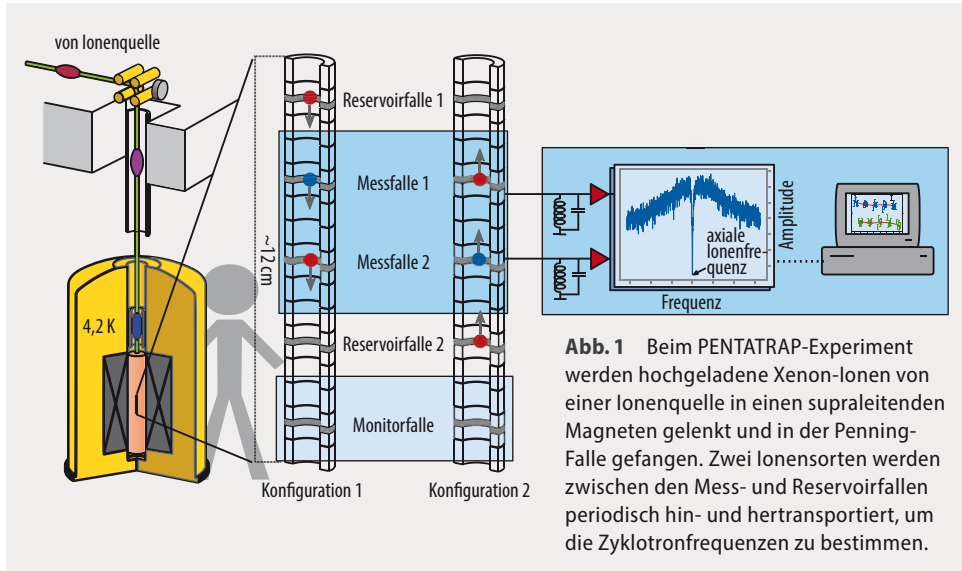


# Pingpong mit hochgeladenen Ionen

Die Penning-Fallenapparatur PENTATRAP erzielt höchste Genauigkeiten in der Massenspektrometrie.

Wolfgang Quint



**Abb. 1** Beim PENTATRAP-Experiment werden hochgeladene Xenon-Ionen von einer Ionenquelle in einen supraleitenden Magneten gelenkt und in der Penning-Falle gefangen. Zwei Ionensorten werden zwischen den Mess- und Reservoirfallen periodisch hin- und hertransportiert, um die Zyklotronfrequenzen zu bestimmen.

Die Massenspektrometrie spielt in der Physik eine grundlegende Rolle, da sich die Gesamtmasse eines Teilchens aus den Massen seiner Bausteine und ihren Wechselwirkungsenergien ergibt. Beim Atom sind das die Bindungsenergien im Kern und in der Elektronenhülle, die über  $E = mc^2$  zur Masse des Atoms beitragen. Das Team des PENTATRAP-Experiments am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg hat kürzlich ein neuartiges Messverfahren auf einzelne schwere hochgeladene Ionen angewandt und damit Massen mit einer relativen Genauigkeit von  $\delta m/m \approx 10^{-11}$  bestimmt [1]. Eine so hohe Messgenauigkeit erlaubt es z. B., atomare Energieniveaus aus der Masse des Ions vor und nach der Anregung eines elektronischen Übergangs zu bestimmen [2]. Bei bekannter Übergangsenergie lässt sich die Gültigkeit der Formel  $E = mc^2$  und damit die Grundlage der Relativitätstheorie überprüfen [3].

Ein häufig angewandtes Prinzip der Massenspektrometrie beruht darauf, die Bahnen eines Teilchens in einem Magnetfeld zu untersuchen und Rückschlüsse auf seine Ladung und Masse zu ziehen. J. J. Thomson, einer der Entdecker des Elektrons,

hat aus der Ablenkung von Elektronen in einem Magnetfeld mit einer Ungenauigkeit von etwa 10 Prozent geschlossen, dass die Masse des Elektrons 1700 Mal kleiner ist als die des Wasserstoffatoms. Seit diesen Pionierarbeiten vor über hundert Jahren gelang es, die Messgenauigkeit um zehn Größenordnungen zu steigern.

Das genaueste Massenspektrometer ist die Penning-Falle, in der ein starkes, homogenes Magnetfeld  $B$  elektrisch geladene Teilchen auf eine Kreisbahn lenkt. Diese Zyklotronbewegung besitzt eine Umlauffrequenz von  $\omega_c = qB/m$ , mit der Ladung  $q$  und der Teilchenmasse  $m$ . Ein elektrostatisches Potential schließt die Bewegung parallel zu den Magnetfeldlinien ein. Das Verhältnis der Massen zweier verschiedener Ionen leitet sich dabei aus ihren Zyklotronfrequenzen im Magnetfeld  $B$  ab. Im Verhältnis der Zyklotronfrequenzen kürzt sich das Magnetfeld heraus, sodass bei bekanntem Ladungszustand  $q$  direkt das Massenverhältnis der Ionen resultiert.

Für relative Messgenauigkeiten von  $\delta m/m \approx 10^{-11}$  gilt es, selbst subtile Effekte wie Tag-Nacht-Temperaturschwankungen sorgfältig zu berücksichtigen. Die Ionenfalle von PENTA-

TRAP befindet sich im Zentrum eines speziellen supraleitenden Magneten, dessen Feld (7 Tesla) äußerst homogen ist (Abb. 1, links). Spezielle Korrekturspulen im Magneten minimieren die Feldinhomogenitäten in einem Volumen von  $1 \text{ cm}^3$  auf  $\Delta B/B \approx 1,4 \times 10^{-7}$ . Das Magnetfeld ist zeitlich extrem stabil mit relativen Schwankungen von  $\leq 10^{-10}$  pro Stunde. Das Netzgerät wird nach dem Hochfahren des Feldes abgekoppelt, damit der Strom in der supraleitenden Spule frei fließen kann. Zudem befindet sich PENTATRAP in einer nahezu perfekt abgeschirmten temperatur- und druckstabilisierten Umgebung. Denn bereits kleinste Änderungen der äußeren Bedingungen können das Magnetfeld  $B$  und damit die Zyklotronfrequenz  $\omega_c$  beeinflussen und systematische Fehler beitragen.

Die Coulomb-Abstoßung zwischen gleichzeitig in einer Falle gespeicherten Ionen führt zu schwer kontrollierbaren Verschiebungen der Schwingungsfrequenzen der Ionen. Daher ist die Genauigkeit in der Massenbestimmung für einzelne Ionen am höchsten. Um die Massen zweier Ionen zu vergleichen, ist es erforderlich, beide Teilchen abwechselnd in eine Messfalle mit demselben Magnetfeld zu bringen und nach Bestimmung der Zyklotronfrequenz in einer benachbarten Falle zu parken. Darauf ist PENTATRAP ausgelegt: Die zylindrische Anordnung der Fallenelektroden erlaubt es, bis zu fünf Potentialminima nebeneinander durch Anlegen geeigneter elektrischer Spannungen zu schaffen (Abb. 1, Mitte). Zur Bestimmung der Zyklotronfrequenzen der Ionen befinden sich zwei Messfallen in der Apparatur, die auf beiden Seiten von jeweils einer Reservoir-Falle zum „Parken“ eines Ions flankiert sind.

Zu Beginn einer Messung werden drei einzelne Ionen aus einer externen Ionenquelle in die Falle gebracht, dort gespeichert und gekühlt. Die Massen

# quantum approved.



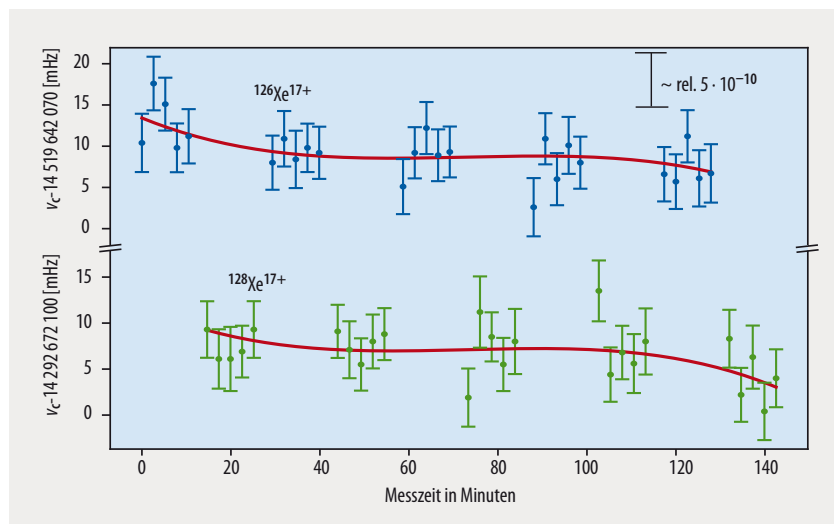
## Laser Rack Systems

Quantum Technology meets Industry Standards

Our lasers do not need an optical table!  
The T-RACK is the perfect home for TOPTICA's high-end tunable diode lasers and frequency combs in a 19" form factor. Pick yours!

- Tunable Diode Lasers
- Frequency Combs
- Modular 19" format
- 330 .. 1625 nm

[toptica.com/T-RACK](http://toptica.com/T-RACK)



**Abb. 2** Die Messung der Zyklotronfrequenzen zweier Ionensorten erlaubt es, deren Massen zu vergleichen.

leiten sich aus den Zyklotronfrequenzen der beiden Ionensorten in den zwei Messfällen und ihr periodisches Hin- und Hertransportieren ab (Abb. 1, rechts). Der entscheidende Vorzug dieser „Pingpong-Methode“ besteht im stetigen Wechsel der beiden Ionensorten. Selbst minimale zeitliche Schwankungen des Magnetfelds zwischen den Messzyklen lassen sich so verfolgen und kontrollieren. Auf ähnliche Weise gelang es in anderen Experimenten, die atomare Masse des Protons zu messen [4] und die Massen des Protons und des Antiprotons zu vergleichen [5].

Das Team von PENTATRAP hat in einer ersten Messkampagne die Massen einiger Xenon-Isotope mit einer Genauigkeit von  $\delta m/m \approx 10^{-11}$  bestimmt (Abb. 2). Die Xenon-Ionen im Ladungszustand 17+ wurden in einer Elektronenstrahlionenfalle erzeugt und in die Fallenapparatur eingeschossen. Die Genauigkeit in den Massendifferenzen war dabei teilweise um einen Faktor 1000 höher verglichen mit früheren Messwerten [6]. Die genaue Kenntnis der Massen der Xenon-Isotope kann u. a. anderen Massenspektrometern als Referenz dienen. In einer weiteren Messreihe wurden die Massen des Isotops  $^{131}\text{Xe}$  in den Ladungszuständen 17+ und 18+ verglichen. Der Massenunterschied setzt sich aus der sehr genau bekannten Masse des Elektrons und seiner Bindungsenergie von etwa 432 eV zusammen. Damit ließen sich

theoretische Berechnungen der Energieniveaus dieses Mehrelektronensystems präzise überprüfen.

Diese Ergebnisse bedeuten einen Meilenstein auf dem Weg zur Messung der Lamb-Verschiebung in schweren hochgeladenen Ionen [7]. Dieser quantenelektrodynamische Effekt beruht auf der Vakuumpolarisation und Selbstenergie des gebundenen Elektrons im Coulomb-Feld des Kerns und skaliert für wasserstoffartige Ionen mit  $\sim Z^4$ . Im Vergleich zu atomarem Wasserstoff ist die Lamb-Verschiebung in wasserstoffartigem Blei  $\text{Pb}^{81+}$  oder Uran  $\text{U}^{91+}$  fast um einen Faktor  $10^8$  größer. Ein experimenteller Test der Theorie der Quantenelektrodynamik in extrem starken Feldern mittels Massenspektrometrie scheint nun in Reichweite gerückt zu sein.

- [1] A. Rischka et al., Phys. Rev. Lett. **124**, 113001 (2020)
- [2] R. X. Schüssler et al., Nature **581**, 42 (2020)
- [3] S. Rainville et al., Nature **438**, 1096 (2005)
- [4] F. Heiße et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 033001 (2017)
- [5] S. Ulmer et al., Nature **524**, 196 (2015)
- [6] M. Wang et al., Chin. Phys. C **41**, 030003 (2017)
- [7] V. M. Shabaev et al., Hyp. Int. **239**, 60 (2018)

## Der Autor

Priv.-Doz. Dr. Wolfgang Quint, Abteilung Atomphysik, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt