

Zur Struktur der leichten Atomkerne

Autor(en): **Bleuler, Konrad**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **33 (1960)**

Heft [5]: **Supplementum 5. Beiträge zur Entwicklung der Physik**

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-422255>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Zur Struktur der leichten Atomkerne

VON KONRAD BLEULER, Neuenburg

1. Die leichten Atomkerne, d. h. die Kerne, welche aus einer verhältnismässig kleinen Zahl von Protonen und Neutronen aufgebaut sind, zeigen eine Menge charakteristischer Eigenschaften, die im Gegensatz zu denjenigen der schweren Kerne stehen: Sehr verschiedenartige, typische Termschemata; die Niveaus im Kontinuum weisen verhältnismässig grosse Energiedifferenzen und auffallend kleine Linienbreiten auf und treten aus diesem Grunde experimentell in sehr eindrücklicher Weise in Erscheinung (scharfe Resonanzen bei Proton- oder Neutron-Streuung).

Die experimentelle Bestimmung der Niveaus mit all ihren besonderen Eigenschaften, wie Linienbreiten, Spins und Übergangswahrscheinlichkeiten, stellt nun eines der grösseren Forschungsgebiete der heutigen Physik dar. Durch den Vergleich dieser Resultate mit den Voraussagen verschiedener phänomenologischer Theorien können Rückschlüsse auf die Eigenschaften (Wechselwirkungen) der Elementarpartikel gezogen werden, aus welchen die betreffenden Kerne aufgebaut sind. Diese Eigenschaften gehören aber zu den fundamentalen Naturgesetzen, die der heutigen Physik zugrunde liegen und die gerade im Falle der Nukleonen noch mit einer grossen Unsicherheit und mit prinzipiellen Schwierigkeiten behaftet sind. Aus diesem Grunde stellt die experimentelle Kernphysik eines der wichtigsten Eingangstore zu den Grundlagen der Physik dar.

Mit der Erforschung der Kernstruktur (z. B. durch die Bestimmung deren geometrischen Eigenschaften im Raume) stösst man gleichzeitig zu den kleinsten Raumdimensionen vor, die sich wohl überhaupt auflösen lassen. Doch hat es sich gezeigt, dass die bekannten quantenmechanischen Gesetze auch in diesen kleinen Dimensionen noch gültig sind. Die auffallende Ähnlichkeit einiger Termschemata der leichten Kerne mit denjenigen der Atomhüllen und teilweise mit denjenigen gewisser Moleküle ist ein charakteristisches Beispiel dafür: Es zeigt die gewaltige Vergrösserung des Anwendungsbereiches der wellenmechanischen Grundbegriffe (Schrödingersche Gleichung mit der Erweiterung nach Pauli durch Einführung des Spins und des Ausschlussprinzipes), die in derselben Weise wie für die Schwingungen der Moleküle und die Bewegung der Elektronen in der Atomhülle auch für die Nukleonen im Kernverband

verwendet werden. Damit ist aber die äusserste Grenze erreicht und es treten bereits die grossen Unsicherheiten in der Wahl der Wechselwirkungen (Kernkräfte) auf.

Auf dem Gebiete der leichten Kerne wurden ganz besonders im Institut von Herrn Prof. SCHERRER einige sehr schöne Arbeiten ausgeführt, und es ist mir eine besondere Freude, bei diesem festlichen Anlass über diese Arbeiten zu berichten und gleichzeitig eine theoretische Deutung zu versuchen.

2. Für eine quantitative Beschreibung ist es zweckmässig, zunächst eine besondere Klasse leichter Kerne auszuwählen, die wir hier mit dem Namen «Kern-Alkalien» bezeichnen möchten. Diese bestehen aus dem Rumpf, d. h. in unserem Falle einem relativ stabilen Kern, wie das Alpha-Partikel, der Kohlenstoff 12 und der Sauerstoff 16 (alle diese Kerne besitzen nämlich die Eigenschaft, dass das erste angeregte Niveau verhältnismässig hoch liegt) und einem weiteren, hinzugefügten Nukleon, welches die Rolle des Leuchtelektrons der gewöhnlichen Alkalien übernimmt. Die strenge wellenmechanische Behandlung eines solchen Systems zeigt nun tatsächlich, dass es in einer gewissen Näherung (verallgemeinerte Störungsrechnung) möglich ist, alle tiefliegenden Niveaus des Gesamtsystems mit Hilfe eines wellenmechanischen Einkörperproblems in zwangloser Weise zu deuten (Wellengleichung des «Leucht-Nukleons») [1]¹⁾. Dieses Einkörperproblem zeigt aber die folgenden ausserordentlich charakteristischen Eigenschaften:

Neben einem gewöhnlichen Potential, welches als mittlere Kraft zwischen dem Leuchtpartikel einerseits und den Nukleonen des Gesamtrumpfes andererseits zu deuten ist, steht ein sog. Spin-Bahn-Kopplungsterm und auch ein wichtiger Austauschterm. Der letztere ist eine Folge des Paulischen Ausschlussprinzipes (Pauli-Verbot), welches eine vollständige Antisymmetrisierung der Wellenfunktion des Gesamtsystems verlangt. Dies ergibt dann in unserer Näherung für das Leuchtpartikel ein ganz charakteristisches, nicht lokales Zusatzpotential, das wesentlich von der Struktur der Gesamtwellenfunktion des Rumpfes abhängt. Es hat sich auch gezeigt, dass dieses Austauschpotential in gleicher Weise bei den gewöhnlichen Alkalien auftritt und für deren vollständige Deutung auch dort wichtig ist. Es ersetzt nämlich den Begriff der bekannten Tauchbahnen, welcher nie zu einem befriedigenden numerischen Resultat geführt hat (vgl. die Zusammenstellung der empirischen Daten, z. B. bei CONDON and SHORTLEY). Daraus ergibt sich auch eine sehr enge Analogie zwischen «Kernalkalien» und Alkalien der Atomhülle.

Ganz anders steht es mit dem ersten Zusatzterm, der Spin-Bahn-Kopplung, die selbstverständlich auch in der Atomhülle auftritt, dort

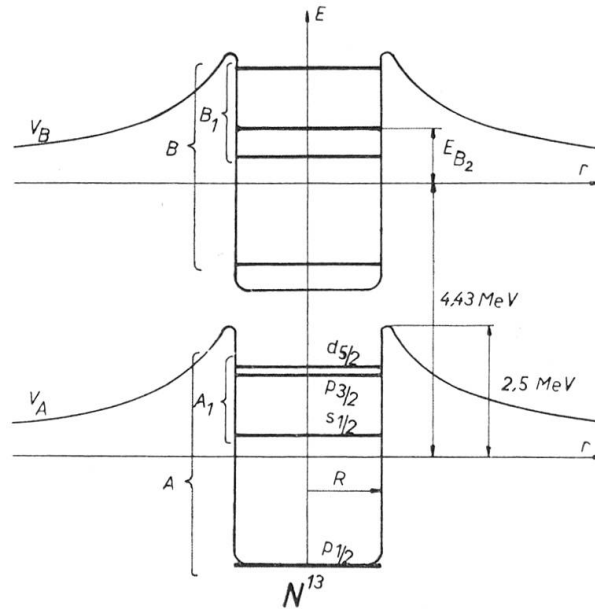
¹⁾ Die Ziffern in eckigen Klammern verweisen auf das Literaturverzeichnis, Seite 175.

aber den normalen Wert besitzt, welcher durch die Paulische Näherung der relativistischen Diracschen Gleichung zustande kommt. Es zeigt sich nämlich, dass die Spin-Bahn-Aufspaltung im Falle der Atomkerne im Verhältnis zu den Termabständen etwa 15–20mal grösser ist. Diese empirische Tatsache hat bei den Theoretikern ein grosses Kopfzerbrechen verursacht; doch ist es uns jetzt gelungen, zu zeigen, dass dieses anomale Verhalten eine ganz natürliche Folge des besonderen Charakters des Mesonfeldes ist (negative Parität oder sog. pseudoskalare Transformationseigenschaft), welches durch seine Wechselwirkung mit den Nukleonen die Kernkräfte erzeugt [4]. Im ganzen kann man sagen, dass sich in diesem anomalen Verhalten ganz deutlich die Ersetzung des Maxwell'schen Feldes (im Falle der Atomhülle) durch das Mesonfeld (im Falle der Kerne) bemerkbar macht.

3. Nun sind im Institut von Herrn Professor SCHERRER die Termschemata verschiedener Kerne empirisch bestimmt worden, die gerade unter die vorhin besprochene Klasse fallen. Es handelt sich um die Kerne ^{13}C , ^{13}N und ^{17}F . Hier fallen die meisten Niveaus ins Kontinuum, was natürlich mit der relativ schwachen Bindung des letzten Partikels zusammenhängt. Diese Tatsache ist aber für die Kernalkalien charakteristisch. Die experimentelle Bestimmung der Niveaus erfolgte deshalb in allen Fällen durch Bestimmung einer Resonanz in der elastischen Streuung oder einer Resonanz im (p - γ)-Prozess. In einigen Fällen war es möglich, durch Vermessung der Winkelverteilung in den Resonanzen die Zuordnung (d. h. Drehimpuls-Quantenzahl und Parität) zu bestimmen. Es war gleichfalls wichtig, auch die Form des Resonanzmaximums (Wirkungsquerschnitt als Funktion der Energie) möglichst genau zu kennen. Diese schönen Messungen haben die experimentellen Termschemata bei den genannten Kernen ganz wesentlich ergänzt, und zwar hauptsächlich für die relativ hochliegenden Niveaus [2]. Dabei wurde eine sehr eindruckliche qualitative Übereinstimmung mit der besprochenen Modellvorstellung erzielt; auch ergab sich für die höher gelegenen Niveaus die folgende natürliche Deutung:

Während für die tiefen Niveaus das Leuchtnukleon den Rumpf in dessen Grundzustande «umkreist», ist für die höheren Zustände derselbe Rumpf im ersten, teilweise sogar im zweiten angeregten Zustande anzunehmen. Dies hat dann zur Folge, dass sich in gewissem Sinne ähnliche Gruppen von Termen wiederholen. Auch folgte diese Deutung ohne weiteres aus unserem speziellen Ansatz für das Vielkörpersystem [1]. Aus rein numerischen Gründen (verhältnismässig hohe Anregungsenergie des Rumpfes) ist dieser ungemein typische Effekt bei den gewöhnlichen, d. h. elektronischen Alkalien meines Wissens nicht gefunden worden. Diese Einpartikelniveaus des angeregten Rumpfes zeichnen sich auch, wie sofort einleuchtet, durch eine relativ kleine Linienbreite (im Ver-

gleich zu den tieferen Niveaus) aus. Dies ist natürlich eine sehr auffallende Tatsache, da im allgemeinen die Niveaubreite mit deren Energie stark zunimmt. Der ganze Sachverhalt soll hier an einem typischen Beispiel graphisch dargestellt werden:



Niveaus des Kernes ^{13}N

Die fetten Horizontalen stellen die experimentellen Niveaus dar. V_A resp. V_B bedeuten die Potentiale des Leuchtnucleons für den Grundzustand resp. den ersten angeregten Zustand des Rumpfes (Anregungsenergie 4,43 Mev). Niveaugruppe A: Rumpf im Grundzustand; Untergruppe A_1 instabil (Durchdringung des Coulombwalles); Zuordnungen entsprechen den Einpartikelzuständen der Potentialmulde V_A mit einem Austauschterm, der die starke Verschiebung des Niveaus $p_{3/2}$ und $s_{1/2}$ nach oben zur Folge hat (diese Niveaus sind bereits im Rumpf ^{12}C zum grossen Teil besetzt und werden deshalb durch die Antisymmetrisation stark beeinflusst). Gruppe B: Niveaus mit angeregtem Rumpf.

4. Was nun das Gesamtgebiet der leichten Kerne im Rahmen der heutigen approximativen Kenntnisse der Kernkräfte, welche im wesentlichen ja durch die π -Mesonen vermittelt werden, betrifft, ist folgendes zu bemerken:

Zunächst kann man vom Falle des *einen* Leuchtnucleons mit denselben Methoden zum Falle zweier Extrapartikel übergehen, wobei als einziger, wesentlich neuer Term im Hamilton-Operator des Systems noch eine direkte Wechselwirkung anzunehmen ist, die etwa aus der Theorie des Deuterons übernommen werden kann. Dies entspricht genau dem Übergang von den Alkalien zu den Erdalkalien.

Nun zeigt sich aber empirisch wie auch rein theoretisch der folgende quantitative Unterschied: Der Effekt der direkten Wechselwirkung zwischen den beiden Partikeln ist bei den leichten Kernen im Verhältnis

zu den Erdalkalien (Behandlung der Störungsterme noch möglich) sehr viel grösser. Dies hat hauptsächlich mit dem anziehenden Charakter der direkten Wechselwirkung zu tun, und zwar zeigt es sich, dass man dann das Gesamtsystem am besten durch den folgenden, extremen Fall näherungsweise darstellen kann: Man betrachte den stabilen Rumpf, der nun anstelle zweier getrennter Nukleonen (z. B. Proton und Neutron) von einem Deuteron umkreist wird. Dieser Gesichtspunkt ist als Spezialfall der sog. Komplex-Struktur aufzufassen, welche hauptsächlich durch K. WILDERMUTH eingehend studiert worden ist [3]. Es ergibt sich dadurch z. B. eine ganz zwanglose Deutung der Termschemata von ${}^6\text{Be}$ und ${}^6\text{Li}$, deren Terme teilweise auch am Institut der ETH gemessen worden sind. Von hier ist es aber ein kleiner Schritt, auch weitere Kerne, wie z. B. ${}^7\text{Li}$, ${}^{19}\text{F}$, durch eine Komplex-Struktur zu deuten. Es zeigt sich nun, dass im Verband des leichten Kernes der ${}^3\text{H}$ - bzw. der ${}^3\text{He}$ -Komplex relativ stark in sich gebunden ist, wie das schon beim Deuteron der Fall ist. Dies ist aus sehr allgemeinen Gründen (kurze Reichweite der direkten Wechselwirkung) verständlich, und die qualitative Übereinstimmung mit den empirischen Schemata ist deshalb in den beiden genannten Fällen wieder sehr eindrucklich. Der Weg zu einer exakteren numerischen Berechnung im Rahmen dieser Modellvorstellung bedeutet noch ein grosses und nützlichcs Arbeitsgebiet.

Von diesem Gesichtspunkt ausgehend, lassen sich aber auch die stabilen Rumpfe selbst (z. B. ${}^{12}\text{C}$ und ${}^{16}\text{O}$) in Angriff nehmen, nachdem die Eigenschaften dieser Kerne zunächst einfach als empirische Tatsachen hingenommen wurden. Man kommt auf diese Weise zu einer Alpha-Struktur von ${}^{16}\text{O}$, die sich allerdings von der älteren phänomenologischen Rotationsschwingungstheorie des Tetrahedrons ganz wesentlich unterscheidet.

Die Antisymmetrisierung des Gesamtsystems, die natürlich auch hier (wie schon beim einfachen Einpartikelzustand des Leuchtnukleons) ganz wesentlich ist, hat nämlich zur Folge, dass die Gesamtwellenfunktion einer solchen Komplexstruktur von derjenigen einer reinen Schalenstruktur gar nicht sehr verschieden ist. Aus dieser letzten Bemerkung ergibt sich dann auch ein Verständnis der Strukturen, die man erhält, wenn man von den leichten Kernen zu immer schwereren Kernen fortschreitet: die Komplexstruktur geht mehr und mehr in eine sozusagen reine Schalenstruktur aller inneren Nukleonen über. Gerade dieses Übergangsgebiet (Region des Aluminiums usw.) stellt noch ein grosses und interessantes Forschungsgebiet in experimenteller wie auch in theoretischer Hinsicht dar.

5. Gelangt man dann zu den «schweren» Atomkernen (Nukleonenzahl A grösser als 40), so ergibt sich für alle Kerne wiederum eine sehr einfache und übersichtliche Gesamtstruktur. Es handelt sich zunächst um

die Schalenstruktur, die von H. JENSEN in Heidelberg, MARIA GÖPPERT-MEIER in Chicago und TH. SCHMIDT in Freiburg zum ersten Male angegeben wurde.

Die wesentlichen Züge dieser neuen Struktur, welche derjenigen der Elektronenschalen der Atome in gewisser Hinsicht verwandt ist, sind die folgenden:

1. Das mittlere Kernpotential (d. h. das Potential, das von sämtlichen Nukleonen auf ein willkürlich herausgegriffenes festes Nukleon wirkt; es wurde oben schon in derselben Weise für das «Leuchtnukleon» der «Kernalkalien» definiert) überwiegt in seiner Wirkung auf den Großteil der Nukleonen vollständig den Effekt, der durch die direkte Wechselwirkung zwischen je zwei Nukleonen hervorgerufen wird. Diese Tatsache ist, wie V. WEISSKOPF hervorgehoben hat, eine einfache Folge des Paulischen Ausschlussprinzipes. Dadurch wird nun die oben besprochene Komplexstruktur, welche, wie wir gesehen haben, durch die direkte Wechselwirkung hervorgerufen wird, sozusagen vollständig ausgelöscht.

2. Die Form des mittleren Kernpotentials wird je nach dem zu betrachtenden Teil des periodischen Systems sphärisch oder elliptisch (d. h. deformiert) gewählt. Sie ergibt sich in zwangloser Weise aus der Betrachtung der Selbstkonsistenz, wie dies von A. BOHR und S. G. NILSSON gezeigt worden ist. In beiden Fällen muss zu dem skalaren mittleren Potential eine Spin-Bahn-Kopplung hinzugefügt werden, welche dieselbe Größenordnung besitzt wie diejenige, die wir im Falle der Kernalkalien bereits besprochen haben (diese Tatsache ergibt sich auch aus der dort angegebenen theoretischen Deutung).

3. Die möglichen Einnukleonzustände, welche durch das betrachtete mittlere Potential mit Spin-Bahn-Kopplung zu bestimmen sind, sollen nun unter Berücksichtigung des Ausschlussprinzipes kompakt aufgefüllt werden, wobei sich ein wohldefiniertes Fermi-Niveau ergibt, welches dem energetisch höchsten, noch teilweise besetzten Einteilchen-Niveau entspricht. Durch die Berücksichtigung der direkten Wechselwirkung wird dieses Niveau in gewissem Sinne etwas verwischt, wie dies auch im Falle der Elektronen-Leitungsbande wohlbekannt ist.

Durch diese drei grundlegenden Annahmen, die sich in natürlicher Weise aus denjenigen für die leichten Kerne ergeben (der Hauptunterschied gegenüber diesen Kernen besteht darin, dass die Austauschterme wegen der nun vorhandenen Einpartikelstruktur sehr viel einfacher sind und dass die Komplexstruktur verwischt wird), werden nun sozusagen alle empirischen Eigenschaften der schweren Kerne verständlich. Dies bedeutet, dass ein riesiges experimentelles Material (Bindungsenergien, Termschemata, magnetische Momente, Quadrupolmomente, Übergangswahrscheinlichkeiten, Reaktionsgeschwindigkeiten, Ladungsverteilungen

usw.) mit Hilfe einfacher und auch natürlicher phänomenologischer Annahmen gedeutet werden kann.

Sehr schöne Beispiele für die Einpartikelstruktur der Kernschemata in der Region des Goldes wurden durch Messungen²⁾ von OTTO HUBER im Institut von Prof. Scherrer gegeben, während HANS FRAUENFELDER zum ersten Male durch Messung von Winkelkorrelation mit äusserem Magnetfeld magnetische Momente in angeregten Zuständen bestimmt hat³⁾, die sich im Rahmen der Schalenstruktur gut deuten lassen.

Abschliessend können wir wohl sagen, dass man heutzutage auf Grund natürlicher Annahmen all die verschiedenen Eigenschaften der Atomkerne des gesamten periodischen Systems in zwangloser Weise deuten kann, während die angegebenen Strukturannahmen mit den grundlegenden Eigenschaften der Pionen, die den Hauptteil aller Kernkräfte vermitteln, im Einklang zu sein scheinen. Zu diesem schönen Gesamtergebnis, zu dem man in den letzten Jahren gelangt ist, haben die Arbeiten, die im Institut von Herrn Professor Scherrer durchgeführt wurden, einen guten Teil beigetragen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] K. BLEULER, *Helv. phys. Acta* 27, 190 (1954); K. BLEULER und CH. TERREAUX, *Helv. phys. Acta* 30, 183 (1957).
- [2] RICAMO, ZÜNTI, BALDINGER und HUBER, *Helv. phys. Acta* 23, 508 (1950); RICAMO und ZÜNTI, *Helv. phys. Acta* 24, 419 (1951); MEIER und RICAMO, *Helv. phys. Acta* 26, 430 (1953); MEIER, RICAMO, SCHERRER und ZÜNTI, *Helv. phys. Acta* 26, 459 (1953); SEMPET, SCHNEIDER und MARTIN, *Helv. phys. Acta* 27, 313 (1954); H. SCHNEIDER, *Helv. phys. Acta* 29, 55 (1956).
- [3] K. WILDERMUTH and TH. KANELLOPOULOS, *Nucl. Phys.* 7, 150 (1958).
- [4] J. P. AMIET, zu publ. in *Helv. Phys. Acta*.

²⁾ Eine ausführliche Diskussion dieser Messungen findet sich im gleichen Band im Beitrag *Kernspektroskopie* von E. BLEULER und R. M. STEFFEN (S. 138).

³⁾ Vergl. den Beitrag *Richtungskorrelation* von E. HEER (S. 157).