

Forschung mit Strahlen hochgeladener Ionen Erzeugung höchster Ladungszustände mit Ultrahochvakuumtechnologie

In unserer Umgebung begegnen uns vorwiegend niedrig geladene Ionen, zum Beispiel in der Flamme einer Kerze oder bei Gewitterblitzen. Aber es gibt auch natürlich vorkommende hochgeladene Ionen, also Ionen mit einer hohen Zahl fehlender Elektronen in der Atomhülle. Diese erleben wir beispielsweise in exotischen Zuständen wie der Sonnenkorona oder bei Supernova-Ereignissen.



Aus diesem Grund spielt die Erforschung von hochgeladenen Ionen im Labor für die Astrophysik eine große Rolle. Aber auch in anderen Bereichen sind im Labor erzeugte hochgeladene Ionen äußerst wichtig. Mittels Spektroskopie an hochgeladenen Ionen werden Vorgänge in Fusionsplasmen untersucht. Die Grundlagenforschung über die Wechselwirkung von hochgeladenen Ionen mit Festkörperoberflächen liefert interessante Perspektiven, beispielsweise für zukünftige Quantencomputersysteme.

„Bis heute wurde die spektroskopische Vermessung der Atomradien nur an wasserstoffartigen Systemen mit einem einzelnen Elektron durchgeführt, denn nur dafür ist die Theorie ausreichend genau. Diese einfachen Atomsysteme besitzen experimentell aber den Nachteil, dass die zu verwendenden Wellenlängen weit im ultravioletten Bereich des optischen Spektrums liegen und dadurch nur schwer mit heutigen Lasersystemen zugänglich sind.“, erläutert Prof. Dr. Wilfried Nörtershäuser, Leiter der Arbeitsgruppe LaserSpHERE (**L**aser **S**pektroskopie an **H**ochgeladenen Ionen und **E**xotischen **R**adioaktiven Nukliden) am Institut für Kernphysik der TU Darmstadt.

Die Laserspektroskopie an hochgeladenen Ionen und an exotischen kurzlebigen Isotopen stellt den Forschungsschwerpunkt der Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Nörtershäuser dar

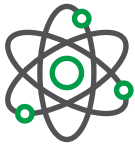
„Gegenwärtig gibt es aber erfolversprechende Bestrebungen, die erforderliche Genauigkeit auch für komplexere, heliumartige Systeme mit zwei Elektronen zu erreichen. Deren Wellenlängen sind mit Lasersystemen wesentlich besser zugänglich, und so können die Radien der Atomkerne von Helium bis Stickstoff künftig deutlich präziser bestimmt werden als derzeit möglich. Durch die Installation der Ionenstrahlanlage mit der Ionenquelle EBIS-A bietet die KOALA-Apparatur dafür die idealen Voraussetzungen.“ Prof. Dr. Nörtershäuser und sein Team führen mit Hilfe der **K**ollinearen **A**pparatur für

Laserspektroskopie und **A**ngewandte **W**issenschaften (**K**OALA) Präzisionsexperimente im Grenzbereich der Atom-, Kern- und Teilchenphysik durch. Ihr Forschungsschwerpunkt ist die Laserspektroskopie an hochgeladenen Ionen und an exotischen kurzlebigen Isotopen, mit dem Ziel, die Ladungsradien von Atomkernen präzise zu bestimmen.



Abbildung 1: EBIS-Ionenquelle

Technologien zur Erzeugung von hochgeladenen Ionen



Die in Darmstadt eingesetzte Elektronenstrahlionenquelle (engl. **E**lectron **B**eam **I**on **S**ource, EBIS) ist nur eine von mehreren Technologien zur Erzeugung von hochgeladenen Ionen. Wie Laser und Elektron-Zyklotron-Resonanz-Ionenquellen (engl. **E**lectron **C**yclotron **R**esonance **I**on **S**ource, ECRIS) gilt die EBIS als direkte Quelle hochgeladener Ionen. Außerdem können niedrig geladene Ionen mittels Hochenergiebeschleuniger und Gas- oder Folienstrippertargets in hochgeladene Ionen umgewandelt werden.

Der für die Ionisation nötige Energieübertrag wird bei Laserionenquellen durch Strahlung realisiert. Allen weiteren Technologien ist gemein, dass der treibende Prozess für die Ionisation auf Elektronenstößen basiert. In Hochenergiebeschleunigern werden die einfachgeladenen Ionen bei hohen Energien auf quasi ruhende Elektronenstoßpartner geschossen. In Elektron-Zyklotron-Resonanz- und Elektronstrahlionenquellen ist der Prozess umgekehrt. Die zunächst gasförmigen neutralen Moleküle oder Atome befinden sich in Ruhe. Für die Elektronenstrahlionisation werden die Elektronen beschleunigt und treffen auf die Hüllenelektronen der Atome. Durch den Übertrag der kinetischen Energie der schnellen Elektronen auf die Hüllenelektronen erhalten diese ausreichend Energie, um die Bindung der Atomhülle zu verlassen.

Von allen direkten Quellen hochgeladener Ionen wurden die höchsten Ladungszustände mit Elektronenstrahlionenquellen erzeugt, weshalb sie die optimale Wahl für den Einsatz an KOALA in Darmstadt waren. Die Technologie bietet ideale Voraussetzungen für das Erreichen hoher Ladungszustände, solange die verwendete Vakuumtechnik für ausreichende Rahmenbedingungen sorgt.

Die höchsten Ladungszustände wurden bisher mit Elektronenstrahlionenquellen erzeugt

Funktionsprinzip einer Elektronenstrahlionenquelle

Bei einer Elektronenstrahlionenquelle vom Typ Dresden-EBIS-A, wie sie an der TU Darmstadt eingesetzt wird, wird eine hochemittierende Kathode im Vakuum auf etwa 2200 K geheizt. Dies erzeugt einen Strahl aus freien Elektronen, die von der Elektronenkanone zum als Anode fungierenden Driftröhrenensemble hin beschleunigt werden. Dabei wird der Elektronenstrahl durch ein starkes magnetisches Feld komprimiert, wodurch die Elektronenstromdichten Werte von einigen 10 Ampere je cm^2 erreichen. Dieser hochdichte, schnelle Elektronenstrahl trifft im Bereich der Driftröhren auf thermische Gasatome und stößt mit deren Hüllenelektronen. Die dabei entstehenden Ionen werden durch ein elektrostatisches Feld im Bereich der Driftröhren eingefangen, in der für die Quelle namensgebenden Ionenfalle (engl. **E**lectron **B**eam **I**on **T**rap, EBIT).



Abbildung 2: Elektronenstrahlquelle

So lange die Energie des Elektronenstrahls die Bindungsenergie übersteigt, werden durch fortlaufende Elektronenstoßionisation weitere Hüllenelektronen entfernt und das Ion in einen immer höheren Ladungszustand gebracht. Dies kann fortgeführt werden bis alle Hüllenelektronen entfernt sind und nur noch der nackte Atomkern vorhanden ist.

Die Elektronen werden nach dem Durchfliegen der Driftröhren elektrostatisch durch die Repeller-Spannung auf einen gekühlten Elektronenkollektor geleitet. Die hochgeladenen Ionen können die Ionenfalle verlassen und stehen für verschiedene Applikationen zur Verfügung.

Ultrahochvakuum als Grundbedingung für hohe Ladungszustände

Dem Ionisationsprozess entgegen steht die Rekombination. Dabei werden freie Elektronen von Ionen eingefangen und der Ladungszustand verringert. Dieser Prozess kann bis zur vollständigen Neutralisation des Ions, also zurück vom Ion zum Atom fortlaufen. Die Rekombination hängt vom Angebot an neutralen Atomen ab und skaliert somit direkt mit dem Vakuumdruck. Speziell bei der Erzeugung höchster Ladungszustände bis hin zu nackten Atomkernen ist der Prozess der Rekombination mit Neutralteilchen schädlich.

Der Arbeitsdruck muss also so angepasst sein, dass die mittlere freie Weglänge zwischen zwei Gasatomen größer ist als der Wechselwirkungsquerschnitt der Elektronenstoßionisation. Der Einfang von Elektronen aus dem Elektronenstrom der EBIS selbst ist dem gegenüber eher unwahrscheinlich, da die Elektronen aus dem Elektronenstrahl für den Einfang in die Atomhülle eine zu hohe kinetische Energie haben.

Neben einem guten Vakuumbasisdruck ist auch die Zusammensetzung des Restgases von Interesse. Bei Stößen zwischen Ionen verschiedener Spezies, etwa Argon und Stickstoff, erfolgt ein Impulsübertrag im Verhältnis der Massen. Das hat zur Folge, dass schwerere Elemente leichtere Elemente aus der Ionisationszone der Driftröhren stoßen, was die Verweildauer der Ionen reduziert. Eine lange Verweildauer ist jedoch Voraussetzung, um möglichst

hohe Ladungszustände zu erreichen. Dadurch wird wiederum die Wahrscheinlichkeit von Wechselwirkungen für Elektronenstöße erhöht. Gleichzeitig ermöglicht eine Analyse der erzeugten Ionen und deren Ladungszustände auch eine qualitative Analyse des Restgases. Somit stellt eine EBIS auch immer ein ausgezeichnetes Massenspektrometer dar.

Technische Herausforderung des Ultrahochvakuums

Für die Erzeugung von hohen und höchsten Ladungszuständen wird ein Druck von $1 \cdot 10^{-10}$ mbar benötigt. Der Druck des Prozessgases (beispielsweise Argon oder Xenon, auch Wasserstoff oder Sauerstoff) liegt bei $5 \cdot 10^{-10}$ mbar bis $5 \cdot 10^{-9}$ mbar. In diesem Druckbereich liegt die mittlere freie Weglänge zwischen 10^4 und 10^5 m, sodass die Wahrscheinlichkeit von Wechselwirkungen mit anderen Gasatomen sinkt und die Rekombination in niedrigere Ladungszustände unterdrückt wird.

Das Raumtemperatur-EBIS-Systemen erreicht seinen Arbeitsdruck durch ein zweistufiges Turbopumpensystem bestehend aus einer HiPace 400 und einem HiCube 80

In den von der Dreebit GmbH entwickelten Raumtemperatur-EBIS-Systemen wird dieser Arbeitsdruck mit einem zweistufigen Turbopumpensystem aus einer HiPace 400 und einem HiCube 80 von Pfeiffer Vacuum erzeugt. Durch die geringe Gaslast im Betrieb der Ionenquelle ist die Membranpumpe im Kombinationspumpstand HiCube 80 ausreichend.

Die geringen Gaszuflüsse für das Prozessgas werden mit dem Gasdosierventil UDV 146 erzeugt. Damit ist die automatisierte Gasflussregelung zur Einstellung des

Arbeitsdrucks zwischen $1 \cdot 10^{-10}$ mbar und $5 \cdot 10^{-9}$ mbar möglich.

Die Ionenquelle wird über mehrere Tage bei Temperaturen um 120°C ausgeheizt, um das Basisvakuum im Bereich von $1 \cdot 10^{-10}$ mbar und eine saubere Restgaszusammensetzung zu erreichen. Daraus ergeben sich spezielle Anforderungen an die verwendeten Permanentmagnete. Typische Neodym-Eisen-Bor- (NdFeB-) Magnete haben eine Curie Temperatur von $60-70^\circ\text{C}$ und würden beim Ausheizen der Quelle ihre magnetischen Eigenschaften verlieren. Daher kommen hier spezielle Magnetsysteme zum Einsatz, welche bis 120°C ausgeheizt werden können, ohne ihre permanentmagnetischen Eigenschaften zu verlieren. So kann auf die komplizierte und zeitaufwendige Demontage der Magnete vor dem Ausheizen verzichtet werden. Die Magnetfeldstärke erreicht an der Oberfläche der Magnete Werte im Bereich von 1,1 T und erzeugt auf der Strahlachse der Ionenquelle ein fokussierendes Magnetfeld mit einer Stärke von etwa 650 mT. Damit zählt sie zu den stärksten Magnetfeldern, die mit Permanentmagneten erzeugt werden können.



Anwendung in Darmstadt

Der so erzeugte, sehr geordnete Elektronenstrom (Plasma) ist ein großer Vorteil für die Strahlqualität und war einer der Gründe für den Einsatz der EBIS



Abbildung 5: Anlage an der TU-Darmstadt



Quelle an KOALA. Ein weiterer Pluspunkt konnte im Vorfeld bei Forschungsarbeiten an einem Beschleunigerring bestätigt werden. Philip Imgram von LaserSpHERE erläutert: „Wir kannten die EBIS Quelle von der Forschung bei einem Kooperationspartner und wussten, was uns erwartet. Ob sie jedoch für unsere Art der Anwendung die richtige Lösung ist, war nicht sicher.“ Deshalb wurde 2019 an der Anlage eines anderen Instituts ein provisorischer Testaufbau errichtet, der Klarheit brachte. „Wir benötigen eine bestimmte Elektronenkonfiguration von Kohlenstoff⁴⁺ (C⁴⁺) für unsere Experimente. Wir haben nicht daran gezweifelt, dass wir C⁴⁺ mit der EBIS erzeugen können, aber kommt auch die Konfiguration heraus, die wir für die Laserspektroskopie verwenden können? Wir haben bei den Testmessungen gesehen, dass das funktioniert und damit war klar, dass die EBIS die Quelle ist, die wir brauchen“, sagte Philip Imgram im Gespräch..

Der Auf- und Ausbau von KOALA geschah aus der Notwendigkeit, unabhängiger von den großen Beschleunigeranlagen zu werden. Strahlzeiten an großen Laboren sind sehr begrenzt und so setzte sich die Gruppe um Prof. Dr. Nörtershäuser das Ziel, eine eigene Anlage zu bauen, an der man die neue Methode zur Bestimmung von Kernladungsgrößen uneingeschränkt erproben konnte. Mittlerweile ist KOALA der Überbegriff der Anlage im Keller des Instituts für Kernphysik, an der verschiedene Experimente wie zum Beispiel Hochspannungsmessungen oder auch die klassische kollineare Laserspektroskopie gemacht werden. Durch die Installation eines neuen Switchyards können nun mehrere verschiedene Quellen dauerhaft am System angeschlossen bleiben und es bedarf keiner größeren Umbauten mehr, wenn die Experimente gewechselt werden.

Experimente zur Bestimmung der Kerngröße

Für Philip Imgram startete nach der Installation der EBIS-A Quelle im September 2021 die finale Phase seiner Promotionsarbeit, in deren Rahmen er gemeinsam mit dem Team von LaserSpHERE eine neue Technik für die Messung von absoluten Kernladungsradien entwickelt. Am 28. Oktober 2021 konnte die erste Resonanz gemessen werden und nach rund zwei Wochen lag

der Nachweis vor, dass das Experiment prinzipiell funktionieren kann. Es sollte zunächst die Größe von Kohlenstoff¹² bestimmt werden, die üblicherweise durch Elektronenstreuung und Spektroskopie von myonischen Atomen gemessen wird. Bei der Elektronenstreuung werden Elektronen auf ein Target geschossen und anschließend die Verteilung der Elektronen betrachtet. So können Rückschlüsse auf die Größe des Kerns gezogen werden. Das Problem dabei: Diese Experimente sind in der Präzision limitiert und funktionieren für radioaktive Isotope nicht gut, da die Kerne aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer sehr schnell zerfallen. „Bei unseren Experimenten an KOALA möchten wir durch die Laserspektroskopie auf die Kerngröße schließen. Dafür müssen wir ein Elektron in unserem Atom auf ein nächstes Niveau bringen und diesen Energieunterschied sehr genau messen, denn in ihm stecken auch eine geringe, aber messbare Menge an Informationen, die Rückschlüsse auf die Kerngröße beinhalten“, erklärt Imgram. Um die Ergebnisse der Versuche mit der Theorie bestätigen zu können, müssen die Experimente an Atomsystemen mit einem Kern und maximal zwei Elektronen durchgeführt werden.

Bei den Experimenten an KOALA möchten wir durch die Laserspektroskopie auf die Kerngröße schließen.

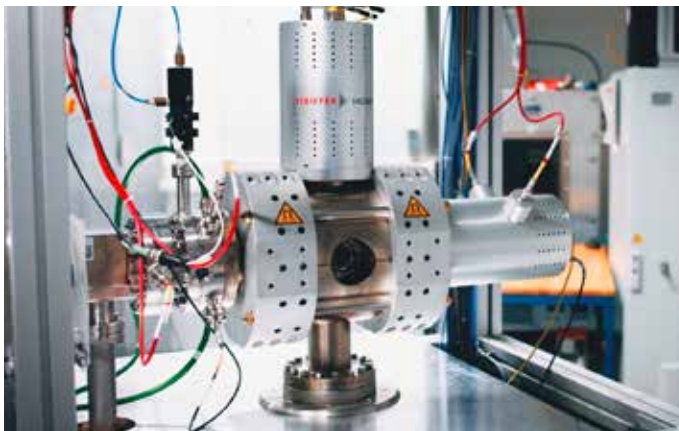


Abbildung 6: EBIS-Quelle in der Anlage an der TU-Darmstadt

Blick in die Zukunft

Philip Imgram erläutert das weitere Vorgehen: „Für den Theorieteil sind wir auf die Zuarbeit der Kollegen aus der theoretischen Physik angewiesen, das dauert manchmal ein bisschen. Aber wir sind auf einem guten Weg und hoffen, zeitnah das erste echte Ergebnis unserer Zielgröße herauszubekommen, also die Kerngröße von Kohlenstoff¹².“ Die Forschenden haben sich dafür entschieden, zunächst Kohlenstoff¹² zu untersuchen, da dessen Kerngröße schon recht genau aus anderen Experimenten bekannt ist. Sollten die Ergebnisse aus beiden Messungen also übereinstimmen, liegt eine Bestätigung vor, dass die neue Methode tatsächlich funktioniert. „Wenn wir das herausgefunden haben, wollen wir das Experiment auch auf Kohlenstoff¹³, was nicht so genau bekannt ist, anwenden.“ erklärt Imgram. Sollte sich hier die Methode als wirksam erweisen, möchte das Team in der Zukunft die EBIS Quelle an einem großen Beschleunigerring installieren und dort radioaktive Isotope untersuchen. „Aber das ist die ganz langfristige Planung, davor müssen wir hier in Darmstadt noch viele Tests an unserer KOALA durchführen.“



Your Success. Our Passion.

Wir geben jeden Tag unser Bestes
für Sie – weltweit!

Sie suchen eine optimale
Vakuumlösung?
Sprechen Sie uns an:

Pfeiffer Vacuum GmbH
Germany
T +49 6441 802-0



Irrtümer und/oder Änderungen vorbehalten. Pl 0646 PDE (August 2022/0)

Folgen Sie uns auf Social Media
#pfeiffervacuum



www.pfeiffer-vacuum.com

PFEIFFER  **VACUUM**