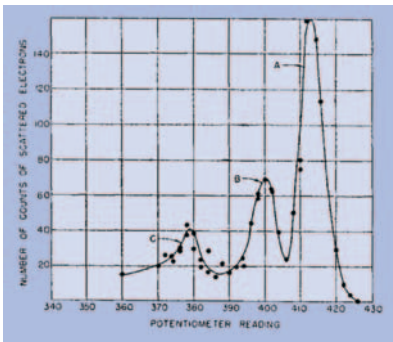


Der Kernstruktur auf der Spur

In den vergangenen 50 Jahren hat die unelastische Elektronenstreuung an Atomkernen wesentlich zum Verständnis der Kernstruktur beigetragen.

Am 15. Mai 1954 erschien in der Zeitschrift *Physical Review* ein Artikel von J. A. McIntyre, B. Hahn und R. Hofstadter [1], in dem erstmals die Anregung von Zuständen in einem Atomkern (^9Be) mit Hilfe der Elektronenstreuung beschrieben wurde. Die Abbildung links zeigt ein Energiespektrum dieses historischen Experiments an der Stanford University, bei dem Rotationszustände bei 2,6 MeV und 6,7 MeV angeregt und identifiziert wurden. In den vergangenen 50 Jahren hat die Methode der unelastischen



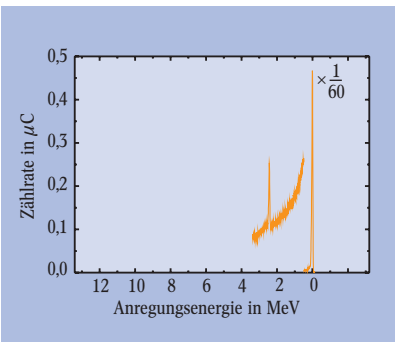
Beim historischen Spektrum von J. A. McIntyre et al. [1] zur unelastischen Streuung von 190-MeV-Elektronen am Kern ^9Be wurde eine Energieauflösung von etwa 1 MeV erreicht (links). Die mit A gekennzeichnete Linie korrespondiert zur elastischen Streuung der Elektronen, während B und C den Rotationszuständen bei 2,6 und 6,7 MeV entsprechen.

Elektronenstreuung eine zentrale Rolle für das Verständnis der Struktur von Kernen gespielt.

Bei Elektronen handelt es sich um die reinste zur Verfügung stehende Probe zum Studium der Kernstruktur. Die dem Streuprozess zugrunde liegende elektromagnetische Wechselwirkung ist wohlverstanden, sodass sich ihre Beiträge zum beobachteten Streuquerschnitt von den intrinsischen Eigenschaften der Kernanregung klar trennen lassen – ein Problem, das für Streuexperimente mit Hadronen bis heute nur unbefriedigend gelöst ist. Ähnlich wie die unelastisch gestreuten Elektronen am Nukleon Aufschluss über seine Substruktur liefern, d. h. die Verteilung der Quarks und Gluonen, dienen sie auch in Kernen als Sonde der inneren Struktur. Die aus den Experimenten gewonnenen Verteilungen von Ladung und Strom im

Kerninneren geben ein detailliertes Bild der Dynamik unterschiedlicher Anregungsmoden des Kerns.

In den vergangenen 50 Jahren gelang es, die experimentelle Energieauflösung enorm zu verbessern und damit viele wichtige Erkenntnisse zur Kernstruktur zu erzielen. Der rechte Teil der Abbildung zeigt eine vergleichbare Messung an ^9Be , ausgeführt am supraleitenden Darmstädter Elektronenlinearbeschleuniger S-DALINAC mit einem modernen Nachweissystem, das aus einem so genannten Energieverlustspektrometer und einem Silizium-Streifenzähler besteht, der hohe Datenraten erlaubt. Während im historischen Experiment [1] eine Halbwertsbreite der Linien von etwa 1 MeV erreicht wurde, ermöglicht ein solches System Auflösungen bis hinunter zu 30 keV!



den bei 2,6 und 6,7 MeV entsprechen. Im Vergleich dazu lässt sich heute eine Auflösung von etwa 30 keV erzielen (rechts). In dem Experiment am S-DALINAC wurde die Struktur bei 6,7 MeV nicht untersucht, da es sich um eine Resonanz mit einer intrinsischen Breite von etwa 1,5 MeV handelt.

Im Folgenden seien (ohne jeden Anspruch auf Vollständigkeit) einige Beispiele der Bedeutung der unelastischen Elektronenstreuung für das Verständnis der Struktur von Kernen genannt:

► Bereits seit den 40er-Jahren ist eine kollektive Kernanregung bekannt, bei der Protonen und Neutronen gegenphasig schwingen (sog. isovektorielle Dipolriesenresonanz). Im Jahre 1972 gelang in Streuexperimenten an einem Cer-Target [2] am normalleitenden Darmstädter Elektronenlinearbeschleuniger DALINAC erstmals der Nachweis einer weiteren Resonanz, der so genannten isoskalaren Quadrupolriesenresonanz, bei der Protonen und Neutronen gleichphasig schwingen. Diese Entdeckung hatte die Beobachtung einer ganzen Klasse weiterer derartiger kollektiver Anregungen zur Folge.

► Neben den Riesenresonanzen, die man auch als kollektive Teilchen-Loch-Anregungen ansehen kann, gelang es in Experimenten an den Elektronenbeschleunigern des Bates-Laboratoriums am MIT und am NIKHEF, Amsterdam, auch einfache Teilchen-Loch-Anregungen, sog. „gestreckte“ Zustände, zu beobachten, deren Gesamtdrehimpuls zum maximal möglichen Wert gekoppelt ist. Damit wurde es möglich, die Eigenschaften von elektromagnetischen Übergängen mit extrem hohen Multipolen wie M14, E12 usw. zu untersuchen [3]. Die Vermessung von Rotationsbanden lieferte andererseits ein detailliertes Bild der Form deformierter schwerer Kerne im Grundzustand [4].

► Vor rund 20 Jahren wurde ebenfalls am DALINAC in schweren deformierten Kernen und bei niedrigen Anregungsenergien eine kollektive magnetische Dipolanregung – die sog. „Scherenmode“ – entdeckt, bei der Neutronen und Protonen scherenartig gegeneinander schwingen [5]. Dies führte zu einer Renaissance und systematischen Weiterentwicklung kollektiver wie auch mikroskopischer Modelle der Niederenergie-Kernstruktur. Inzwischen ist diese Mode nicht nur in einer Vielzahl von Kernen systematisch nachgewiesen [6], sondern wird als globales Phänomen generell in Vielkörpersystemen (Festkörper, Metallcluster, Quantendots, Bose-Einstein- und Fermi-Kondensate) vorhergesagt. Beispielsweise wurde sie kürzlich in Bose-Einstein-Kondensaten beobachtet [7].

► Die insbesondere in den letzten zwei Jahrzehnten entwickelten neuartigen Beschleuniger mit kontinuierlichem Elektronenstrahl ermöglichen inzwischen Koinzidenzexperimente, bei denen zusätzlich zum gestreuten Elektron emittierte Nukleonen N oder leichte Ionen nachgewiesen werden können. Derartige Experimente vom Typ (e,e'N), die z. B. an den Elektronenbeschleunigern am NIKHEF oder am MAMI in Mainz bei Energien von einigen hundert MeV durchgeführt wurden, lieferten entscheidende Erkenntnisse über die Impulsverteilung der Nukleonen im Kern in der Nähe der Fermi-Oberfläche, die durch Vielteilchenkorrelationen der starken Wechselwirkung signifikant beeinflusst wird [8].

► Auch Koinzidenzexperimente bei niedrigen Elektronenenergien eröffnen einmalige Möglichkeiten der

Spektroskopie von Atomkernen, da es der gleichzeitige Nachweis des unelastisch gestreuten Elektrons und eines Neutrons, Protons usw. aus dem Zerfall des Kontinuums erlaubt, den Untergrund durch Bremsstrahlprozesse (den sog. „Strahlenschwanz“) fast vollständig zu unterdrücken. Die Energie- und Winkelabhängigkeit der emittierten Teilchen liefert darüber hinaus wichtige Erkenntnisse über den speziellen Charakter der Zerfallsmechanismen [9].

Im Zuge eines Trends zu immer höheren Energien hat sich auch das Interesse an den meisten Kernphysik-Elektronenbeschleunigern auf eine Untersuchung der Struktur des Nukleons verschoben. Beispiele hierfür sind der Elektronenbeschleuniger MAMI an der Universität Mainz – demnächst mit Energien bis zu 1,5 GeV – und an der Thomas Jefferson National Accelerator Facility in Newport News in den USA, derzeit mit Energien bis zu 6 GeV. Der einzige Elektronenbeschleuniger weltweit, dessen Forschungsprogramm sich zur Zeit auf Fragen der Kernstruktur und ihre astrophysikalische Relevanz (siehe z. B. [10]) konzentriert, ist der S-DALINAC in Darmstadt. Die ungebrochene Bedeutung dieser Arbeiten spiegelt sich wider

in der Einrichtung eines Sonderforschungsbereichs (SFB 634) der DFG im Jahre 2003 für das Forschungsprogramm am S-DALINAC. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse und Methoden sind auch von besonderer Bedeutung für das im Rahmen des Ausbaus der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI)* geplante Projekt eines Elektron-Ion-Kolliders, dessen Ziel die Untersuchung der Struktur exotischer, radioaktiver Kerne ist.

PETER VON NEUMANN-COSEL
UND ACHIM RICHTER

*) siehe Physik Journal, Februar 2003, S. 6

Priv.-Doz. Dr. Peter von Neumann-Cosel, Prof. Dr. Achim Richter, Institut für Kernphysik, Technische Universität Darmstadt, Schloßgartenstr. 9, 64289 Darmstadt

- [1] J. A. McIntyre, B. Hahn und R. Hofstadter, Phys. Rev. **94**, 1084 (1954)
- [2] R. Pitthan und T. Walcher, Phys. Lett. **B36**, 563 (1971)
- [3] R. A. Lindgren et al., Phys. Rev. Lett. **42**, 1524 (1979)
- [4] T. Cooper et al., Phys. Rev. **C13**, 1083 (1976)
- [5] D. Bohle et al., Phys. Lett. **B137**, 27 (1984)
- [6] J. Enders et al., Phys. Rev. **C59**, R1851 (1999)
- [7] O. M. Maragò et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 2056 (2000)
- [8] A. E. L. Dieperink und P. K. A. de Witt Huberts, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **40**, 239 (1990)
- [9] S. Strauch et al., Phys. Rev. Lett. **85**, 2913 (2000)
- [10] K. Langanke und G. Martínez-Pinedo, Rev. Mod. Phys. **75**, 819 (2003)

Eine perfekte Linse für Linkshänder

Während die Auflösung gewöhnlicher Linsen aufgrund der Beugung inhärent begrenzt ist, sind in den vergangenen Jahren Ideen für „perfekte“ Linsen entwickelt worden, die diese Grenze überwinden. Ermöglichen sollen das sog. linkshändige Metamaterialien: links-händig, weil in ihnen die

gewöhnliche Rechte-Hand-Regel für elektrisches, magnetisches Feld und Wellenvektor durch eine Linke-Hand-Regel ersetzt wird, Metamaterialien, weil sie aus periodisch angeordneten „Einheitszellen“ bestehen, die kleiner sind als die Wellenlänge der betrachteten elektromagnetischen Strahlung. Die „Linkshändigkeit“ rührt daher,

dass in diesen Materialien sowohl die Permeabilität μ als auch die Permittivität ϵ negativ sind. In Toronto ist es Physikern nun ge-

lungen, mithilfe einer „Linse“, die aus einem Leitergitter mit eingesetzten Kondensatoren (C) und Spulen (L) besteht, die Beugungsgrenze zu überwinden.

Zum Nachweis tasteten sie das Bild einer Quelle (source), die Strahlung der Frequenz 1,057 GHz emittierte, mit einer beweglichen Antenne (probe) ab. Neben perfekten Linsen eignen sich linkshändige Materialien auch für Mikrowellen-Bauelemente wie Filter und Resonatoren. (A. Grbic und G. V. Eleftheriades, Phys. Rev. Lett. **92**, 117403 (2004))

