

übereinstimmen, kann das System Energie absorbieren. Dadurch erwärmt sich das Elektronensystem, was die Stuttgarter Physiker mit Lumineszenzmessungen nachwiesen. Der vorgegebene Wellenvektor lässt sich durch Interdigitalwandler mit unterschiedlicher Periode sowie durch die Anregung von Oberwellen in den Wandlern variieren.

Durch die zusätzliche Variation der Ladungsträgerkonzentration des zweidimensionalen Elektronengases änderte sich auch die magnetische Länge, bei der sich ein fraktionaler Füllfaktor beobachten ließ. Damit war es der Stuttgarter Gruppe möglich, eine genügende Zahl verschiedener Messungen durchzuführen und so die Minima in der Dispersion klar zu identifizieren (Abb.).

Diese Messungen bilden somit den ersten direkten Nachweis der lange vorhergesagten Magneto-

rotonminima. Da die Periode der Interdigitalwandler beschränkt ist, war es leider nicht möglich, alle für einen fraktionalen Füllfaktor erwarteten Minima zu detektieren. So konnten die Physiker für den Füllfaktor $2/5$ statt der zwei erwarteten Magnetorotonminima nur ein Minimum messen. Bei $3/7$ identifizierten sie nur zwei der drei Minima. Sicherlich sollte es nach dem ersten Erfolg in zukünftigen Experimenten gelingen, die Spektren zu komplettieren.

Dieses einzigartige Experiment stellt den Höhepunkt in einer äußerst erfolgreichen Zusammenarbeit der Arbeitsgruppe von Klaus von Klitzing mit Igor Kukushkin vom ISSP in Chernogolovka, Russland, dar. Seit mehr als 20 Jahren verbringt Igor Kukushkin fast jedes Jahr einige Monate in Stuttgart, um mittels optischer Experimente insbesondere den fraktionalen

Quanten-Hall-Effekt zu untersuchen. Unter der Vielzahl der dabei erzielten Resultate ist dieser erstmalige direkte Nachweis der Magnetorotonminima jedoch sicherlich das bedeutendste Ergebnis.

Rolf Haug

- [1] K. von Klitzing, G. Dorda und M. Pepper, Phys. Rev. Lett. **45**, 494 (1980)
- [2] D. C. Tsui, H. L. Störmer und A. C. Gosard, Phys. Rev. Lett. **48**, 1559 (1982)
- [3] C. Kallin und B. I. Halperin, Phys. Rev. B **30**, 5655 (1984); F. D. M. Haldane und E. H. Rezayi, Phys. Rev. Lett. **54**, 237 (1985); S. M. Girvin, A. H. MacDonald und P. M. Platzman, Phys. Rev. Lett. **54**, 581 (1985)
- [4] A. Pinczuk, B. Denis, L. N. Pfeiffer und K. West, Phys. Rev. Lett. **70**, 3983 (1993); J. Groshaus et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 046804 (2008)
- [5] U. Zeitler et al., Phys. Rev. Lett. **82**, 5333 (1999)
- [6] I. V. Kukushkin, J. H. Smet, V. W. Scarola, V. Umansky und K. von Klitzing, Science **324**, 1044 (2009)

Prof. Dr. Rolf Haug,
Institut für Festkörperphysik, Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 2, 30167 Hannover

■ Magie im Doppelpack

Mit dem Sauerstoffkern ^{24}O hat die Klasse der doppelt magischen Atomkerne Zuwachs erhalten.

In keinem Lehrbuch über Kernphysik dürfen die Zahlen 2, 8, 20, 28, 50, 82 und 126 fehlen. Diese „magischen“ Zahlen, zu denen mit Einschränkungen auch 40 und 64 zählen, markieren Protonen- und Neutronenzahlen, die zu besonders stabilen Atomkernen führen. Analog zur Konfiguration der Elektronen in Edelgasen stabilisieren große Energielücken zwischen Einteilchenorbitalen die magischen Atomkerne zusätzlich. Allerdings ergeben sich die Schalenabschlüsse in der Kernphysik nicht wie in der Atomphysik aus der regulären Sequenz der Orbitale. Stattdessen verschiebt die Spin-Bahn-Kopplung die Niveaus stark und sorgt für deren irreguläre Abfolge. Einziges und entscheidendes Kriterium für einen Schalenabschluss ist daher die Energielücke zwischen gefüllten Niveaus.

Besonders stabil sind doppelt magische Atomkerne, bei denen sowohl die Protonen- als auch die Neutronenzahl magisch ist. Sie sind

sehr wichtig, da sie sich meist als inerte Rumpfbetrachten lassen und so, analog zur Klassifikation der chemischen Elemente im Periodensystem von Mendelejew, die Anzahl der Valenznukleonen bestimmen. Diese legen wiederum die Kernstruktur fest. Anders als bei den chemischen Elementen und den Elektronen existieren im Atomkern mit Protonen und Neutronen zwei Teilchensorten und somit zwei Valenzzahlen. Sind beide klein, so entspricht die Struktur des Atomkerns stark dem Einteilchencharakter des Schalenmodells mit Restwechselwirkungen zwischen allen Valenznukleonen. Ist eine Valenzzahl klein und die andere groß, zeigen die Atomkerne eher kollektive Eigenschaften, die sich z. B. sehr gut als Schwingungen eines sphärischen Tröpfchens aus Quantenflüssigkeit beschreiben lassen. Sind beide Valenzzahlen groß, ändert sich die Struktur wieder, da der Atomkern eine Quadrupol-Deformation besitzt. Kollektive Schwin-

gungen und die Rotation des gesamten Atomkerns beschreiben dann die Kernstruktur. Innerhalb der Vielfalt an Isotopen mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften sind die doppelt magischen Kerne die Leuchttürme der Kernphysik.

Da alle stabilen Atomkerne jenseits von ^{40}Ca mehr Neutronen als Protonen enthalten, gibt es nur fünf doppelt magische stabile Isotope: ^4He , ^{16}O , ^{40}Ca , ^{48}Ca und ^{208}Pb . Hin-

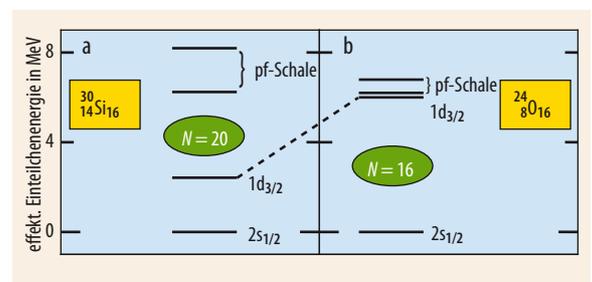


Abb. 1 Während sich bei dem Kern ^{30}Si erwartungsgemäß eine Energielücke oberhalb des $1d_{3/2}$ -Neutronenorbitals auftut und daher der Schalenabschluss bei 20 Neutronen auftritt (a), ist die Energie dieses Orbitals bei ^{24}O deutlich größer, sodass die Energielücke darunter und der Schalenabschluss bei $N = 16$ liegt (b). Daher ist bei gleicher Neutronenzahl (16) ^{24}O magisch, ^{30}Si aber nicht [4].

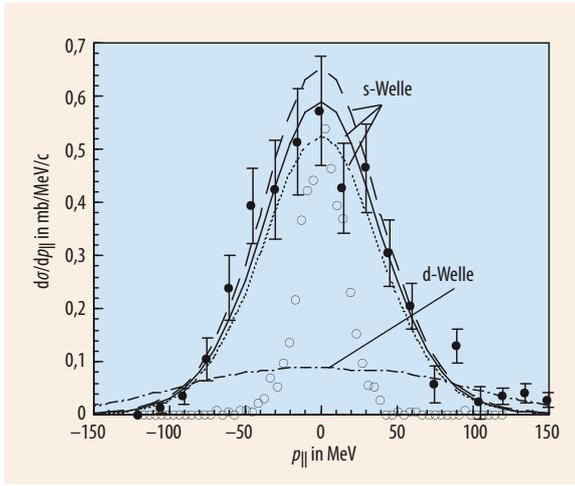


Abb. 2 Die gemessene Verteilung des Parallelimpulses $p_{||}$ von ^{23}O und der Vergleich mit gerechneten Verteilungen für s- und d-Orbitale zeigt, dass der Grundzustand von ^{24}O aus Nucleonen im s-Orbital besteht und es keinen Beitrag eines d-Orbitals gibt. Die offenen Kreise deuten die Impulsauflösung an.

+) Diese Nucleonen mit entgegengesetztem Spin und Isospin bei gleichem Bahn-Drehimpuls bilden die sog. Spin- und Isospin-Partner.

#) 1 AGeV bedeutet, dass die Energie 1 GeV mal der Zahl der Nucleonen A beträgt.

Prof. Dr. Jan Jolie und Prof. Dr. Peter Reiter, Institut für Kernphysik, Universität zu Köln, Zülpicher Str. 77, 50937 Köln.

gegen gibt es viele stabile Atomkerne mit nur einer magischen Zahl, z. B. hat bereits Sn ($Z = 50$) zehn stabile Isotope. Während die magischen Zahlen für stabile Atomkerne und ihre unmittelbare Nachbarschaft sehr gut etabliert sind, ist die Situation weniger klar für instabile, sehr neutronenreiche Kerne. Diese Kerne entstehen in Supernovaexplosionen, und die entsprechenden magischen Zahlen sind essenziell, um die Synthese schwerer Elemente jenseits von Eisen und Kobalt zu beschreiben. Unklar ist bei diesen Atomkernen, wie die sehr leicht gebundenen äußeren Neutronen die Schalenstruktur beeinflussen.

Früher war es nur durch Spaltung möglich, neutronenreiche Isotope zu erzeugen. Es zeigte sich, dass die leichten Zirkonium-Isotope ($Z = 40$) einen deutlichen Einteilchencharakter bis zur Neutronenzahl $N = 58$ aufweisen [1]. Überraschenderweise verändern sich die schwereren Isotope jedoch abrupt in deformierte Atomkerne, als ob es den Schalenabschluss bei $Z = 40$ nicht mehr gebe und sich die Protonenvalenzzahl schlagartig von null auf zehn ändere. Diese dramatische Änderung lässt sich aufgrund der Wechselwirkung zwischen Protonen und Neutronen und dem sog. Federman-Pittel Mechanismus erklären [2]. Wenn die Neutronen anfangen, das $1g_{7/2}$ -Orbital zu besetzen, sinkt die Einteilchenenergie der $1g_{9/2}$ -Protonen dramatisch⁺, sodass

$Z = 50$ statt $Z = 40$ den Schalenabschluss formt. Der Schalenabschluss ist daher nicht mehr eine statische Eigenschaft, sondern ändert sich dynamisch je nach der Besetzung der Orbitale. Solche von der Wechselwirkung zwischen Protonen und Neutronen induzierte Effekte gibt es in der Elektronenhülle nicht.

Ein wichtiger Indikator für einen Schalenabschluss ist die Separationsenergie, das nukleare Äquivalent zur atomaren Ionisierungsenergie. Motiviert durch die Analyse von Neutronenseparationsenergien [3] nutzten T. Otsuka und Mitarbeiter eine Art inversen Federman-Pittel-Mechanismus und machten die Vorhersage, dass ^{24}O ein doppelt magischer Kern mit der neuen exotischen, magischen Zahl $N = 16$ sein sollte [4]. Dies ist nur möglich, da im Sauerstoff die Protonen das $1d_{5/2}$ -Orbital nicht besetzen und daher nicht mehr mit dem Partnerneutron im $1d_{3/2}$ -Orbital wechselwirken können. Als Folge davon steigt die effektive Einteilchenenergie des $1d_{3/2}$ -Orbitals mit seinen vier Neutronen rasant an. Der $N = 20$ -Schalenabschluss wird somit durchbrochen, und ein neuer Abschluss mit $N = 16$ entsteht, nachdem das $2s_{1/2}$ -Orbital besetzt ist (Abb. 1).

Ionenstrahlen aus instabilen Kernen ermöglichen Kernphysikern heute den Zugang zu einer viel größeren Anzahl von exotischen Atomkernen mit ungewöhnlicher Zusammensetzung. Eine wichtige Frage in diesem Zusammenhang ist die nach der Gültigkeit bzw. Modifikation des Schalenmodells fernab der Stabilität. Ein kürzlich am Fragmentseparator FRS der GSI in Darmstadt durchgeführtes Experiment hat nun gezeigt, dass mit dem schwer zugänglichen Isotop ^{24}O ein neuer doppelt magischer Kern bei $Z = 8$ und $N = 16$ vorliegt. Die Experimentatoren um R. Kanungo haben dazu einen sekundären Strahl des interessierenden ^{24}O nach Fragmentationsreaktionen mit einem relativistischen, primären ^{48}Ca -Strahl von 1 AGeV Energie^{#)} erzeugt [5]. Mit einer verschwindend kleinen Strahlintensität von lediglich drei Ionen pro Sekunde gelang es der Gruppe, die longitudinale Impuls-

verteilung der Neutronen in ^{24}O zu vermessen. Nach der Entfernung von einem Neutron in einer sekundären Reaktion wird das entstandene Reaktionsprodukt ^{23}O eindeutig mit dem FRS identifiziert und von den anderen Reaktionskanälen abgetrennt. Der Parallelimpuls von ^{23}O bei kinetischen Energien von mehr als 500 AMeV nach der Reaktion hängt davon ab, welches Orbital das entfernte Neutron besetzt hat. Dabei ist zu beachten, dass ^{24}O sowie ^{23}O lediglich schwach gebunden sind und beide keine angeregten, gebundenen Zustände besitzen. Abb. 2 zeigt, dass die hervorragende Impulsauflösung ($\Delta p/p \sim 10^{-4}$) des Separators einen direkten Einblick in die Wellenfunktion des Kerns und eine klare Unterscheidung zwischen den theoretisch möglichen s- und d-Wellenanteilen in ^{24}O erlaubt. Das Ergebnis stimmt sehr gut mit einem fast reinen, sphärischen $2s_{1/2}$ -Neutronenorbital überein, das den Grundzustand von ^{24}O bestimmt. Eine erhebliche Energielücke zwischen den 16 gebundenen Neutronen und den $d_{3/2}$ -Neutronen verschiebt den neuen Schalenabschluss zu $N = 16$ statt $N = 20$.

Das Ergebnis bestätigt die theoretischen Arbeiten von Otsuka in den leichten Kernen der sd-Schale. In zukünftigen Messungen gilt es, die Konsequenzen dieser Wechselwirkung in schwereren Atomkernen mit extrem asymmetrischem Verhältnis von Neutronen zu Protonen zu untersuchen. Diese Fragen werden in Zukunft in Darmstadt mithilfe der neuen Beschleunigeranlage FAIR und dem dedizierten NUSTAR-Experimentierprogramm mit exotischen Atomkernen angegangen. Die spannende Geschichte von ^{24}O gibt bereits jetzt einen sehr schönen Eindruck von den zu erwartenden Ergebnissen.

Jan Jolie und Peter Reiter

- [1] E. Cheifetz et al., Phys. Rev. Lett. **25**, 38 (1970)
- [2] P. Federman und S. Pittel, Phys. Lett. B **69**, 385 (1977)
- [3] A. Ozawa et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 5493 (2000)
- [4] T. Otsuka et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 082502 (2001)
- [5] R. Kanungo et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 152501 (2009)