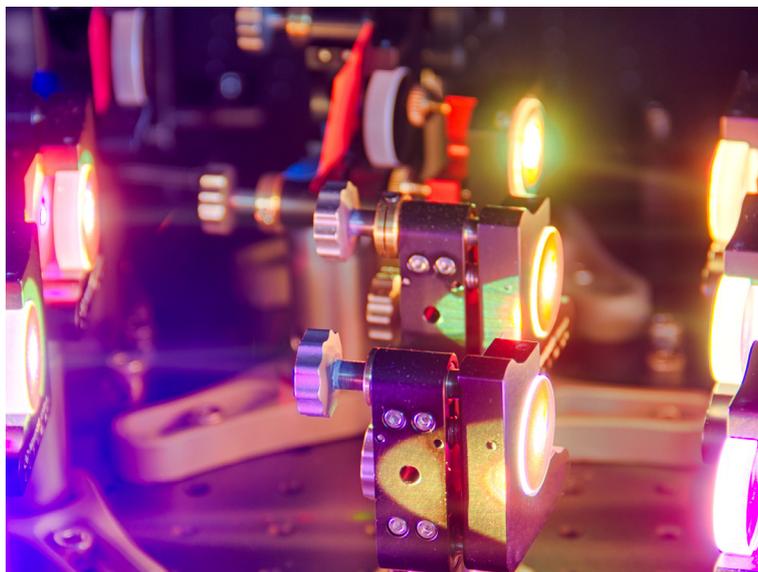
## Reaktionsmikroskope und Lasersysteme



Schema eines Reaktionsmikroskops.

Reaktionsmikroskope – die „Blasenkamern der Atom- und Molekülphysik“ – wurden am MPIK entwickelt und werden ständig weiter verbessert. Ultrastarke Laserpulse oder ein Teilchenstrahl zerbrechen einfache Moleküle. Elektrische und magnetische Felder fangen die Fragment-Ionen und Elektronen ein, und großflächige zeit- und ortsempfindliche Detektoren registrieren sie. Aus den rekonstruierten Flugbahnen der Fragmente lassen sich ihre vollständigen Impulsvektoren ableiten und so auf Geometrie und Dynamik der Moleküle vor deren Zerbrechen schließen („kinematisch vollständige Experimente“). Verschiedene Reaktionsmikroskope sind im Haus und am Freie-Elektronen-Laser FLASH in Hamburg aufgebaut. Für den ultrakalten Speicherring CSR ist derzeit ein spezielles Reaktionsmikroskop in Bau. Es wird eine Schlüsselrolle spielen für die weltweit einzigartigen Möglichkeiten der Untersuchung von langsamen und kalten Ionen im CSR.

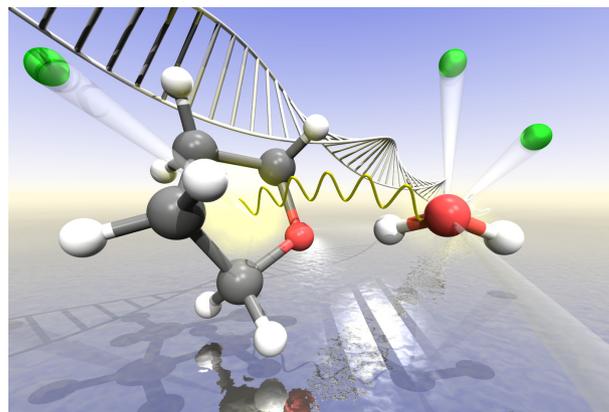
In den Laserlaboren des Instituts stehen phasenkontrollierte Laserpulse von 5 Femtosekunden Dauer und Intensitäten bis zu  $10^{16} \text{W/cm}^2$  für Experimente zur Verfügung. Zur Erzeugung noch kürzerer Pulse von einigen Attosekunden Dauer kommen spezielle nichtlineare optische Methoden zum Einsatz. Die hohe harmonische, kohärente Strahlung im extremen UV-Bereich wird mit den breitbandigen Infrarot-Pulsen eines Ti:Saphir-Lasers kombiniert eingesetzt. Um gasförmige Proben interferometrisch zu untersuchen, lassen sich einzelne und auch doppelte und dreifache Attosekundenpulse erzeugen. Für Pump-Probe-Messungen kann die Zeitverzögerung zwischen zwei Pulsen auf die Attosekunde exakt eingestellt werden. In Kombination mit Spektroskopie oder abbildenden Detektoren ist es so möglich, die Quantenbewegungen von Kernen und Elektronen bei chemischen Reaktionen direkt und zeitaufgelöst zu beobachten und auch zu kontrollieren.



„Chirped mirror“-Anordnung zur Erzeugung ultrakurzer Laserpulse.

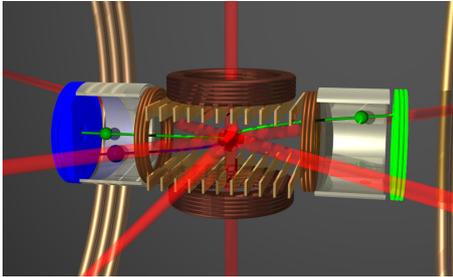
## Atome und Moleküle in Kollision – Billardspiel mit Quantenkugeln

Korrelierte Quantendynamik ist aktuell eine der großen Herausforderungen für die Forschung. Wissenschaftler am MPIK erforschen hierzu die grundlegenden Prinzipien, ausgehend von einer begrenzten Anzahl weniger wechselwirkender Teilchen in Atomen und Molekülen bis hin zu komplexeren Systemen wie Clustern oder sogar Biomolekülen. Der Beschuss mit geladenen Teilchen (Elektronen, Ionen) eröffnet einen Zugang zu diesen Quantensystemen. Am MPIK entwickelte neuartige multi-koinzidente Abbildungstechniken liefern umfassende Informationen zur Mehrteilchendynamik und erlauben einen Test der Theorien für derartige Reaktionen. Elektronenstöße spielen eine wichtige Rolle in der Umwelt, z. B. in der oberen Atmosphäre und im interstellaren Raum, wie auch in technischen Plasmen und in der Strahlenbiologie. Im Stoß kann ein Molekül in mehrere Bruchstücke zerbrechen; dies spielt in biologischem Gewebe eine entscheidende Rolle, da beispielsweise das DNS-Molekül verändert oder zerstört werden kann.



Strahlenschaden an DNS in Wasser durch Energieübertragung nach Elektronenstoß.

## Ultrakalte Dynamik – exotische Quantengase erforschen



Schema der mit einem Reaktionsmikroskop gekoppelten magneto-optischen Falle.

Durch Laserkühlung kann man sehr kalte atomare Gase mit Quanteneigenschaften erzeugen. Lithiumatome verhalten sich, je nachdem wie ihre gegenseitige Wechselwirkung gewählt wird, als Bosonen oder als Fermionen. Im bosonischen Regime bilden sich schwach gebundene Atumpaare, deren gegenseitiger Abstand experimentell kontrollierbar ist. Mit einem Reaktionsmikroskop kann man diese exotische Materieform untersuchen. Durch Ionisation aller Atome in gebunden Paaren oder Mehrteilchensystemen und die Bestimmung aller Ionenimpulse lässt sich auf die anfängliche räumliche Konfiguration der Teilchen schließen. Die Ionisation erfolgt dabei praktisch instantan durch einen intensiven Femtosekunden-gepulsten Laserstrahl. Interessant ist auch, ob und wie der Quantenzustand des Gases die Ionisationsdynamik beeinflusst.

## Der ultrakalte Speicherring

Im weltweit einmaligen ultrakalten Speicherring CSR des MPIK ist es möglich, kalte Molekülonen jeglicher Größe und hochgeladene Ionen fast völlig ohne Einfluss der Umgebung zu untersuchen. Das wird durch eine rein elektrostatische Ionenoptik,



Der ultrakalte Speicherring hat einen Umfang von 35 m. Die gesamte Ionenoptik befindet sich innerhalb der Isoliervakuumkammern. In der Ecke rechts vorne werden die Ionen und gegebenenfalls die neutralen Atome eingeschossen, im hinteren Abschnitt ist der Elektronenkühler eingebaut, und links befindet sich die Flüssig-Helium-Kälteanlage.

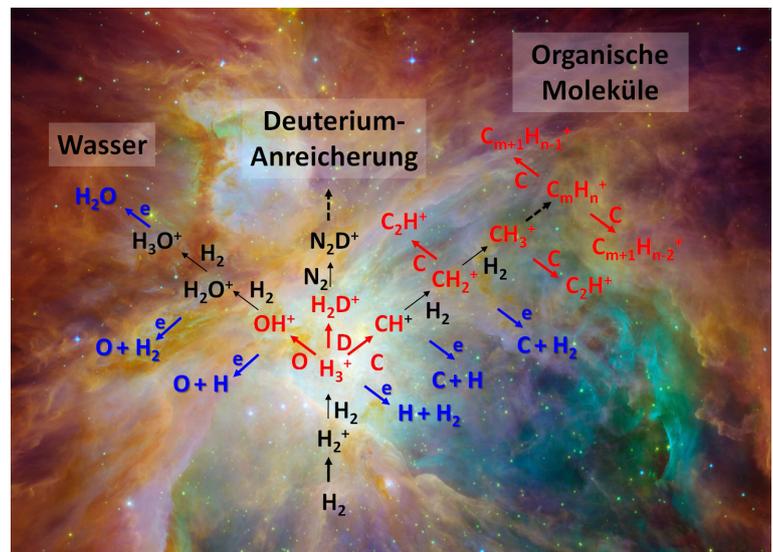
extrem niedrigen Druck und eine Temperatur von wenigen Grad über dem absoluten Nullpunkt erreicht. Spezielle Ionenquellen erzeugen die Ionen und speisen sie mit bis zu 300 kV Hochspannung in den Ring ein. Außerdem ist der CSR mit einer Apparatur zum Einschleusen von neutralen Atomstrahlen gekoppelt. Ein Elektronenkühler komprimiert den gespeicherten Ionenstrahl, und die Elektronen stehen als Reaktionspartner zur Verfügung. Empfindliche Teilchendetektoren in den Ecken weisen auch neutrale Reaktionsprodukte nach. Für spektroskopische Messungen können Laserstrahlen mit dem gespeicherten Ionenstrahl gekreuzt werden. In enger Zusammenarbeit haben Physiker, Konstrukteure und Feinmechaniker des MPIK das innovative mechanische Konzept entwickelt und realisiert.

## Laborastrophysik – Chemie des Weltraums

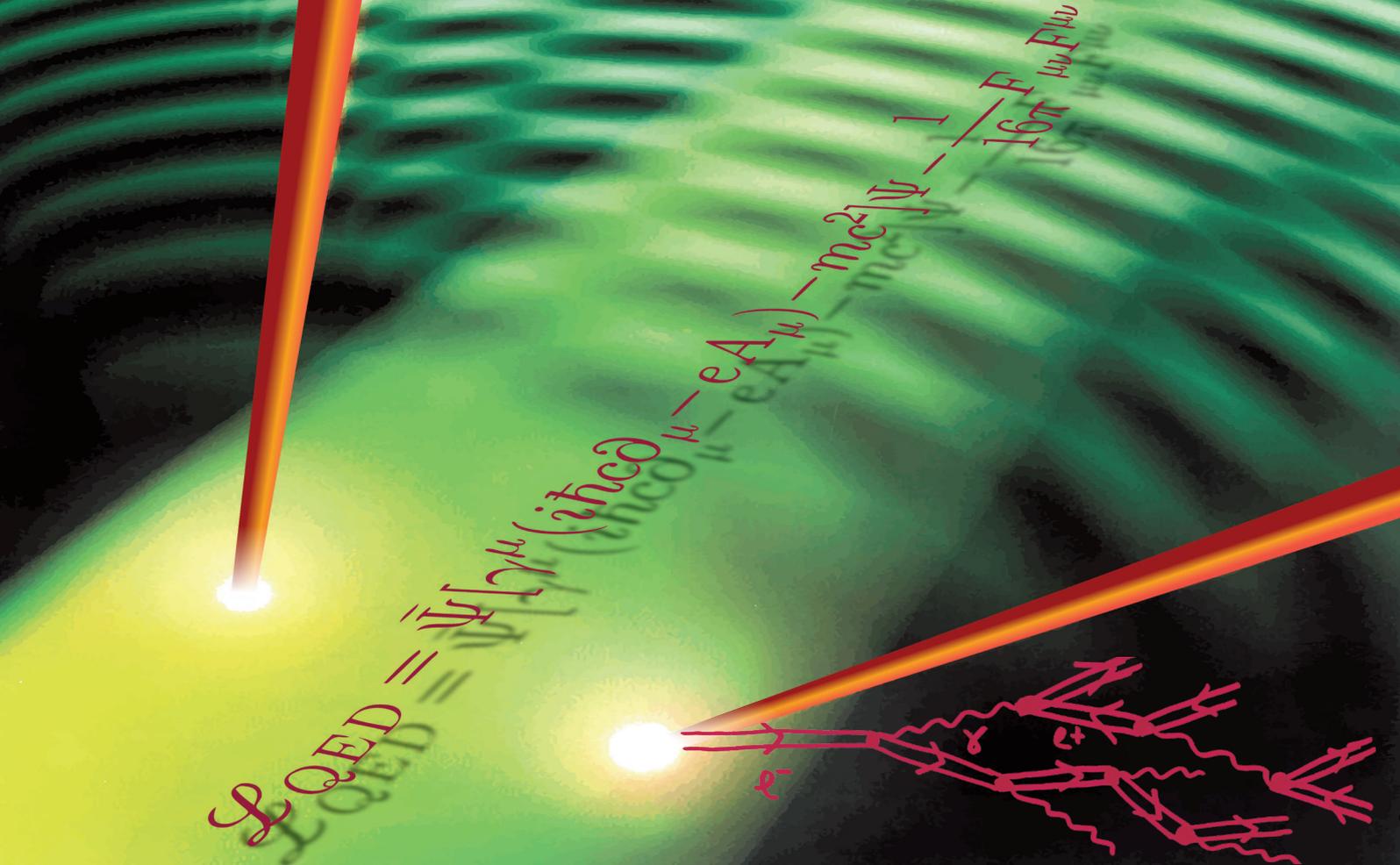
Die Chemie des interstellaren Raums ist eines der aktivsten Forschungsfelder der Astronomie. Moderne Teleskope haben eine Vielfalt komplexer Moleküle in interstellaren Nebeln und protoplanetaren Scheiben entdeckt. Die Prozesse, die – oft mit Hilfe von Ionen – zur Entstehung großer organischer Moleküle unter den extremen Bedingungen des kalten Weltraums führen, werfen allerdings immer noch Rätsel auf. Zudem wird vermutet, dass die Entstehung des Lebens auf der Erde eng verknüpft ist mit der Bildung biologisch relevanter Moleküle im Weltraum. Die Suche nach interstellarem Wasser und präbiotischen Verbindungen ist daher das Ziel großer internationaler Projekte.

Diese Gasphasen-Chemie basiert auf Ionen und Radikalen, die in Stößen mit Photonen und kalten Elektronen entstehen. Dabei spielt das  $\text{H}_3^+$ -Molekülion eine Schlüsselrolle. Den Aufbruch von Molekülen nach Einfangen eines Elektrons („dissoziative Rekombination“) kann man in Speicherringen gezielt untersuchen. Im ultrakalten Speicherring CSR sind Bedingungen erreichbar, die interstellaren Temperaturen entsprechen und auch die Rotation von Molekülionen quasi einfrieren lassen.

Die Größe der interessanten positiven Ionen reicht von kleinen Atomen und Molekülen bis zu organischen Verbindungen. Negativ geladene Ionen (Anionen) sind ebenfalls interessant, weil sie als wichtige Quelle langsamer Elektronen fungieren, indem sie bei entsprechender innerer Anregung (Schwingung) Elektronen regelrecht „abdampfen“ können. Kollisionen mit neutralen Atomen und Molekülen sind gleichfalls von großer Bedeutung für die Astrochemie. Eine Kollisionsstrecke für Neutralstrahlen im CSR, wo Atome im Grundzustand mit kalten Molekülionen reagieren, gibt erstmals Zugang zu dieser noch weitgehend unerforschten Klasse von Prozessen unter echten Weltraumbedingungen.



Das Netzwerk der kosmischen Chemie in interstellaren Wolken.



# DIE EXTREME ERKUNDEN

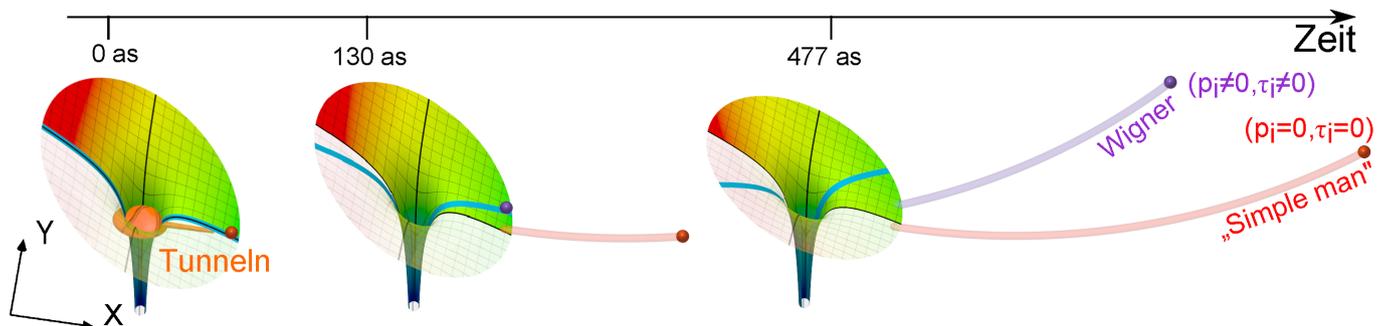
Der Quantenelektrodynamik zufolge ändern sich die Eigenschaften von Materie und selbst des Vakuums in starken Laserfeldern.

**Wie wechselwirkt Materie mit intensivem Laserlicht?  
Wie wirken sehr starke Felder auf das Vakuum?  
Lassen sich extreme kosmische Prozesse im Labor nachbilden?**

## Materie in starken Laserfeldern – an den Grenzen des Machbaren

Die Erforschung der Wechselwirkung von Materie mit Laserpulsen oder Röntgenstrahlen ist so weit fortgeschritten, dass grundlegende Aspekte wie die Quantennatur von Licht und Materie, Relativität und Kopplungen unter den beteiligten Teilchen in den Fokus rücken und zugleich eine Herausforderung darstellen. Theoretische Untersuchungen helfen, die Effekte extrem starker Felder zu verstehen, auch wenn diese experimentell erst in der nahen Zukunft zugänglich sein werden. Dies erfordert die Suche nach Mehrteilchen-Lösungen der zeitabhängigen Schrödinger- und Dirac-Gleichungen. Außerdem werden Quantenelektrodynamik, Kerneffekte und Paarerzeugung betrachtet.

Ein typisches Thema ist das vollständig relativistische Verständnis der Quantenprozesse bei der Tunnel-Ionisation eines Atoms in ultrastarken Feldern. Ein einfaches Modell geht davon aus, dass das Elektron instantan durch die vom Laser erzeugte Quantenbarriere tunnelt und mit verschwindendem Impuls herauskommt. Folglich würde der gesamte Impuls der absorbierten Photonen auf das Ion übertragen. Mittlerweile haben quanten-re-



Tunnel-Effekt in einem elliptisch polarisierten Laserfeld: Das Elektron tunnelt im überlagerten Atom- und Feldpotential durch die Barriere. Die „simple-man“ (sofort) und Wigner (endliche Zeit) Modelle sagen verschiedene Elektronen-Flugbahnen voraus.

lativistische Rechnungen aber gezeigt, dass dieses Modell zu simpel ist, und sich der Impuls auf das Elektron und das Ion verteilt.

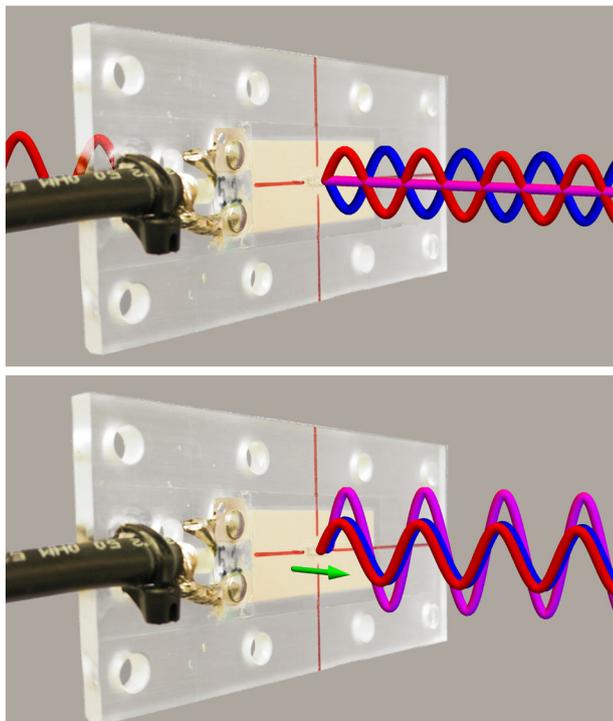
Die Frage, wie lange ein Elektron zum Tunneln braucht, wird kontrovers diskutiert: Braucht es Zeit oder nicht? Theoretische Überlegungen auf Basis eines Konzepts von Nobelpreisträger Eugene Wigner von 1955 sagen eine endliche Tunnelzeit voraus. Kürzlich gelang es in einer theoretisch-experimentellen Arbeit, mit einem verfeinerten Modell die Wigner-Zeit in eine messbare Größe zu übersetzen. Eine genaue Analyse der von ultrakurzen zirkular polarisierten Laserpulsen aus Edelgasen freigesetzten Elektronen lieferte Hinweise auf eine Tunnelzeit von bis zu 180 Attosekunden ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ).

### Extreme Licht-Materie-Wechselwirkung – Kernübergänge präzise kontrollieren und messen

Ein neues Gebiet ist die Quantenoptik mit Röntgenlicht. Von besonderem Interesse sind dabei bestimmte Atomkerne, die nur mit Röntgenlicht extrem scharf definierter Energie wechselwirken, beruhend auf den von Rudolf Mößbauer am Vorgängerinstitut des MPIK 1958 entdeckten Prinzipien (Nobelpreis 1961). Spektroskopie derart präziser Kernübergänge bildet die Grundlage zahlreicher Anwendungen in den Naturwissenschaften. Für zukünftige Anwendungen ist es erforderlich, kohärente Quantenkontrolle dieser Kerne zu erreichen, bleibt aber eine große Herausforderung, weil es an intensiven Röntgenlichtquellen mit schmäler Energieverteilung mangelt.

Eine theoretisch-experimentelle Studie hat kürzlich gezeigt, dass die makroskopische Bewegung einer Probe Photonen innerhalb des Röntgenpulses so verschieben kann, dass sich diese im gewünschten Bereich konzentrieren. Eine nachfolgende Arbeit nutzte derart verbesserte Röntgenpulse, um die Quantendynamik von Materie kohärent zu kontrollieren. Eine parallel dazu entwickelte Theorie für die erste Anwendung der Bewegungskontrolle erlaubt es, Korrelationen zwischen verschiedenen Beobachtungsgrößen eines quantenmechanischen Systems ohne die normalerweise unvermeidbare störende Rückwirkung der Messung auf die Dynamik des Systems zu messen.

Extrem schmale Kernübergänge sind auch für genaue Messungen interessant. Ein herausragendes Beispiel ist die auf  $^{229}\text{Th}$  basierende Kernuhr, mit der die Genauigkeit der besten heute verfügbaren Atomuhren übertroffen werden könnte. Kürzlich konnte ein Team an der LMU München eine bisher unsichere Übergangsenergie mit höherer Präzision messen. Simulationsrechnungen am MPIK waren die Voraussetzung dafür, diese Energie aus den experimentellen Daten ableiten zu können. Nun können geeignete Laser konstruiert werden, was Grundlagenforschung auf Basis extrem präziser Zeitmessungen ermöglichen wird.



*Kontrolle von Röntgenlicht durch mechanische Bewegung eines Targets. Vor der Bewegung löscht das gestreute Licht das Anregungslicht aus. Danach verstärken sich beide.*

## Starkfeld-Quantenelektrodynamik – das Vakuum modifizieren

Die Quantenelektrodynamik (QED) beschreibt Elektromagnetismus als Austausch sogenannter virtueller Photonen zwischen geladenen Teilchen. Aus dieser Theorie folgt, dass es keinen leeren Raum gibt, das Vakuum also von virtuellen Teilchen erfüllt ist. Bedingt durch die Quantenunschärfe existieren sie zwar jeweils nur für sehr kurze Zeitspannen, aber ihre mittlere Anzahl macht sich bemerkbar und ist mit Präzisionsexperimenten nachweisbar.

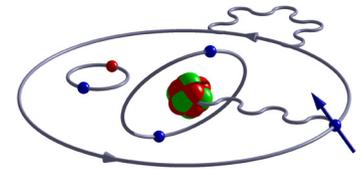
Von besonderem Interesse ist die QED in extrem starken Feldern. Durch ihre Wirkung auf die geladenen virtuellen Teilchen polarisieren diese Felder das Vakuum und ändern so dessen optische Eigenschaften. Die Theorie behandelt fundamentale Fragen der Paarerzeugung, der Spindynamik und der radiativen Reaktion, bei der ein in einem elektromagnetischen Feld beschleunigtes geladenes Teilchen elektromagnetische Strahlung emittiert, die dann auf die Teilchenbewegung zurückwirkt. Die zugrunde liegenden Gleichungen können mit intensiven Laserfeldern getestet werden. Quanteneffekte der radiativen Reaktion von Elektronen sollten mit heutigen Lasersystemen zugänglich sein. Dies hat auch für Vielteilchensysteme wie relativistische Plasmen Bedeutung.

Sehr starke elektrische Felder herrschen auch in der Nähe der Kerne schwerer Elemente. Hochpräzisions-QED-Rechnungen der inneren Struktur von Materie, speziell hochgeladenen Ionen, sind für unser Institut von besonderer Bedeutung. Wichtige Beiträge liefert das Zusammenspiel von Theorie und Experiment zur Ermittlung fundamentaler Eigenschaften wie das magnetische Moment des Elektrons. Vergleiche mit Präzisionsmessungen ermöglichen einerseits, QED-Vorhersagen zu überprüfen, andererseits hilft die Theorie Naturkonstanten wie die Elektronenmasse zu bestimmen: ihr Wert wurde so um eine Größenordnung genauer.

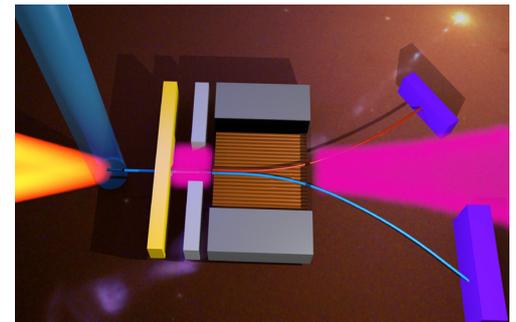
## Laser-Astrophysik – kosmische Beschleuniger im Labormaßstab

Hochintensive Laserpulse erlauben die Beschleunigung von Teilchen bis in die Größenordnung von Gigaelektronvolt ( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ). In Zusammenarbeit mit externen experimentellen Gruppen haben Theoretiker des MPIK Modelle entwickelt für die Produktion von ultrarelativistischen Lepton-Strahlen aus gleichen Anteilen von Elektronen und Positronen durch Umwandlung von Bremsstrahlungsphotonen in Elektron-Positron-Paare. Außerdem demonstrieren jüngste Simulationen Verfahren, polarisierte intensive Lepton- und GeV-Gammastrahlen zu erzeugen. Sie basieren auf der Spin-abhängigen Emission hochenergetischer Photonen in der Kollision polarisierter intensiver Laserstrahlen mit unpolarisierten Elektronenstrahlen, wobei Elektronen und Positronen mit Spin parallel bzw. antiparallel zum Magnetfeld des Lasers entstehen.

Die Erforschung solcher hochenergetischen Prozesse im Labormaßstab ist von erheblicher Bedeutung für die Astrophysik: Beispielsweise entstehen kosmische Gammastrahlenausbrüche in den entlang der Rotationsachse extrem gebündelten ultrarelativistischen leptonischen Jets von bestimmten Typen kollabierender Sterne.



Schema der QED-Beiträge zur elektronischen Struktur hochgeladener Ionen: Die Elektronen (blau) wechselwirken untereinander und mit sich selbst über virtuelle Photonen (Wellenlinien). Teilchen-Antiteilchen-Paare (blau und rot) können im Feld des Kerns entstehen.



Erzeugung ultrarelativistischer Elektron-Positron-Strahlen im Labor durch laserbeschleunigte Elektronen, die auf ein Metall-Target treffen.



# WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER SERVICE

Das Gelände des MPIK von Süden mit Blick auf Heidelberg.

---

## Campus

Der großzügige Instituts-campus ist etwa 200 m über der Stadt im Wald gelegen. Hauptgebäude sind das Walther-Bothe- und das Wolfgang-Gentner-Laboratorium mit Büros und Laboren. Im Zentrum des Campus' befindet sich die Bibliothek mit Hörsaal und Seminarraum, die für kleine Konferenzen geeignet sind. Der Experimentierhallen-Komplex ist das größte Gebäude auf dem Campus; dazu kommen die Werkstattgebäude für Elektronik und Mechanik sowie Gästehäuser und diverse Nebengebäude. Außerdem befindet sich eine Kindertagesstätte auf dem Gelände. Nachbar ist das European Molecular Biology Laboratory (EMBL).

---

## Bibliothek

Die Bestände der Institutsbibliothek umfassen etwa 26 200 Monographien, Buchserien, Konferenzberichte, am Institut entstandene Hochschulschriften und rund 6 200 gebundene Zeitschriftenbände. Über die Max-Planck-Gesellschaft bietet die Bibliothek Zugang zu E-Büchern, Online-Lexika, Datenbanken und mehr als 40 000 E-Journalen. Das MPIK beteiligt sich an den Open-Access-Aktivitäten der MPG. Das Publikations-Managementsystem PuRe bietet die Möglichkeit, Publikationen und ergänzendes Material zu veröffentlichen und individuelle Publikationslisten zu erstellen.



Blick in die Bibliothek des MPIK.

---

## Öffentlichkeitsarbeit

Das Institut legt großen Wert darauf, dass seine Forschungsergebnisse nicht nur der Fachwelt, sondern auch der allgemeinen Öffentlichkeit bekannt werden. Das Team schreibt Presstexte zu ausgewählten Resultaten und verbreitet diese auf der Homepage und über Internetdienste. Ausführliche, stets aktuelle Informationen über die Forschung am Institut sind online und in gedruckter Form verfügbar. Besuchergruppen – Schulklassen, Studierende, aber auch interessierte Laien – sind zu Institutsführungen willkommen; für Schüler gibt es die „Physik am Samstagmorgen“.

---

## Informationstechnologie



Der Serverraum im Keller des Bothelabors.

Die zentralen Computeranlagen bieten Rechenleistung und Speicherplatz. Zur Verarbeitung von Aufträgen stehen ein Linux-Cluster und mehrere spezialisierte Server mit zusammen etwa 6500 Prozessorkernen zur Verfügung. Daten werden auf Festplatten mit insgesamt mehr als 13 Petabyte gespeichert. Für einen schnellen Zugriff ist der meiste Speicherplatz als paralleles Filesystem organisiert. Eine zentrale Magnetbandbibliothek dient der Datensicherung und als Langzeitarchiv. Alle Server und Filesysteme sind über Ethernet-Verbindungen mit bis zu 100 Gigabit an das Netzwerk angeschlossen. Der Cluster wird hauptsächlich für Datenspeicherung, -auswertung und Simulationsrechnungen der Gammaastronomie und für aufwändige Rechnungen in der theoretischen Quantendynamik genutzt. Die IT-Gruppe betreut außerdem Web- und Mailserver sowie die Arbeitsplatzrechner und die Präsentationstechnik in Hörsaal und Seminarräumen.

---

## Elektronik

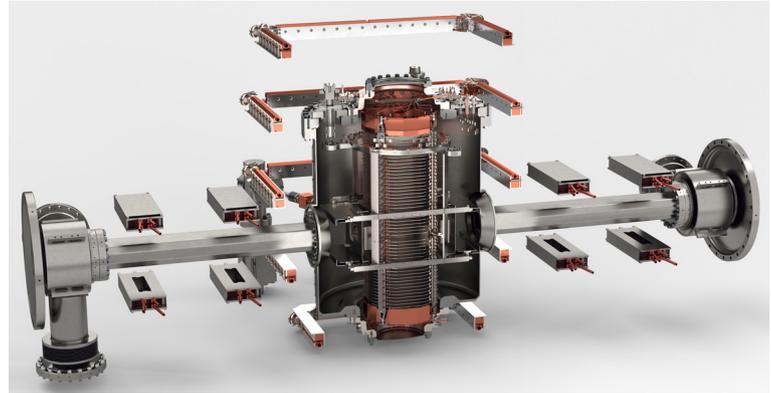
Elektronik zur Experimentsteuerung und Datenerfassung wird im zentralen Elektroniklabor und der Ausbildungswerkstatt entwickelt und gebaut, denn kommerziell erhältliche Geräte erfüllen die experimentellen Anforderungen häufig nicht. Ein neuer Schaltplan wird in das Layout einer Platine übersetzt, die extern gefertigt und vor ihrer Integration in ein Experiment getestet wird. Die Elektroniker verfügen über Spezialkenntnisse auf für das Institut besonders wichtigen Gebieten wie Hochspannungssysteme für Ionenfallen oder schnelle Digitalisierung von Messdaten. Außerdem warten und reparieren sie elektronische Geräte.



Hauptplatine für FlashCam mit FPGA und zwei aufgesteckten Analog/Digital-Konverterplatinen.

## Konstruktion

Im Konstruktionsbüro werden mittels eines 3D-CAD-Systems spezielle Bauteile für wissenschaftliche Experimente konstruiert, die dann in den feinmechanischen Werkstätten gebaut werden. Das CAD-System liefert frei drehbare 3-dimensionale Ansichten, technische Zeichnungen für die Produktion, Daten zur Steuerung der CNC-Maschinen und Listen aller benötigten Materialien. Außerdem ermöglicht die Software numerische Simulationen zum vorherigen Testen der Komponenten.



Konstruktionszeichnung des CSR-Reaktionsmikroskops.

## Feinwerktechnik

Sowohl die zentrale Feinwerktechnik- als auch die Ausbildungswerkstatt sind mit modernen CNC-gesteuerten sowie konventionellen Fräs- und Drehmaschinen ausgestattet. Verschiedene Schweiß- und Löttechniken kommen bei der Herstellung von Vakuumapparaturen zum Einsatz. Bearbeitet wird ein breites Spektrum von Materialien wie Stähle, Kupfer, Titan, Tantal, Molybdän sowie Keramiken und Kunststoffe. Die Präzision der Werkstücke wird mit einer 3D-Messmaschine kontrolliert. Spezialisierte Werkstätten kümmern sich um einzelne Großexperimente.



CNC-5-Achs-Fräsmaschine.

## Betriebstechnik

Für eine erfolgreiche wissenschaftliche Arbeit, insbesondere für Experimente, ist eine stets funktionierende Gebäudetechnik wie beispielsweise Klimatisierung von Laborräumen oder unterbrechungsfreie Stromversorgung unverzichtbar. Das Betriebstechnikteam kümmert sich um Wartung und Reparaturen der gesamten Gebäudetechnik sowie um Baumaßnahmen. Weitere Aufgaben sind die Koordination der Pflege von Gebäuden und Gelände sowie des Einsatzes von Fremdfirmen.

**Hausanschrift:**

**Max-Planck-Institut für Kernphysik  
Saupfercheckweg 1  
69117 Heidelberg**

**Postanschrift:**

**Max-Planck-Institut für Kernphysik  
Postfach 103980  
69029 Heidelberg**

**Tel: 06221 5160**

**E-Mail: [info@mpi-hd.mpg.de](mailto:info@mpi-hd.mpg.de)**

**Internet: [www.mpi-hd.mpg.de](http://www.mpi-hd.mpg.de)**

