



wird. Weil Luft XUV absorbiert, befindet sich der Spiegelresonator im Vakuum. Mit diesem Frequenzkamm kann man Spektrallinien äußerst exakt vermessen. Sein Licht soll dazu in die neue, supraleitende CryPTEEx-II-Falle (Cryogenic Paul Trap Experiment II) geleitet werden. Hierin bringen wir die hochgeladenen Ionen zuerst sympathetisch durch den kalten Ionenkristall und dann durch spezielle Laserverfahren in den quantenmechanischen Grundzustand der Bewegung, extrem nahe am absoluten Nullpunkt.

Licht aus hochgeladenen Ionen – Spektroskopie von Plasmen

Hochgeladene Ionen kann man gezielt durch Stöße, Laser oder Elektronenbeschuss anregen: dies hebt Elektronen von tiefen auf höhere „Umlaufbahnen“ (Zustände) an. Beim spontanen Zurückspringen in den Anfangszustand wird Licht sehr gut definierter Wellenlängen erzeugt, die für das jeweilige Ion charakteristisch sind und vom sichtbaren über den ultravioletten bis zum harten Röntgenbereich reichen. Empfindliche Instrumente sammeln und analysieren die emittierten Photonen. Ein Beispiel ist die Sonnenkorona, ein Plasma bei etwa einer Million Grad, das mehrere Sonnenradien weit über die Oberfläche hinausreicht. Dort vorhandene Eisenionen in verschiedenen Ladungszuständen emittieren Licht, das die lokalen Temperaturen verrät. Manche langlebigen angeregten Zustände reagieren empfindlich auf Stöße, und somit auf die Dichte des Plasmas. In der EBIT können wir diese Plasmamparameter nach Wunsch einstellen und Spektren und Lebensdauern präzise vermessen. Die Ergebnisse werden mit der Theorie verglichen, um in starken Feldern QED-Beiträge höherer Komplexität zu erforschen.

Freie-Elektronen-Laser und Synchrotron-Speicherringe liefern Röntgenlicht hoher Intensität. Wir bringen unsere Instrumente dorthin, um dieses zu nutzen. Ein wichtiges Beispiel dazu: Zwei markante Röntgen-Emissionslinien von 16-fach geladenem Eisen zeigen seit langem im Labor und im Weltall ein Helligkeitsverhältnis, das den jeweils genauesten Rechnungen widerspricht, wodurch Bestimmungen von Temperatur und Dichte in der Astrophysik unsicher werden. Während unsere neuen sorgfältigen, hochpräzisen Messungen und Berechnungen mit modernsten Methoden alle bisher vorgeschlagenen Erklärungen für diese Diskrepanz ausschließen und den Widerspruch verschärfen, können einstweilen unsere Messresultate unmittelbar zur Korrektur astrophysikalischer Modelle verwendet werden.

Ansprechpartner:

Prof. Dr. José R. Crespo López-Urrutia
Tel: 06221 516521
E-Mail: jose.crespo@mpi-hd.mpg.de

Prof. Dr. Thomas Pfeifer
Tel: 06221 516380
E-Mail: thomas.pfeifer@mpi-hd.mpg.de



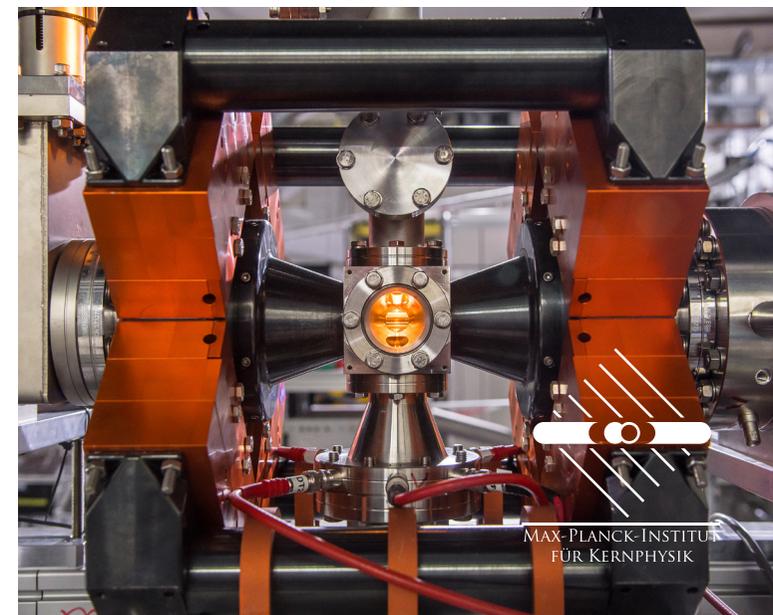
Saupfercheckweg 1
69117 Heidelberg

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.

Hochgeladene Ionen bei 100 Millionen Grad oder nahe am absoluten Nullpunkt



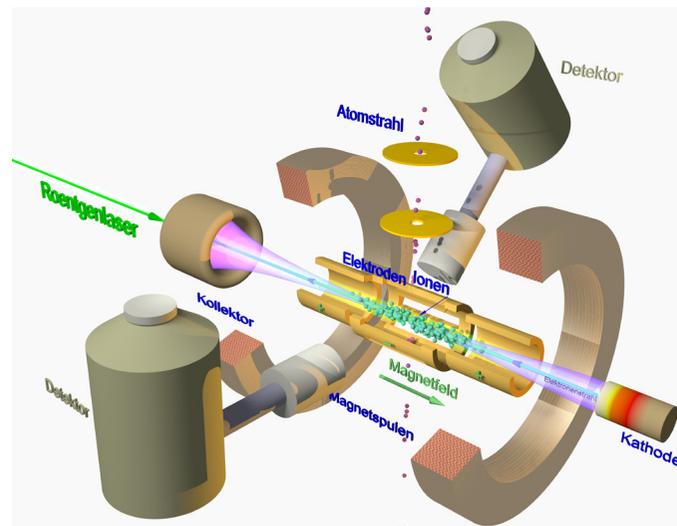
Hochgeladene Ionen bei 100 Millionen Grad oder nahe am absoluten Nullpunkt

Im Inneren und in der Umgebung von Sternen herrschen Temperaturen von mehreren Millionen Grad. Auch um Schwarze Löcher strudelnde oder von Neutronensternen von einem Begleitstern abgesaugte Materie wird unvorstellbar heiß. Dabei verlieren Atome durch energiereiche Stöße Elektronen und bilden als hochgeladene positive Ionen sehr heiße Plasmen. Über ihre Eigenschaften gibt uns das von den Ionen emittierte Licht Aufschluss. Derartige „Sternenfeuer“ können am MPIK mittels kompakter Apparaturen gebändigt werden: In Elektronenstrahl-Ionenfallen (EBIT) erzeugen und speichern wir hochgeladene Ionen. Unsere Experimente liefern präzise Erkenntnisse zu Effekten der Relativitätstheorie und Quantenelektrodynamik (QED) und suchen nach möglichen Schwachstellen fundamentaler Theorien der Physik. Gekühlte hochgeladene Ionen könnten die Basis der präzisesten Uhren werden, und könnten zusammen mit neuartigen Frequenzkämmen auch als Taktgeber bei bisher unerreichbar hohen Frequenzen bis hin zum Röntgenbereich dienen. Dazu tasten wir mit ihren ultrakurzen Laserpulsen exakt definierter Energie die quantenmechanische Entwicklung elektronischer Energiezustände ab.

Erzeugung hochgeladener Ionen in EBITs

Früher nur mit viel Aufwand in großen Beschleunigeranlagen erzeugbar, werden heute hochgeladene Ionen mittels EBITs durch kontinuierlichen Elektronenbeschuss generiert. Ein supraleitender Magnet mit einer Stärke von bis zu 8 Tesla fokussiert einen Elektronenstrahl, dessen negative Ladung die erzeugten Ionen anzieht und in der Schwebe hält. Bei Vakuumbedingungen, die denen im interstellaren Raum nahekommen, erzeugt man so hochgeladene Ionen, wie sie bei Temperaturen von vielen Millionen Grad im Universum vorkommen. Sie werden dann in der Falle systematisch untersucht oder aus dieser extrahiert und für andere Experimente verwendet.

Die neueste Entwicklung sind Miniatur-EBITs, bei denen Permanentmagnete Felder von 0,86 Tesla erzeugen (siehe Titelbild). Ihre geringe Größe hat neue Anwendungen, z. B., bei Präzisionsexperimenten mit Lasern oder an Synchrotron-Röntgenquellen, deutlich erleichtert.

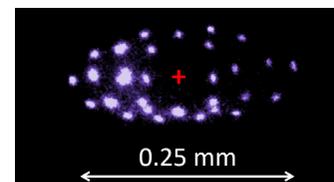


Elektronen oder ein Röntgenlaser bringen die gefangenen Ionen zum Leuchten. Diese Fluoreszenz wird mit verschiedenen Detektoren und Spektrometern nachgewiesen und untersucht.

Kalte hochgeladene Ionen – auf dem Weg zu den genauesten Atomuhren

Hochgeladene Ionen halten ihre verbliebenen Elektronen besonders fest. Sie optisch anzuregen ist quantenmechanisch sehr schwierig, was uns am MPIK jedoch mittels Laser gelungen ist. Schwache, „verbotene“ Übergänge in atomaren Ionen sind das Kernstück der neuesten und genauesten Atomuhren. Wir entwickeln eine solche Uhr mit hochgeladenen Ionen als Taktgeber. Diese sind wesentlich unempfindlicher gegen externe Störungen als die bisher eingesetzten Systeme. Gelingt es dadurch, die Genauigkeit der Uhren weiter zu steigern, sind Experimente denkbar, welche die zeitliche Stabilität von Naturkonstanten prüfen können.

Wir haben ein Verfahren entwickelt, um Ionen aus unseren EBITs mittels schwebender, lasergekühlter Ensembles aus Ionen (Ionenkristalle) in einer kryogenen Paul-Falle (CryPTE_x) zum ersten Mal bei Millikelvin-Temperaturen zu präparieren. Hier arbeiten wir eng mit der Physikalisch-Techni-



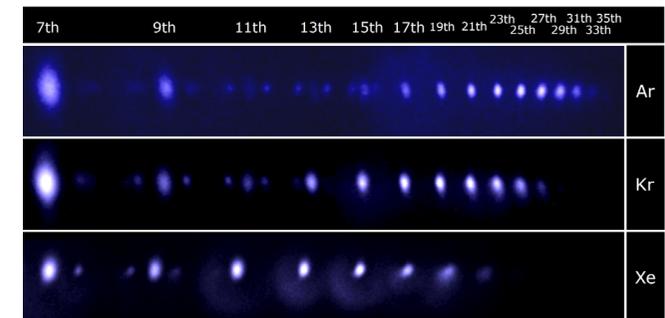
Ein einzelnes, unsichtbares Ar^{3+} -Ion (Kreuz) wird in der CryPTE_x-Falle von 29 kristallisierten, im Laserlicht fluoreszierenden Be^{+} -Ionen umgeben und bis unter 100 mK gekühlt.

schon Bundesanstalt in Braunschweig zusammen. An einem einzelnen eingefrorenen Ionenpaar Ar^{13+}/Be^{+} gelang es dort bereits, mit einem ultrastabilen Laser und unter Einsatz des Konzepts der Quantenlogik – bei dem das gesuchte Spektroskopie-Signal vom hochgeladenen Ion über zwei Laserpulse auf das Beryllium-Ion übertragen wird – die Energien von Spektrallinien des hochgeladenen Ions millionenfach präziser als mit traditioneller Spektroskopie zu bestimmen.

Außerdem konnten wir mit hochpräzisen relativistischen Atomstrukturrechnungen eine optische „Uhrenlinie“ in neunfach positiv geladenen Praseodym-Ionen identifizieren und ihre Wellenlänge exakt vermessen. Sie ist extrem unempfindlich gegenüber äußeren Störungen und aufgrund der außergewöhnlichen Elektronenstruktur ideal geeignet, um die zeitliche Stabilität von Naturkonstanten zu prüfen.

Der XUV-Frequenzkamm

Präzisionsspektroskopie im extremen Ultraviolett (XUV) oder gar Röntgenbereich erfordert hochenergetische Lichtquellen mit Lasereigenschaften und hochgeladene Ionen, weil nur diese unter einer solchen Bestrahlung ausreichend stabil sind. Für diesen Wellenlängenbereich haben wir im Haus eine neuartige höchst genaue Lichtquelle, einen XUV-Frequenzkamm, entwickelt, der auf der Erzeugung hoher harmonischer Frequenzen vom Laserlicht eines Infrarot-Frequenzkammes beruht. Seine sehr kurzen (150 Femtosekunden), intensiven 100 Millionen Laserpulse pro Sekunde werden verstärkt, dann in einem Spiegelresonator hundertfach kohärent überlagert und somit weiter „aufgeschaukelt“. Dort werden die Pulse auf einen Edelgas-Atomstrahl fokussiert, so dass das Spektrum jeder hohen Harmonischen zu einem sogenannten XUV-Frequenzkamm strukturiert



Fluoreszenzbilder verschiedener harmonischer Ordnungen von Argon, Krypton und Xenon im XUV-Frequenzkamm.