

Links: In einer zylindrischen Penningfalle gespeichertes hochgeladenes Ion mit nur einem Elektron. Rechts: Schematische Darstellung der quantenelektrodynamischen Effekte eines Elektrons (blau), das eng an einen schweren Kern (grün) gebunden und dem extrem starken Feld des Kerns ausgesetzt ist.

Das g -Faktor-Experiment ALPHATRAP am MPIK führt solche Messungen durch, bei welchen das Elektron in hochgeladenen Ionen gebunden und damit sehr starken elektromagnetischen Feldern ausgesetzt ist. Bisher stellen Messungen an hochgeladenen Siliciumionen den präzisen Test der Quantenelektrodynamik in starken Feldern von gebundenen Zuständen dar. Im Umkehrschluss lässt sich aus dem Vergleich zwischen Messung und Theorie beispielsweise die Elektronenmasse oder die Feinstrukturkonstante α hochpräzise bestimmen, da diese in die Berechnung eingehen. Auf diese Weise gelang in unserer Gruppe die derzeit genaueste Bestimmung der Elektronenmasse. In Zukunft wird es mit dem ALPHATRAP-Experiment möglich, diese Tests der QED auch in den stärksten Feldern mit Hilfe von noch schwereren, hochgeladenen Ionen durchzuführen und zur präzisen Bestimmung von Fundamentalkonstanten des Standardmodells beizutragen.

Zukünftig soll ein weiteres g -Faktor-Experiment das magnetische Moment eines einzelnen Helium-3-Kerns und die Hyperfeinstruktur in einfach geladenem Helium-3 präzise vermessen. Diese Messungen werden es ermöglichen, hyperpolarisiertes Helium-3 als Standard der Magnetometrie zu etablieren und damit einen wesentlichen Beitrag zur Bestimmung des magnetischen Moments des Myons zu liefern. Daneben werden die Messungen der Hyperfeinstruktur einen präzisen Test der QED in einem vom Kernspin abhängigen System erlauben und ergänzend zu Messungen an myonischen Systemen eine Bestimmung der Kernstruktureffekte ermöglichen.

Externe g -Faktor-Experimente bestimmen die magnetischen Momente des Protons und Antiprotons als Test der CPT-Symmetrie (Universität Mainz, CERN: BASE).

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Klaus Blaum
Tel.: 06221 516850
E-Mail: klaus.blaum@mpi-hd.mpg.de

Dr. Sergey Eliseev
Tel.: 06221 516670
E-Mail: sergey.eliseev@mpi-hd.mpg.de

Dr. Andreas Mooser
Tel.: 06221 516653
E-Mail: andreas.mooser@mpi-hd.mpg.de

Dr. Sven Sturm
Tel.: 06221 516447
E-Mail: sven.sturm@mpi-hd.mpg.de



Saupfercheckweg 1
69117 Heidelberg

www.mpi-hd.mpg.de

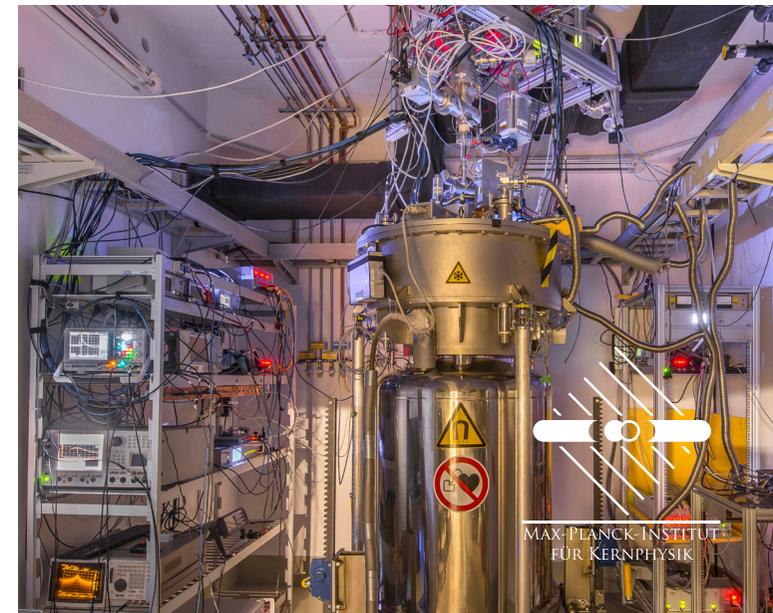


Das Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) ist eines von 86 Instituten und Forschungseinrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft. Das MPIK betreibt experimentelle und theoretische Grundlagenforschung auf den Gebieten der Astroteilchenphysik und der Quantendynamik.



Penningfallen

Präzisionsmessungen an einzelnen Ionen

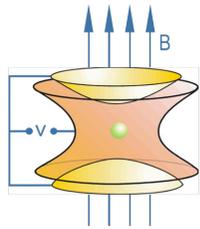


Penningfallen

Präzisionsmessungen an einzelnen Ionen

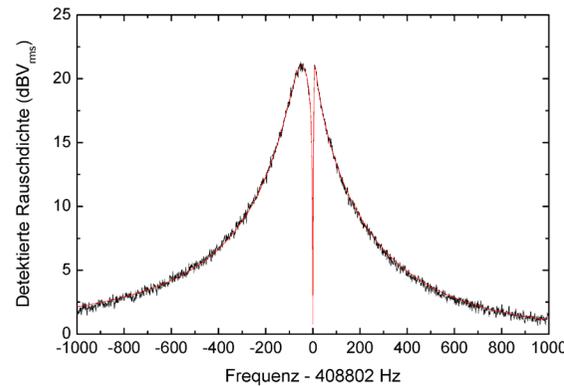
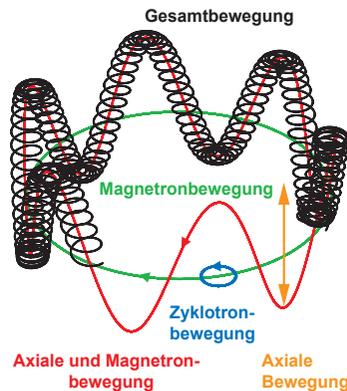
Um den Antworten auf viele Fragen der fundamentalen Physik näher zu kommen, müssen die Grundbausteine der Natur sehr genau untersucht werden. Dazu ist es notwendig, einzelne Teilchen zu isolieren und zu speichern. Bei geladenen Atomen (Ionen) haben sich sogenannte Penningfallen als ideales Werkzeug dafür erwiesen.

Funktionsweise der Penningfalle



Zur Speicherung von einzelnen Ionen wird ausgenutzt, dass diese aufgrund ihrer Ladung sehr empfindlich auf elektrische und magnetische Felder reagieren. Die erste Komponente der Falle ist ein homogenes Magnetfeld. Darin zwingt die Lorentzkraft das Ion auf eine Kreisbahn um die Magnetfeldachse, die sogenannte Zyklotronbewegung. Die Umlauffrequenz $f_c = q \cdot B / (2\pi \cdot m)$ ist proportional zur äußeren Magnetfeldstärke B und zum Ladung-zu-Masse-Verhältnis q/m des Ions. Dies bewirkt eine Speicherung in der Ebene der Kreisbewegung. Die zweite Komponente ist ein elektrisches Quadrupolfeld, das man mithilfe geeigneter Fallenelektroden dem Magnetfeld überlagert. Dieses Feld bewirkt eine Speicherung in Richtung des Magnetfeldes, sodass das Ion in alle Raumrichtungen eingeschlossen ist. Die zugehörige Ionenbewegung verläuft auf einer komplizierten Bahn, die aus drei unabhängigen Bewegungen zusammengesetzt ist.

Zur Messung der Zyklotronfrequenz f_c werden zwei prinzipiell unterschiedliche Methoden verwendet: Bei der „Flugzeit-Zyklotronresonanz-Methode“ werden die Teilchen nach resonanter Anregung aus der Falle ausgeschossen. Eine einzelne Messung kann hier sehr schnell ablaufen,



Signal der axialen Frequenz eines einzelnen gespeicherten und gekühlten Ions in der Penningfalle als Minimum im Rauschspektrum eines an die Falle angeschlossenen supraleitenden Schwingkreises.

wodurch sich diese Methode besonders für kurzlebige Nuklide eignet. Die alternative Methode ist eine Messung des Spiegelstroms ($\sim 10^{-15}$ A), den das Ion durch seine Bewegung in den Fallenelektroden induziert. So kann man die Frequenz zerstörungsfrei an einem einzelnen Ion bestimmen und über einen längeren Zeitraum wiederholt messen, was die statistische Ungenauigkeit reduziert. Daher wird die Spiegelstrommethode bei stabilen Nukliden bevorzugt verwendet.

Kernmassen

Basierend auf Einsteins Prinzip $E = mc^2$ können präzise Massenbestimmungen wichtige Informationen über die Bindungsenergien in Kernen liefern, die in vielen Bereichen der modernen Physik von hohem Interesse sind. Beispiele sind Tests von Massenmodellen oder das Bereitstellen von Eingangsparametern für die Beschreibung der Nukleosynthese in der Astrophysik.

Da Frequenzen zu den am besten messbaren Größen der Physik gehören, sind Penningfallen ideale Werkzeuge, um Nuklidmassen sehr präzise zu bestimmen. Heutzutage werden mit der Flugzeitmethode kurzlebige radioaktive Nuklide mit relativen Genauigkeiten von wenigen 10^{-9} gemessen, stabile Nuklide sogar mit 10^{-10} . Der Spiegelstrom-Nachweis lässt relative Genauigkeiten besser als 10^{-11} zu.

Das Hochpräzisions-Massenspektrometer PENTATRAP am MPIK führt relative Massenmessungen mit einer Genauigkeit von 10^{-11} oder besser an hochgeladenen, langlebigen, mittelschweren bis schweren Ionen durch. Mit Massenmessungen dieser Genauigkeiten können Beiträge zu verschiedenen Teilen der Physik geleistet werden, z. B. für Tests der speziellen Relativitätstheorie und Quantenelektrodynamik (QED), zu einer neuen Generation atomarer Uhren, Neutrino-physik und Erforschung der Dunklen Materie. PENTATRAP ist einzigartig durch die gleichzeitige Verwendung von fünf Penningfallen, was simultane Messungen in mehreren Fallen und eine damit einhergehende Verringerung der Systematiken erlaubt. Die Verwendung der nicht-destruktiven Spiegelstrommethode ermöglicht Frequenzmessungen über mehrere Stunden bzw. Tage und reduziert damit die statistische Ungenauigkeit. Die hochgeladenen Ionen für PENTATRAP werden in zwei Elektronenstrahlensfallen erzeugt. Bei einer wird Laserablation verwendet, um auch geringe Mengen Material im Nanogramm-Bereich ionisieren zu können. Dies wird z. B. im Zuge der Bestimmung der oberen Grenze der Neutrinomasse mit dem seltenen Isotop ^{163}Ho benötigt.

Weitere Penningfallen-Massenspektrometer haben Zugang zu exotischen Nukliden an externen Beschleunigeranlagen (GSI: SHIPTRAP, CERN: ISOLTRAP) oder Kernreaktoren (Universität Mainz: TRIGA-Trap).

Magnetische Momente

Eine weitere Größe, die sich sehr genau mit Penningfallen bestimmen lässt, ist das magnetische Dipolmoment der Ionen, das durch den „g-Faktor“ gegeben ist. Das ist eine dimensionslose Konstante, welche die Stärke des magnetischen Moments eines Teilchens aufgrund seines Eigendrehimpulses (Spins) angibt. Da sich der g-Faktor im Rahmen der Quantenelektrodynamik sehr genau berechnen lässt, können präzise Messungen als Test dieser Rechnungen und damit der Vorhersagekraft des Standardmodells dienen. Experimentell lässt sich die Spinrichtung in einem äußeren Magnetfeld über den Stern-Gerlach-Effekt durch die präzise Messung einer Bewegungsfrequenz bestimmen. Eingestrahelte magnetische Wechselfelder induzieren den Übergang zwischen den zwei Orientierungen des Spins. Der g-Faktor folgt aus der dabei auftretenden Resonanzfrequenz.



Der PENTATRAP-Fallen-turm mit Elektronik.