

Magische und ausgezeichnete Zahlen

Die Entdeckungsgeschichte des Schalenmodells der Atomkerne

Karen E. Johnson

Das Kernschalenmodell – ein Schema, das äußerst erfolgreich die Eigenschaften stabiler Kerne voraussagt – hat seinen Ursprung in der Chemie und der Geochemie. Im Folgenden gehe ich auf die Rolle ein, die Chemiker und ihre Messdaten bei der gleichzeitigen und voneinander unabhängigen Entdeckung des Schalenmodells in Deutschland und den Vereinigten Staaten spielten.

Im Atommodell von Bohr und Pauli wird die Kraft auf ein Elektron durch ein Potential beschrieben, das seine Wechselwirkung mit dem Atomkern und allen anderen Elektronen des Atoms beschreibt. Die Bohrschen Bedingungen für die zulässigen Elektronenbahnen und das Pauli-Prinzip erklären, warum bestimmte abgeschlossene Elektronenschalen besonders stabil sind. Im Gegensatz dazu gibt es für den Atomkern zwei verschiedene Ansätze. Einmal kann man ihn als homogenen Materietropfen betrachten, ähnlich einem Flüssigkeitstropfen, oder man beschreibt ihn, ähnlich wie die Elektronen beim Bohr-Pauli-Modell, als eine Ansammlung diskreter Teilchen. Die einzelnen Nukleonen (Neutronen oder Protonen) werden im letztgenannten Fall als voneinander unabhängige Teilchen betrachtet, denen man eigene Energieniveaus, Spin und Drehimpuls zuordnen kann und die sich in einem Potential bewegen, das von allen übrigen Nukleonen im Kern erzeugt wird. Dies ist die Grundlage des Kernschalenmodells. In diesem Modell wird die Wechselwirkung zwischen einzelnen Nukleonen gegenüber dem zentralen Kernpotential vernachlässigt. Ähnlich wie beim Bohrschen Atommodell fand man als frühesten Nachweis für das Kernschalenmodell die besondere Stabilität von Kernen mit einer bestimmten Zahl von Protonen oder Neutronen: 2, 8, 20, 28, 50 oder 126. Dieses Muster basierte auf der Messung von Kern-Bindungsenergien, dem Isotopenvorkommen und den Energien radioaktiver



Zwei der Pionierarbeiten zum Kernschalenmodell von Maria Goeppert Mayer [2] bzw. Hans Jensen, Hans Suess und Otto Haxel [14].

Zerfälle. Die Befunde legten nahe, dass die nuklearen Energieniveaus auf ähnliche Weise besetzt werden wie die Energieniveaus der Elektronenhülle. Allerdings stimmte die experimentell ermittelte Zahl der Nukleonen in einer voll besetzten Schale nicht mit den gängigen quantenmechanischen Rechnungen für Zentralpotentiale überein.

Im Jahr 1949 entdeckten Maria Goeppert Mayer in den Vereinigten Staaten und unabhängig von ihr Hans Suess, Hans Jensen und Otto Haxel in Deutschland die Lösung dieses Rätsels. Der Schlüssel lag in der Annahme, dass die Energieniveaus des Nukleons durch eine starke Spin-Bahn-Wechselwirkung aufgespalten werden. Zwar gibt es auch für die Elektronen in der Atomhülle eine solche Spin-Bahn-Kopplung, aber die dadurch bedingte Energieaufspaltung ist im Vergleich zur gesamten Bindungsenergie im Zentralpotential so klein, dass sie in der Regel vernachlässigt wird. Eine Ausnahme sind sehr schwere Kerne. Bis 1949 gingen deshalb die Kernphysiker davon aus, dass dies auch bei den Nukleonen des Kerns der Fall ist.

Charakteristisch für das Kernschalenmodell ist demnach

- eine Schalenstruktur, die aus dem Nachweis der Stabilität bestimmter Kerne folgt und die zu der grundlegenden Annahme führt, dass der Kern durch ein Ein-Teilchen-Modell beschrieben werden kann, sowie
- die Annahme einer starken Spin-Bahn-Wechselwirkung der Nukleonen, mit der sich die Aufspaltung ihrer Energieniveaus erklären lässt.

Im Folgenden möchte ich zeigen, wie die Schalenstruktur aus der Betrachtung chemischer, geochemischer und kernphysikalischer Daten aus dem Blickwinkel des Chemikers hergeleitet wurde, und zwar sowohl in der Arbeit von Maria Goeppert Mayer als auch in der Arbeit von Haxel, Jensen und Suess.

Die frühe Geschichte des Schalenmodells

Als die erste erfolgreiche Deutung der Kernschalen 1949 unabhängig von Maria Goeppert Mayer und auch von Otto Haxel, Hans Jensen und Hans Suess veröffentlicht wurde, hatte das Modell bereits eine sechzehn Jahre alte Geschichte, die eng mit der Suche nach einem Ordnungsschema für Kerne verknüpft war. Das erste wirkliche Kernmodell entwickelte Walter Elsasser zusammen mit Kurt Guggenheimer

in den Jahren 1933/34. Beide waren Flüchtlinge aus Nazi-Deutschland: Guggenheimer ein Physiko-Chemiker und Elsasser ein theoretischer Atomphysiker. Sie trafen sich 1933 in Paris, kurz nachdem Chadwick das Neutron entdeckt hatte, und beide interessierten sich für die innere Struktur der Atomkerne, die sie anhand der Kern-Bindungsenergien untersuchten.

In der Hoffnung, für Atomkerne ein Analogon zum Periodensystem zu konstruieren, versuchte Guggenheimer ein regelmäßiges Muster in Bezug auf die Zahl der Protonen und Neutronen zu finden. Seine Analyse stützte sich auf die Kernbindungsenergien (die sich aus Messungen der Kernmassen ergaben) und das Isotopenvorkommen. Er wies nach, dass bestimmte Werte der Protonen- oder Neutronenzahl dem Kern eine ungewöhnliche Stabilität zu verleihen schienen und schlug daher abgeschlossene Kernschalen vor. Auf diese Weise identifizierte er voll besetzte Schalen für $N = 50$ und 82 sowie $N = 28$. Der Nachweis für abgeschlossene Schalen bei $Z = 50$ und 82 war weniger zwingend, sodass Guggenheimer das Zusammenfallen der Werte für Z und N als bloße Koinzidenz ansah.

Zur gleichen Zeit versuchte Elsasser eine Theorie zu formulieren, mit der sich erfolgreich die beobachteten Kernschalen leichter Kerne mit den Kernladungszahlen 2, 8, 18 und 32 erklären ließen. Guggenheimers Identifikation der Zahlen $N = 50$ und 82 folgend, erweiterte Elsasser seine Theorie auch für schwerere Kerne. Er versuchte das zentrale Kernpotential so zu modifizieren, dass aus quantenmechanischen Rechnungen höhere Teilchenzahlen pro Schale folgten, als diejenigen, welche für Elektronen in einem Coulomb-Potential gelten. Um die höheren Besetzungszahlen zu erhalten, versuchte er Störungsrechnung sowohl mit einem endlichen Kastenpotential als auch mit einem kugelsymmetrischen Potential unendlicher Reichweite. Unglücklicherweise schien es, als würde jedes Potential abgeschlossene Kernhüllen bei 2, 8 und 20 Teilchen ergeben, aber keines konnte die Besetzungszahlen der höheren Kernschalen vorhersagen.

Der stärkste Widerspruch zu dieser frühen Form des Kernschalenmodells kam von Niels Bohr. Er formulierte ihn im Zusammenhang mit der Entwicklung seines Compound-

Kernmodells. Bohr argumentierte, dass alle Messungen der Kernkräfte auf eine Sättigung hin deuten; das heißt, dass die Kräfte zwischen zwei beliebigen Teilchen von der gleichen Größenordnung sind wie die Kraft zwischen dem gesamten Kern und einem einzelnen Teilchen. Bohr zufolge war es nicht möglich, einzelne Nukleonen als unabhängige Teilchen zu behandeln und ihnen eine eigene Energie, einen Drehimpuls oder ein magnetisches Moment zuzuschreiben. Damit wäre das Konzept der Kernschalen ungültig. Bohr erweiterte das Tröpfchen-Modell von Gamow zu seinem Compound-Kernmodell, das nach seiner mathematischen Formulierung durch



Abb. 1:
Maria Goeppert Mayer (1906–1972)

Breit und Wigner für Kernphysiker, die sich mit der Kernspaltung befassten, bald zum Modell der Wahl wurde. Damit fanden die Versuche, ein Kernschalen-Modell zu formulieren, zunächst ein Ende. Mehr als zehn Jahre (von 1936 bis 1949) gingen Physiker von der Annahme aus, dass Atomkerne keine eigene Schalenstruktur haben konnten (obwohl das Modell unabhängiger Teilchen als mathematisches Hilfsmittel genutzt wurde, um die Größe der Kernkräfte und -Energien abzuschätzen zu können) [1].

Maria Goeppert Mayers Weg zum Schalenmodell

Maria Goeppert (1906–1972) (Abb. 1) wuchs in der Universitätsstadt Göttingen auf und schrieb ihre Doktorarbeit an der Georgia Augusta Universität unter der Leitung Max Borns. Als sie 1930 in die Vereinigten Staaten ging, verfügte sie über eine bessere Ausbildung in der Quantenmechanik als die überwiegende Mehrheit der amerikanischen

Physiker. Insbesondere beherrschte sie die Matrizen-Mechanik und hatte einen sehr formalen, mathematischen Zugang zur Physik.

Goepfert verließ Deutschland in Begleitung ihres frisch angetrauten Ehemannes, dem amerikanischen Physiko-Chemiker Joseph Mayer. Mayer hatte bei G. N. Lewis an der University of California in Berkeley studiert und als Rockefeller-Stipendiat bei James Franck in Göttingen gearbeitet. Das Ehepaar Mayer ging an die John Hopkins Universität in Baltimore, Maryland. Maria hatte dort zwar keine reguläre Anstellung als Mitglied der Fakultät, aber neun Jahre lang arbeitete sie mit den dortigen Chemikern zusammen, die um ihre Hilfe bei der Untersuchung komplexer chemischer Systeme baten. Am bekanntesten wurde sie durch eine gemeinsame Veröffentlichung mit Alfred Sklar, in der beide die Energieniveaus von Benzol mit Hilfe der Gruppentheorie und der Hund-Mulliken-Methode berechneten. Um 1940 wurde Goepfert Mayer meist als theoretische Spektroskopikerin angesehen, und viele in der scientific community hielten sie für eine Chemikerin.

Dieser Eindruck wurde durch Goepfert Mayers Mitarbeit am Manhattan-Projekt während des Zweiten Weltkrieges verstärkt. Zu dieser Zeit waren sie und ihr Ehemann nach New York übergesiedelt, wo Joe an der Columbia Universität arbeitete, Maria aber wieder keine bezahlte Stelle bekam. Während des Krieges arbeitete sie in der Gruppe von Harold Urey an Methoden zur Trennung der Uran-Isotope. Ihr Hauptbeitrag war eine theoretische Analyse der Spektren verschiedener Uranverbindungen.

Nach dem Krieg folgten Maria Goepfert Mayer und ihr Ehemann einem Ruf an das Institute for Nuclear Studies an der Universität von Chicago, wo sie die Stellung eines Voluntary Associate Professor (freiwilliger a. o. Univ. Prof.) erhielt. Hier hatte sie erstmals Gelegenheit, auf dem Gebiet der Kernphysik zu arbeiten. Während sie mit Edward Teller an einer Theorie über den Ursprung der Elemente arbeitete und dazu die von V. M. Goldschmidt zusammengestellten Isotopenhäufigkeiten untersuchte, entdeckte sie das Phänomen, das wir unter dem schillernden Namen der „magischen Zahlen“ kennen – dass nämlich bestimmte Zahlen von Protonen oder Neutronen (2, 8, 20, 28, 50 oder

82) einem Kern besondere Stabilität verleihen. (Die Bezeichnung wurde von Eugen Wigner geprägt, der damit seiner Skepsis über das Phänomen Ausdruck verleihen wollte.) Dieses Muster wiederholte sich bei einer Vielzahl verschiedener Isotopen, und Goeppert Mayer

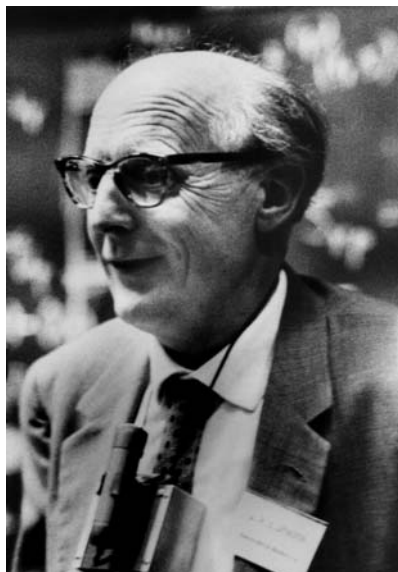


Abb. 2:
Hans Daniel Jensen (1907–1973)

sammelte weitere Belege, indem sie Kernbindungsenergien und radioaktive Zerfallsenergien analysierte. Sie versuchte ihre Beobachtungen im Sinne nuklearer Energieniveaus oder Schalen zu verstehen, konnte aber mit Hilfe der üblichen quantenmechanischen Methoden nicht die korrekte Anzahl der Nukleonen ermitteln. Frustriert über das Fehlen einer adäquaten Theorie, sammelte sie dennoch weiterhin Daten, die ihren Befund erhärteten [2].

Bei ihren Untersuchungen des Kerns kam Goeppert Mayer zu Gute, dass sie mit vielen der 1947 für allgemein gültig gehaltenen Annahmen der Kernphysiker nicht vertraut war. Insbesondere kannte sie nicht die von den meisten ihrer Kollegen akzeptierten Argumente gegen die mögliche Existenz von Kernschalen. Die Phänomenologie der magischen Zahlen war ihr so vertraut, dass sie, als Enrico Fermi sie Anfang 1949 fragte, ob sie schon Spin-Bahn-Kopplungseffekte im Kern in Betracht gezogen hätte, sofort erkannte, dass dies ihre magischen Zahlen erklären konnte. Wenn die Spin-Bahn-Kopplung für die Protonen und Neutronen des Kerns wesentlich stärker war als für die Elektronen der Atomhülle, dann würden die relativen Energien der Kernzustände genug variiert, um die

Besetzungszahlen für geschlossene Schalen zu verändern; damit ließen sich die magischen Zahlen erklären. Noch bedeutsamer für die Kernphysik war, dass das Modell die vielen kürzlich gemessenen Werte für den Kernspin und das magnetische Moment des Kerns erklären konnte. Ihre Lösung des Problems veröffentlichte Goeppert Mayer erstmals im Juni 1949 [3].

Von der Geochemie zur Kernphysik

Goeppert Mayer widerstrebt es zunächst, ihre Arbeit zu publizieren, weil sie, bevor sie ihre eigene Veröffentlichung schrieb, das Manuskript einer deutschen Forschergruppe gelesen hatte, welche die gleiche Lösung vorschlug. Sie wollte den Vorteil, den sie durch die vorherige Einsicht in die deutsche Arbeit gewonnen hatte, nicht ausnutzen und reichte daher ihren eigenen Artikel erst ein, als der andere erschienen war. Die besagte Veröffentlichung stammte von Otto Haxel, Hans Jensen und Hans Suess, gründete aber, ebenso wie Goeppert Mayers Erkenntnisse, auf der Arbeit des schweizerisch-norwegischen Geochemikers Victor Moritz Goldschmidt.

Im Laufe einer langen und fruchtbaren Karriere als Begründer der Geochemie hatte Goldschmidt in umfassenden Studien an Elementen irdischer und kosmischer Herkunft Daten über die Isotopenhäufigkeit gesammelt und sich bemüht, darin ein Muster zu erkennen [4]. Einer seiner Hauptbeiträge bestand darin, die Elemente zusätzlich zu der Einteilung nach der Massenzahl A auch nach der Zahl ihrer Protonen Z und Neutronen N zu klassifizieren. Daraus resultierte die Beobachtung, dass die Maxima der Isotopenhäufigkeit bei $Z = 28, 40, 50, 74, 82$ und 90 auftraten und bei $N = 30, 50, 82$ und 108 . Anhand dieser Werte konnte Goldschmidt zwar nicht schließen, dass die „ausgezeichneten Zahlen“ für Protonen und Neutronen gleich waren, aber seine Überzeugung, dass die Isotopenhäufigkeit ein Schlüssel zur Kernstruktur war, führte zum Schalenmodell, als der Chemiker Hans Suess (Abb. 3) diese Daten sah.

Hans E. Suess (1909–1993) wurde in Wien als Sohn eines bekannten Geologie-Professors der Wiener Universität geboren. Suess promovierte 1936 bei Philipp Gross in Wien und war von 1937 bis 1950

am Institut für Physikalische Chemie der Universität Hamburg tätig. Während seiner Wiener Zeit studierte Suess unter anderem die chemischen Reaktionen des schweren Wassers. In Hamburg forschte er in erster Linie auf den Gebieten der experimentellen Kernchemie und der chemischen Kinematik.

Bei Ausbruch des Zweiten Weltkrieges 1939 stieß Suess zum deutschen Uranprojekt. In Folge seiner früheren Forschungsarbeiten schlug er schweres Wasser als Moderator für die „Uranmaschine“ (Kernreaktor) vor. Dies führte ihn wiederum zur norwegischen Produktionsstätte für schweres Wasser in Vemork, wo er als Berater des Uranprojekts diente. Anlässlich mehrerer Dienst-



Abb. 3:
Hans E. Suess
(1909–1993)

reisen nach Norwegen traf Suess 1942 mit Goldschmidt zusammen und ließ sich von dessen Neugierde für die Häufigkeitsverteilung von Elementen und Isotopen anstecken.

Zu den Diskussionen von Suess und Goldschmidt gesellte sich bald der theoretische Kernphysiker Hans Daniel Jensen (1907–1973). Jensen (Abb. 2) hatte von 1926 bis 1932 in Hamburg und Freiburg studiert und seine Doktorarbeit bei W. Lenz in Hamburg angefertigt. Dort blieb er bis 1941 und wurde schließlich zum Dozenten berufen. Während der 1930er-Jahre war er mehrmals in Bohrs Kopenhagener Institut zu Gast gewesen und kannte daher die Bestrebungen, eine allgemeine Theorie des Atomkerns zu formulieren. Er selbst beschäftigte sich während dieser Zeit mit der Theorie des Kristallgitters und mit Erweiterungen der Thomas-Fermi-Theorie des Atoms.

Bei Kriegsende war Suess davon überzeugt, dass Goldschmidts Daten zum Isotopenvorkommen nicht zufällig zustande kamen, sondern den Hinweis auf ein bestimmtes Muster enthielten. Für Suess war dieses Forschungsthema besonders gut geeignet: Er hatte ein weit zurückreichendes Interesse am Ursprung der Elemente und Goldschmidt hatte alle notwendigen Daten für eine vorläufige Untersuchung geliefert. Zudem waren die Möglichkeiten wissenschaftlicher Forschung während des Krieges und in der Zeit danach recht begrenzt. In einer Situation, in der es keine Gelder für die experimentelle Ausstattung der Labors gab, war es schwierig, ergiebige Forschungsthemen zu finden, und daher war die Tätigkeit deutscher Wissenschaftler nach dem Krieg auf Randgebiete der Physik beschränkt [5, 6].

Suess' Bemühungen, die Muster in der Isotopenverteilung zu erklären, erschienen schließlich 1947 in einem zweiteiligen Artikel [7, 8]. Suess beschrieb darin ausführlich die Regelmäßigkeiten bei der Verteilung des Isotopenhäufigkeit und entwickelte im Detail Regeln für die Stabilität von Kernen, die auf einer gründlichen grafischen Analyse der entsprechenden Daten beruhte. Diese Veröffentlichung veranschaulicht Suess' Vorliebe für die grafische Darstellung empirischer Daten in jeder möglichen Zusammenstellung. Joseph Mayer brachte dies folgendermaßen auf den Punkt: „Er trägt alles gegen alles andere auf und untersucht jeden Buckel, Knick oder Senke. Ich sage dies nicht spöttisch, sondern in tiefer Bewunderung“ [9]. Dieser Zugang zu experimentellen Daten ermöglichte es Suess, die „ausgezeichneten Zahlen“, wie er sie nannte, für Atomkerne zu ermitteln. Aus Grafiken zur Isotopenverteilung in kosmischen Proben, die er als Funktion der ungeraden und geraden Massenzahlen und Protonenzahlen darstellte, leitete Suess seine Ergebnisse für die nukleare Stabilität ab und identifizierte die folgenden „ausgezeichneten Zahlen“:

$N: 20 \quad 28 \quad 50 \quad (58) \quad - \quad 82$
 $Z: (20) \quad 26 \quad \text{o.} \quad 28 \quad 50 \quad - \quad 74 \quad 82$

Dies war der erste klare Hinweis dafür, dass die Stabilitätsbedingungen für Neutronen und Protonen die gleichen sind. „Ich war so beeindruckt, dass ich mehrere Nächte nicht schlafen konnte“, erinnerte Suess sich später [5].

Suess verwies auf das Verdienst seines Kollegen Otto Haxel (Abb. 4), ihm beim Auffinden der „ausgezeichneten Zahlen“ geholfen zu haben, insbesondere der Zahl 28. Haxel (1909–1998) hatte an der Technischen Hochschule in München und an der Universität Tübingen studiert. Er promovierte 1933 bei Hans Geiger und blieb in München, bis er 1936 Assistent an der Technischen Hochschule in Berlin wurde. Im Jahr 1946 ging er als Assistent Werner Heisenbergs nach Göttingen. Haxel besaß Erfahrung in experimenteller Kernphysik



Abb. 4:
Otto Haxel (1909–1998)

(Messungen von Kernreaktionen und Spektren) und hatte seiner Untersuchung der „ausgezeichneten Zahlen“ eher kernphysikalische als geochemische Daten zu Grunde gelegt. In Diskussionen mit Suess wurde beiden klar, dass sie über die gleichen Zahlen sprachen. Haxel hatte das Thema außerdem unabhängig von Suess auch mit dem Theoretiker Jensen diskutiert.

Haxel und Suess, die beide in verschiedenen Städten lebten (Hamburg und Göttingen), trafen bezüglich der Veröffentlichung eine Vereinbarung: Wenn einer von beiden eine Idee zur Bedeutung dieser Zahlen hatte, sollte er sie unter beider Namen publizieren. Dies war sinnvoll bei einer Zusammenarbeit über weite Entfernungen in einer Zeit, als die Postverbindung unzureichend war und die meisten anderen Arten der Kommunikation nicht verfügbar waren.

Haxel und Suess versuchten nun Jensen zu überzeugen, dass

ihre „ausgezeichneten Zahlen“ den Schlüssel zur Kernstruktur enthielten, aber diesem schien es zu widerstreben, die Frage weiter zu verfolgen. Er sah in keiner Weise einen theoretischen Ansatz, der die beobachteten Regelmäßigkeiten hätte erklären können. Dann erschien im August 1948 ein Artikel in *Physical Review*, in dem Maria Goeppert Mayer ausführliche experimentelle Beweise für die Existenz „magischer Zahlen“ brachte – dieselben Zahlen, die Haxel und Suess in solche Aufregung versetzt hatten. Jensen las die Veröffentlichung während eines Besuchs in Kopenhagen und fühlte sich dazu angeregt, die Ergebnisse von Mayer, Suess und Haxel in einem Seminarvortrag an Bohrs Institut zu diskutieren. Die Reaktion überraschte ihn: „Niels Bohr hörte sehr aufmerksam zu und warf Fragen ein, die immer lebhafter wurden“ [6]. Es war offensichtlich, dass Bohr mit Mayers Veröffentlichung vertraut war und dass er über das Thema gründlich nachgedacht hatte. Bohrs Begeisterung für die Möglichkeit von Kernschalen ermutigte Jensen, die Angelegenheit ernster zu nehmen.

Suess gelang es dann, die magischen Zahlen nach einer bestimmten Regel zu erzeugen, doch konnte er sein Vorgehen nicht theoretisch rechtfertigen: „Ich begann mit diesen Zahlen herum zu spielen und fand, dass sie tatsächlich magisch waren – ich meine, man konnte alles mögliche mit ihnen machen, beispielsweise mathematische Reihen daraus ableiten. Als Nächstes schlug ich einfach in einem Lehrbuch die Lösungen für die Schrödinger-Gleichung des dreidimensionalen harmonischen Oszillators nach... Dann schrieb ich die Lösungen auf, die man erhält, und zwar sortiert nach dem Drehimpuls, und wandte das Pauli-Prinzip an, um zu sehen, wie viele Teilchen in jedes Niveau passen würden. Dabei kamen die falschen Zahlen heraus, aber alles, was man tun musste, war, die übliche Reihenfolge der Spinwerte umzukehren und mit dem höchsten Spin zu beginnen. Wenn man den höchsten Spin in die vorherige Schale mit einbezieht, erhält man exakt die magischen Zahlen.“ [10]

Suess hatte nicht bemerkt, dass er die Spin-Bahn-Kopplung eingeführt hatte, indem er jeden Wert für l in seine j -Niveaus ($l \pm 1/2$) aufteilte und annahm, dass deren

Energieaufspaltung groß genug war, um sie als verschiedene Niveaus zu behandeln.

Suess fand auch eine Möglichkeit, die Ordnung der Spins zu überprüfen, die er bei dieser Prozedur erhielt. In Erinnerung an einen Artikel von T. Schmidt aus den 1930er-Jahren, der vorschlug, dass der Kernspin durch den Spin des letzten (ungeraden) Nukleons bestimmt wird, trug Suess die experimentell bestimmten Spin-Werte für Kerne mit ungerader Protonen- und gerader Neutronenzahl, sowie den umgekehrten Fall (gerade Protonen- und ungerade Neutronenzahl) über der Gesamtzahl der Nukleonen auf. Das Ergebnis war Abb. 5 [11]. Die horizontale gestrichelte Linie gibt in beiden Fällen den erwarteten Spinwert des Kerns an, wenn man das Termschema eines harmonischen Oszillators zu Grunde legt, in dem

Also musste ich darauf warten, dass Jensen auftauchte, weil ich nicht wusste, was das zu bedeuten hatte. Er sagte: „Ich muss das selbst auftragen“... und er erhielt genau das gleiche, aber er ... wollte es selbst machen, damit er verstand, was es zu bedeuten hatte. Ich erinnere mich noch, als er zum Mangan kam, das den Spin $5/2$ hat und die Parität plus, sagte er: „Das ist alles Unsinn“ [5].

Mit seiner „Grafik“ weckte Suess aber schließlich doch das Interesse von Jensen. Dieser sah ein, dass an dem Schema etwas Wahres sein musste. Danach dauerte es nicht lange, bis er die theoretische Erklärung fand. Suess beschrieb die Umstände folgendermaßen: „Am folgenden Tag kam er zu mir und sagte: ‚Nun, wenn etwas daran ist – wenn das Schema, das Sie gezeichnet haben, etwas bedeutet

und Suess einen kurzen Artikel an Physical Review, der in dieser Zeitschrift zwei Wochen vor Maria Goeppert Meyers Artikel zum gleichen Thema erschien [11–14].

Das Schalenmodell wurde von den Kernphysikern bald als ein nützlicher Ansatz angesehen, das Verhalten stabiler Kerne zu erklären – sein Ursprung in der Chemie war bald vergessen. Goeppert Mayer und Jensen entwickelten gemeinsam die theoretischen Grundlagen des Modells, die sie in ihrem 1955 veröffentlichten Buch „Elementary Theory of Nuclear Shell Structure“ darlegten. Im Jahr 1963 wurden sie gemeinsam mit dem Nobelpreis für Physik¹⁾ ausgezeichnet – nur drei Jahre nachdem Goeppert Mayer endlich eine bezahlte Professur an der University of California in San Diego erhalten hatte.

*

Diese Arbeit wurde von der National Science Foundation und der St. Lawrence University gefördert. Ich möchte auch Clarke Gage und Fred Fellows für ihre Kommentare zu diesem Manuskript und Anne Hardy für ihre Übersetzung danken.

Literatur

- [1] Eine ausführliche Darstellung der frühen Geschichte des Schalenmodells findet sich in K. E. Johnson, Am. J. Phys. **60**, 164 (1992)
- [2] M. G. Mayer, Phys. Rev. **74**, 235 (1948)
- [3] M. G. Mayer, Phys. Rev. **75**, 1969 (1949)
- [4] Für eine detaillierte Diskussion des Goldschmidtschen Beitrags siehe H. Kragh, Phys. Perspect. **2**, 381 (2000)
- [5] H. E. Suess im Gespräch mit der Autorin (1985)
- [6] J. H. D. Jensen, Nobel Lectures: Physics. Elsevier, Amsterdam (1972)
- [7] H. E. Suess, Z. f. Naturforsch. **2A** 311 (1947)
- [8] H. E. Suess, Z. f. Naturforsch. **2A** 604 (1947)
- [9] J. E. Mayer in einem Brief an R. Weber (1979)
- [10] H. Bethe in: R. H. Stuewer (Hrsg.) Nuclear Physics in Retrospect: Proceedings of a Symposium, University of Minnesota Press: Minneapolis (1977)
- [11] H. E. Suess, O. Haxel und J. H. D. Jensen, Naturwiss. **36**, 153 (1949)
- [12] O. Haxel, J. H. D. Jensen und H. E. Suess, Naturwiss. **35**, 376 (1949)
- [13] J. H. D. Jensen, H. E. Suess, und O. Haxel, Naturwiss. **36**, 155 (1949)
- [14] O. Haxel, J. H. D. Jensen und H. E. Suess, Phys. Rev. **75**, 1766 (1949)

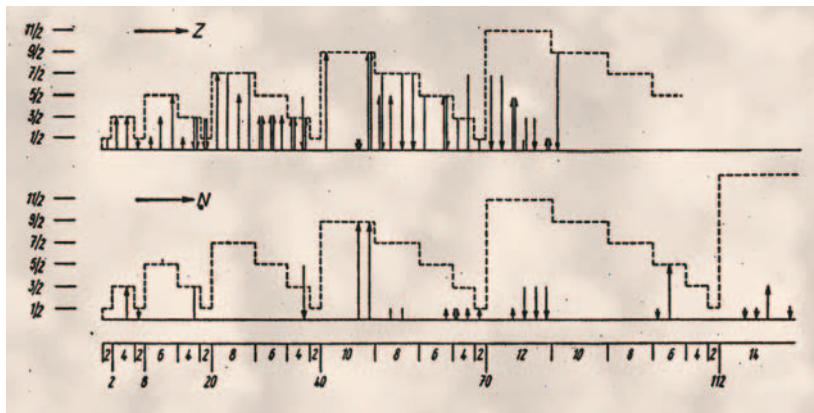


Abb. 5: Dieses von Suess angefertigte Diagramm (vgl. Text) weckte das Interesse von Jensen und führte zum Schalenmodell der Atomkerne [11].

die j -Werte ($l \pm 1/2$) aufgespalten sind, und annimmt, dass der gesamte Spin des Nukleons nur vom letzten (ungeraden) Nukleon abhängt. Die Richtung der Pfeile gibt die Parität des Niveaus an, die aus dem Bahndrehimpuls folgt, und die empirisch aus dem magnetischen Moment des Kerns ermittelt wird. Obwohl die Übereinstimmung, insbesondere für Kerne mit ungerader Neutronenzahl, nicht hervorragend ist, war sie für Suess doch hinreichend, um das Modell für tauglich zu halten. In erster Linie beunruhigten ihn die wenigen Fälle, in denen der gemessene Spinwert den vorhergesagten Wert übertraf. Einer davon war ^{55}Mn .

Mit diesem neuen und sehr anregenden „Beweismaterial“ ging Suess erneut zu Jensen und zeigte ihm die Auftragung der Spinwerte in der Hoffnung, er würde dafür irgend eine seltsame Erklärung finden.

– dann würde es bedeuten, dass es eine starke Spin-Bahn-Kopplung gibt. Ich fragte, warum es eine starke Spin-Bahn-Kopplung gäbe. Er erwiderte: ‚Das hat der liebe Gott so gemacht‘ [10].

Die erste Notiz von Jensen und Suess wurde von der Zeitschrift Nature abgelehnt mit der Kritik, die Autoren spielten eher mit Zahlen herum, als dass sie Physik betrieben. Mehr Erfolg hatten sie bei den Naturwissenschaften, die schließlich eine Serie von drei Artikeln zu diesem Thema veröffentlichten. Bevor der erste Artikel eingereicht wurde, erinnerte Suess an seine Vereinbarung mit Haxel, und der Beitrag erschien unter allen drei Namen, wobei Haxels Namen gemäß der Konvention alphabetischer Reihenfolge an erster Stelle stand. In der Hoffnung, auch auf englisch zu publizieren, sandten Jensen

1) Goeppert Mayer und Jensen teilten sich eine Hälfte des Nobelpreises, die andere Hälfte erhielt Eugene Wigner.