

Schwere Ionen im Laserlicht

Prüfstand für die Quantenelektrodynamik in starken Feldern

Speicherringe für schwere Ionen, wie der Experimentierspeicherring ESR der GSI, haben in den letzten Jahren eine Vielzahl von völlig neuen Experimentiermöglichkeiten eröffnet. Eine davon ist die Laserspektroskopie an schweren Ionen, die mit hoher Geschwindigkeit im Speicherring umlaufen. Bei diesen Experimenten profitiert man von der Schmalbandigkeit des Laserlichtes, die eine hochpräzise Spektroskopie erlaubt. In vielen Fällen vereinfacht die hohe Ionengeschwindigkeit die Anwendung des

Lasers. Ganz analog zur Hörempfindung eines Autofahrers, der bei Annäherung an eine Schallquelle eine höhere und beim Entfernen von ihr eine tiefere Frequenz wahrnimmt, wird hier für die Absorption des Lichtes eine Verschiebung zu kürzeren bzw. längeren Wellenlängen bewirkt. Im ESR ist diese Dopplerverschiebung so groß, daß sichtbares Licht für die umlaufenden Ionen bei Einstrahlung in bzw. entgegen ihrer Bewegungsrichtung als infrarotes bzw. ultraviolettes Licht erscheint. In Verbindung mit dem Elektronenkühler, der die für Präzisionsexperimente erforderliche Strahlqualität des umlaufenden Ionenstrahles liefert, ist es möglich, das ganze Potential der Laserspektroskopie auf schnell bewegte Ionen im ESR anzuwenden. Ein besonderes Interesse gilt dabei der Präzisionspektroskopie der Hyperfeinstrukturaufspaltung in wasserstoffähnlichen schweren Ionen. Diese Messungen gestatten es erstmals, die Quantenelektrodynamik (QED), die quantenphysikalische Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkung, im Bereich extrem starker elektrischer und magnetischer Felder zu überprüfen - einem Bereich, der nur mit hochgeladenen, schweren Ionen erschlossen werden kann.

Magnetfelder von mehr als 100 Millionen Tesla

In Atomen und Ionen führt die Wechselwirkung zwischen dem magnetischen Dipolmoment des Kernes und dem der Elektronenhülle zu einer Aufspaltung der Energiezustände, der sogenannten Hyperfeinstruktur (Abbildung 1). Besonders anschaulich - und theoretisch gut berechenbar - ist dies im Falle wasserstoffähnlicher Ionen, bei denen der Kern nur von einem einzelnen Elektron umkreist wird. Zusammengehalten wird das System durch die elektrische Anziehung zwischen

Die Hyperfeinaufspaltung in atomaren Wasserstoff führt zur Abstrahlung der bekannten 21 cm - Linie, die an interstellaren Wasserstoffwolken beobachtet werden kann, wie zum Beispiel dem abgebildeten Eta Carinae-Nebel. In optischen Beobachtungen sind die Wasserstoffatome durch die Emission von rotem Licht erkennbar (mit freundlicher Genehmigung des European Southern Observatory, ESO Garching).

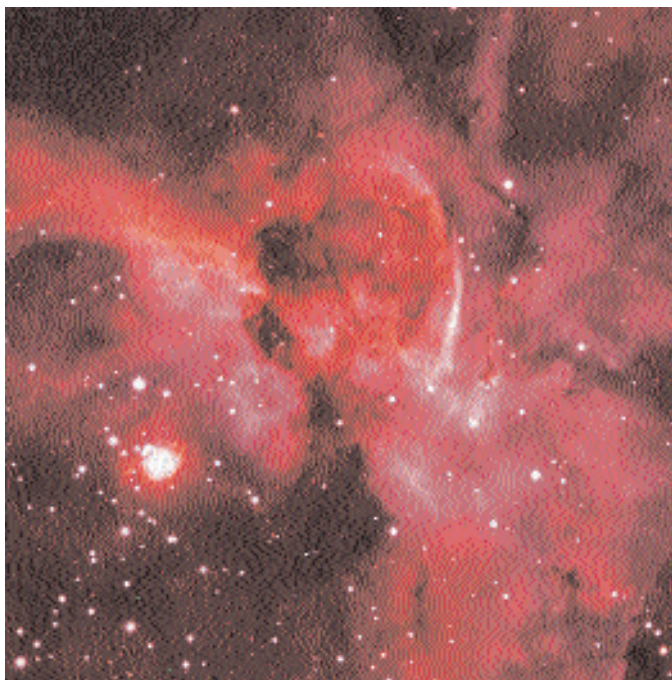
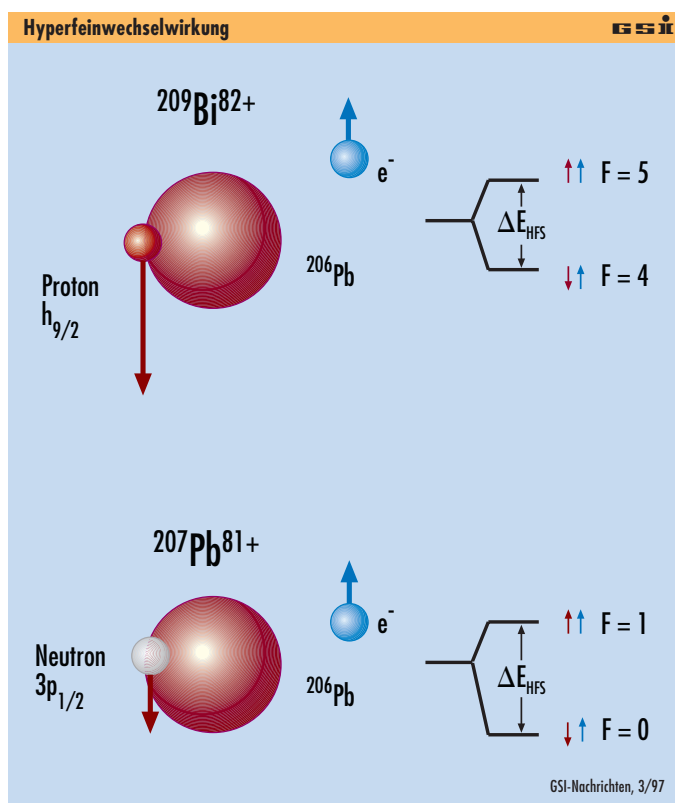


Abb. 1: Hyperfeinwechselwirkung für $^{209}\text{Bi}^{82+}$ und $^{207}\text{Pb}^{81+}$. Die Drehimpulse des Kerns (rote Pfeile) und des Elektrons (blaue Pfeile) koppeln entweder parallel oder antiparallel zum Gesamtdrehimpuls F . Die Energiedifferenz zwischen diesen beiden Einstellungen ist die Hyperfeinstrukturaufspaltung. Der ^{209}Bi -Kern setzt sich zusammen aus dem doppelt magischen (^{208}Pb)-Rumpf und einem zusätzlichen Proton in der $h9/2$ -Schale. Das magnetische Moment wird in erster Näherung durch dieses zusätzliche ($h9/2$)-Proton bestimmt. Bei einer genauen Berechnung muß jedoch eine Vielzahl von Beimischungen angeregter Konfigurationen berücksichtigt werden. Im ^{207}Pb fehlt ein ($p1/2$)-Neutron zur abgeschlossenen (^{208}Pb)-Konfiguration, das magnetische Moment ist in diesem Fall gut durch das fehlende ($p1/2$)-Neutron beschreibbar.



dem Elektron und dem positiv geladenen Kern. Zusätzlich wirkt eine magnetische Abstoßung - bei paralleler Einstellung der magnetischen Momente des Kerns und des Elektrons - oder eine Anziehung bei entgegengerichteter Einstellung. Die Hyperfeinstrukturaufspaltung gibt die Energiedifferenz dieser beiden Zustände an.

In atomarem Wasserstoff beträgt diese Energiedifferenz $0,00005869$ eV und führt zu einem extrem schwachen magnetischen Dipolübergang, der von Astrophysikern in wasserstoffreichen Regionen des Universums als 21cm-Linie beobachtet wird (siehe Photo). Werden die Drehimpulse (Spins) des Kerns und Elektrons in einem Wasserstoffatom parallel ausgerichtet, so dauert es im Mittel 10 Millionen Jahre, bis sie sich unter Emission einer Radiowelle wieder antiparallel anordnen.

Im wasserstoffähnlichen hochgeladenen Ion wird das Elektron viel näher an den schweren Kern herangezogen. Dort spürt es Feldstärken von mehr als 100 Millionen Tesla, was jedes künst-

lich herstellbare Magnetfeld und auch die Verhältnisse im Wasserstoffatom oder in leichten Ionen um viele Größenordnungen übersteigt. Daher beträgt zum Beispiel in wasserstoffähnlichem Wismuth-209 ($^{209}\text{Bi}^{82+}$) die Hyperfeinaufspaltung des Grundzustands über 5 eV, entsprechend einer Wellenlänge im ultravioletten Spektralbereich von 243,8 Nanometern. Die Lebensdauer, das heißt die Zeit, die vergeht, bis sich der Elektron-Spin wieder antiparallel zum Spin des Kerns einstellt, liegt hier bei weniger als einer halben Millisekunde. Die laserspektroskopische Bestimmung dieser Größen gestattet erstmals eine sehr genaue Überprüfung der Quantenelektrodynamik (QED) in dem Gebiet extrem starker elektrischer und magnetischer Felder.

Warum ist dies interessant? Die QED gehört zu den am genauesten überprüften Theorien in der Physik. Bisher konnten keine Abweichungen zwischen theoretischen Vorhersagen und experimentellen Ergebnissen gefunden werden, wobei zum Teil beach-

liche Übereinstimmungen bis auf 8 Stellen genau erreicht wurden. Dennoch gibt es gute Gründe, die Theorie in einem anderen Bereich - bei hohen elektrischen und magnetischen Feldern, wie sie in hochgeladenen schweren Ionen vorherrschen - zu überprüfen. Bei diesen hohen Feldstärken brechen nämlich die üblichen Näherungsverfahren zur Berechnung der QED-Effekte zusammen, und es gewinnen Beiträge an Bedeutung, die im Wasserstoffatom oder bei leichten Ionen vernachlässigbar sind.

Ein weiteres wichtiges Argument ist, daß für die schwersten wasserstoffähnlichen Ionen die elektrischen Felder nur um einen Faktor zwei bis drei unter den kritischen Feldstärken liegen, bei denen das QED-Vakuum spontan in Elektron-Positron Paare zerfallen sollte. Die Wahrscheinlichkeit, qualitativ neue Phänomene zu beobachten, die über die existierende Theorie hinausgehen, wird von den Physikern in der Nähe dieses Phasenübergangs vom „neutralen“ zum „geladenen“ Vakuum am höchsten eingeschätzt. Hochgeladene schwere Ionen erschließen somit einen außerordentlich interessanten und zu den bisherigen Untersuchungen komplementären Testbereich für die QED.

Laserspektroskopie im ESR

Für die laserspektroskopischen Experimente müssen zunächst wasserstoffähnliche schwere Ionen erzeugt und im ESR gespeichert werden. Die Präparation des wasserstoffähnlichen Zustands geschieht dadurch, daß man die beim Einschub in das Synchrotron etwa siebzigfach geladenen Ionen auf mehr als 50 % der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und dann durch eine im Transferkanal zum ESR aufgestellte „Stripper“-Folie schießt. Dabei werden fast alle Hüllenelektronen abgestreift, und es entstehen mit einer Ausbeute von etwa 20% wasserstoffähnliche Ionen. Diese werden in den ESR gelenkt

und durch mehrfaches Wiederholen des Füllvorganges akkumuliert. Auf diese Weise kann man mehr als 100 Millionen solcher Ionen im ESR speichern.

Wie bei vielen anderen Experimenten im Speicherring kommt auch hier dem Elektronenkühler eine entscheidende Bedeutung zu (vgl. GSI-Nachrichten 4/96 und 1/97). Er liefert die für eine präzise Bestimmung der Übergangswellenlänge notwendige Strahlqualität. So kann durch die Elektronenkühlung die Geschwindigkeitsunschärfe der gespeicherten Ionen auf weniger als ein Hunderttausendstel der Umlaufgeschwindigkeit reduziert werden. Das beim Einschub in den ESR breite Geschwindigkeitsprofil wird so um mehr als zwei Größenordnungen verringert. Im Ruhesystem der Ionen entspricht dies einer Verringerung der Strahltemperatur. Der Ionenstrahl wird gekühlt.

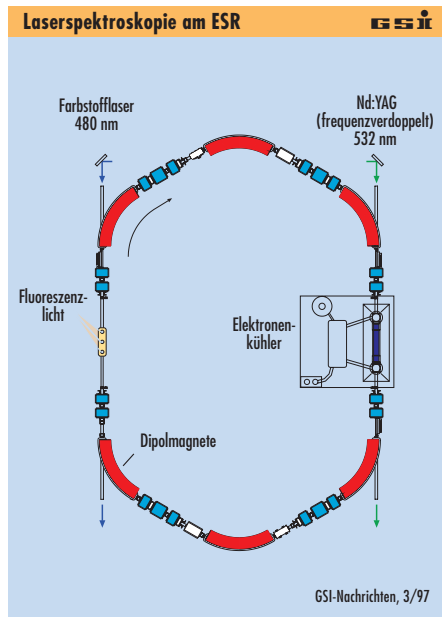


Abb. 2: Laserspektroskopie an hochgeladenen Ionen im ESR. Für die Messung an wasserstoffähnlichem Blei-207 wurden die Ionen mit Hochfrequenz zu zwei Paketen gebündelt. Die Anregung erfolgt durch Laserpulse, die entlang der geraden Strecken in Vorwärts- oder Rückwärtsrichtung eingestrahlt werden. Photomultiplier weisen das Fluoreszenzlicht nach, das im Vakuumrohr von einem Spiegelsystem gesammelt wird.

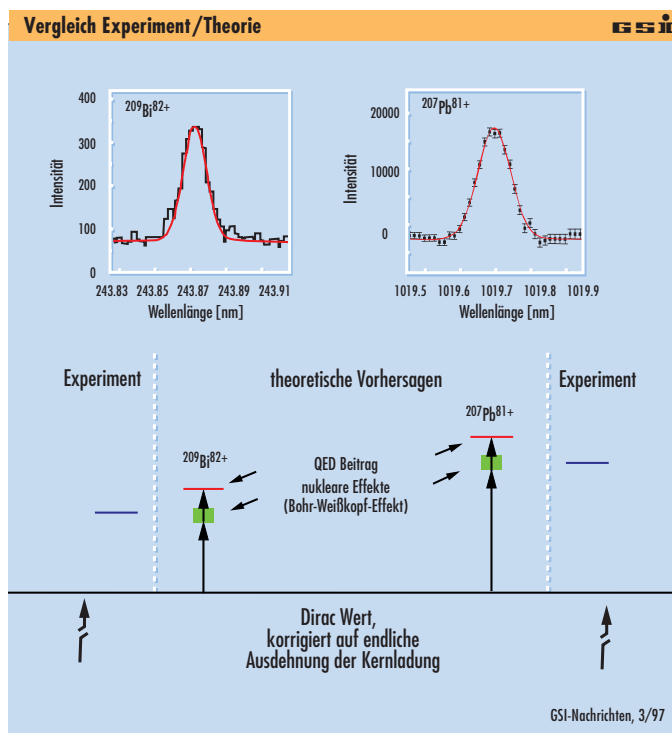


Abb. 3: Fluoreszenzresonanzkurven für $^{209}\text{Bi}^{82+}$ und $^{207}\text{Pb}^{81+}$ (oben) und Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit der Theorie (unten). Für den Vergleich wurden die für beide Systeme aufeinander normierten Dirac-Werte, korrigiert für die endliche Ausdehnung der Kernladung, als Ausgangspunkt gewählt (gemeinsame Basislinie). Die darauf fußenden Pfeile stellen Korrekturen aufgrund der endlichen Ausdehnung der Kernmagnetisierung (Bohr-Weißkopf-Effekt, grün) sowie der QED-Effekte (rot) dar. Der Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen (blaue Linien) zeigt für beide Systeme eine Abweichung in die gleiche Richtung. Der experimentelle Fehler ist kleiner als die Strichdicke, während die Unsicherheit in der theoretischen Vorhersage des Bohr-Weißkopf-Effekts als Fehlerband dargestellt ist.

Die Strahlkühlung ist unabdingbare Voraussetzung für eine präzise Messung der Übergangswellenlängen. Hierzu wird dem Ionenstrahl ein Laserstrahl überlagert. Durch Variation der Laserfrequenz oder der Ionengeschwindigkeit läßt sich nun die richtige Wellenlänge für die Anregung des Hyperfeinüberganges einstellen. Der Nachweis der Anregung erfolgt über das emittierte Fluoreszenzlicht, das mit empfindlichen Photomultipliern beobachtet wird. Der Experimentaufbau ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Nach jeder Füllung des ESR kann für etwa eine halbe Stunde gemessen werden. Diese Zeit ist durch die Strahllebensdauer im ESR limitiert, die für schwere Ionen aufgrund von Umladungsverlusten im Kühler etwa eine halbe bis zu einer Stunde beträgt.

Am ESR wurde bisher für zwei wasserstoffähnliche Ionen die Hyperfeinstrukturaufspaltung des Grundzustandes vermessen: für Wismuth-209 ($^{209}\text{Bi}^{82+}$) und für Blei-207 ($^{207}\text{Pb}^{81+}$). Im ersten Experiment an wasserstoffähnlichem $^{209}\text{Bi}^{82+}$ galt es, einen im ultravioletten Spektralbereich liegenden Über-

gang anzuregen. Dazu wurde das Laserlicht von vorne auf die Ionen gerichtet. Aufgrund des Dopplereffekts konnte die Wellenlänge des eingestrahlt Laserlichtes fast um einen Faktor zwei größer gewählt werden, als es der Resonanzwellenlänge im Ruhesystem der schnellen Ionen entspricht. Zur Anregung wurde ein gepulster Farbstofflaser verwendet, der von einem Excimerlaser optisch gepumpt wurde.

Abweichungen von der Theorievorhersage

Für $^{209}\text{Bi}^{82+}$ wurde eine Übergangswellenlänge von 243,87 Nanometern (nm) mit einem Fehler von 0,02 nm gefunden [1]. Die experimentellen Ergebnisse werden in Abbildung 3 mit den Theoriewerten verglichen. Die Messung an $^{209}\text{Bi}^{82+}$ war die erste Untersuchung der Hyperfeinstrukturaufspaltung des Grundzustandes an einem wasserstoffähnlichen schweren System überhaupt und brachte sogleich eine kleine Überraschung.

Verglichen mit der theoretischen Vorhersage war die beobachtete Über-

gangswellenlänge um etwa ein halbes Prozent kleiner, eine relativ deutliche Diskrepanz, die um einen Faktor zwei größer ist als die für den Theoriewert abgeschätzte Unsicherheit. Allerdings gehen in die Theorievorhersage und den zugehörigen Fehlerbereich nicht nur die QED-Beiträge ein. Bei der Berechnung der Hyperfeinaufspaltung müssen auch die endliche Kernaushdehnung sowie weitere nukleare Effekte berücksichtigt werden, was im Falle von $^{209}\text{Bi}^{82+}$ recht komplex ist.

Zur Vermeidung dieser Komplikation lag es also nahe, ein weiteres wasserstoffähnliches System zu untersuchen, bei dem diese kernphysikalischen Effekte besser unter Kontrolle sind. Hierfür erwies sich $^{207}\text{Pb}^{81+}$ als geeigneter Kandidat. Der Hyperfeinübergang liegt in diesem System im infraroten Bereich bei 1019,7 nm. Ursache hierfür sind das geringere magnetische Moment und der kleinere Drehimpuls des ^{207}Pb -Kernes im Vergleich zu $^{209}\text{Bi}^{82+}$. Experimentell ist der infrarote Spektralbereich wesentlich schwerer zugänglich, da Detektoren, die auf einzelne Photonen empfindlich sind, für dieses langwellige Licht nicht verfügbar sind. Ein weiteres Meßproblem stellt auch die erheblich längere Lebensdauer von ca. 50 Millisekunden dar, die ebenfalls aus der geringeren Hyperfeinaufspaltung resultiert.

Vor wenigen Monaten gelang am ESR auch dieses Experiment. Um das Verhältnis von Signal zu Untergrund zu verbessern, wurde diesmal der Ionenstrahl im Speicherring zu zwei Paketen gebündelt. Dies erlaubte es, die Ionen sehr viel effektiver mit einem gepulsten Laser anzuregen. Außerdem konnte durch Synchronisation des Lichtnachweises mit der Umlauffrequenz der Ionenpakete die effektive Untergrundzählrate der Detektoren weiter reduziert werden. Durch Verkippen der Spiegelflächen des im Vakuum des ESR installierten Spiegelsystems wurde vorzugsweise in Vorwärtsrichtung emit-



tiertes Licht auf die Detektoren projiziert. Von den schnellen Ionen nach vorne abgestrahltes Licht ist durch den Dopplereffekt zu kürzeren Wellenlängen verschoben, wodurch es in den Detektoren nachweisbar wird.

Für die Hyperfeinanregung wurde diesmal der grüne Laserstrahl eines frequenzverdoppelten Nd:YAG-Lasers ($\lambda = 532 \text{ nm}$) in Strahlrichtung mit den Ionen überlagert. Da die Wellenlänge dieses Lasers nur in einem sehr kleinen Bereich verstimmbar werden kann, erfolgte das Durchstimmen der Anregungswellenlänge über den Dopplereffekt durch Veränderung der Ionengeschwindigkeit. Auf diese Weise wurde für $^{207}\text{Pb}^{81+}$ eine Übergangswellenlänge von 1019,7 nm mit einem Fehler von 0,2 nm gefunden [2]. Der experimentelle Wert weicht wiederum um etwa 0,5% - und auch in gleicher Richtung - von der theoretischen Vorhersage ab.

Damit wurde für beide bisher untersuchte Systeme, $^{209}\text{Bi}^{82+}$ und $^{207}\text{Pb}^{81+}$, eine Diskrepanz zwischen beobachteter und berechneter Hyperfeinaufspaltung mit gleichem Vorzeichen gefunden. In absoluten Zahlen entsprechen die Abweichungen in etwa der Größe der jeweils berechneten QED-Korrekturen.

Blick in das ESR-Laserlabor: zur Anregung des Hyperfeinüberganges in wasserstoffähnlichem $^{207}\text{Pb}^{81+}$ wurde das grüne Licht eines frequenzverdoppelten Nd:YAG Lasers in Flugrichtung der Ionen eingestrahlt. Bei diesem System konnte der Übergang auch gleichzeitig in Gegenrichtung angeregt werden. Hierzu wurde das grüne Licht des Nd:YAG Lasers in einem sogenannten Optisch-Parametrischen-Oszillator (OPO) in einen roten und einen infraroten

Strahl umgewandelt. Zur Verbesserung der Frequenzschärfe des OPO wurde ein schmalbandiger Farbstoffloser benutzt. Die Anregung entgegen der Ionenstrahlrichtung erfolgte mit dem unsichtbaren infraroten Licht. Durch die gleichzeitige Messung in und entgegen der Ionenstrahlrichtung kann die Resonanzwellenlänge unabhängig von der genauen Kenntnis der Ionengeschwindigkeit bestimmt werden.

Es ist sicherlich noch zu früh, Mutmaßungen über mögliche Konsequenzen für die QED in starken Feldern anzustellen. Hierzu bedarf es der Untersuchung an weiteren Systemen, die für sich genommen und auch durch Vergleich untereinander eine noch klarere Unterscheidung zwischen QED- und nuklearen Beiträgen gestatten. Die bisherigen Ergebnisse haben jedoch ohne Zweifel das Interesse und die Spannung gesteigert, mit der die Physiker die Fortsetzung dieser Experimente verfolgen. ■

LITERATUR

- [1] I. Klaft et al., Phys. Rev. Lett. **73** (1994) 2425
 [2] P. Seelig et al., eingereicht bei Phys. Rev. Lett.