

(Mitteilung aus dem Institut für Sonnenphysik, Astrophysikalisches  
Observatorium, Potsdam.)

## Über Beziehungen im Atomkern aus der Hyperfeinstruktur.

Von **H. Schüler** und **H. Korsching** in Potsdam.

Mit 2 Abbildungen. (Eingegangen am 15. Juli 1936.)

Es wird gezeigt, welche allgemeinen Regeln für den Aufbau des Atomkerns sich aus den Hyperfeinstrukturbeobachtungen ablesen lassen.

Die bei den fortschreitenden Hyperfeinstrukturuntersuchungen erhaltenen Resultate geben die Möglichkeit, früher geäußerte Gesetzmäßigkeiten zu prüfen und zu erweitern.

I. Die Tatsache, die zum ersten Male<sup>1)</sup> bei der Deutung der Cd-Hyperfeinstrukturen ausgesprochen wurde, daß nämlich die Elemente mit gerader Ordnungszahl und gerader Teilchenzahl im Kern keine magnetische Aufspaltung besitzen, ist an allen bisher untersuchten Elementen ausnahmslos bestätigt worden; so in der neuesten Zeit auch beim Pt<sup>2)</sup>. Auf die Frage, wie groß nun nach dem Experiment höchstens die Aufspaltungen der geraden Isotope im Verhältnis zu den ungeraden sein könnten, läßt sich aus den Beobachtungen am Hg, Pb, Sn<sup>3)</sup> sagen, daß eine etwa vorhandene Aufspaltung der geraden Isotope *kleiner als 3%* der entsprechenden ungeraden sein müßte. Da dieser Befund für alle untersuchten geraden Isotope zutrifft, und es sind derer eine ganze Anzahl, so ist der Schluß gerechtfertigt, daß ganz allgemein die Aufspaltungen der geraden Isotope, falls überhaupt eine existiert, höchstens etwa ein Hundertstel der üblichen Aufspaltungen der ungeraden Isotope sein können. Daraus ergibt sich für den Aufbau der Atomkerne folgendes Gesetz: Die Spinmomente der Protonen sättigen sich paarweise ab, ebenso die der Neutronen. Ferner müssen sich auch die Bahnmomente der Protonen paarweise kompensieren, da sonst bei den geraden Isotopen Aufspaltungen von der gleichen Größenordnung wie bei den ungeraden beobachtet werden müßten. Für das magnetische Moment des Neutronenumlaufes folgt, daß es, falls überhaupt von Null verschieden, höchstens 1% des Protonenumlaufes sein kann.

---

<sup>1)</sup> H. Schüler u. H. Brück, ZS. f. Phys. **56**, 291, 1929. — <sup>2)</sup> B. Jaeckel u. H. Kopfermann, ebenda **99**, 492, 1936. — <sup>3)</sup> H. Schüler u. H. Westmeyer, Naturwissensch. **21**, 660, 1933.

II. Zu der bisher noch nicht völlig geklärten Frage, ob man für eine Darstellung des Atomkernaufbaues auch ein Vektormodell benutzen kann, muß folgendes bemerkt werden. In einer früheren Arbeit hat einer der Verfasser<sup>1)</sup> mit Hilfe eines einfachen Vektormodells das magnetische Moment des Neutrons zu etwa  $-1,7$  Kernmagnetonen bestimmt. Nach diesem Modell sollen die magnetischen Momente der Atomkerne mit *ungerader Neutronenzahl*, deren mechanisches Moment  $i = 1/2$  ist, in dem Bereich von  $-1,7$  bis  $+0,55$  Kernmagnetonen liegen. Dies wird durch die Befunde an Sn, Cd, Hg, Pb bestätigt. Außerdem sollte nur *ein positiver Wert* bei  $+0,55$  vorkommen (Fig. 4, l. c.). Bisher fielen auf diesen positiven Wert die Elemente  $^{199}\text{Hg}$  ( $\mu = +0,5$ ) und  $^{207}\text{Pb}$  ( $\mu = +0,6$ ), hierzu ist neuerdings auch noch  $^{197}\text{Pt}$  ( $\mu = +0,6$ )<sup>2)</sup> gekommen. Die Tatsache, daß innerhalb von 20% (der Genauigkeit der theoretischen Berechnung) die gefundenen Werte dem Vektormodell entsprechen, scheint ein deutlicher Hinweis dafür zu sein, daß man bei Kernen mit *ungeradem Neutron* das magnetische Moment desselben so darstellen kann, als ob sich der Spin ( $s_n$ ) des ungeraden Neutrons mit seinem Umlauf ( $l_n$ ) zu  $j_n$  und dieser Vektor mit dem des Atomkernrestes ( $r$ , bestehend aus Neutronenumläufen) zum Gesamtdrehimpuls ( $i$ ) zusammensetzt. Nach dem unter I Gesagten ist es dabei zulässig, das magnetische Moment des Neutronenumlaufes gleich Null zu setzen.

Eine weitere Stütze bilden auch  $^{137}\text{Ba}$ ,  $^{135}\text{Ba}$ , deren mechanisches Moment<sup>3)</sup> ( $i = 3/2$ ) neuerdings sichergestellt ist. Ihr magnetisches Moment ergibt sich zu  $+0,9$  Kernmagnetonen; dieser Wert entspricht innerhalb von 10% der theoretischen Erwartung (Schüler, l. c.). Weiter findet der Wert des magnetischen Momentes des Neutrons eine Bestätigung durch die Bestimmung des magnetischen Momentes des Deuterons  $\mu = 0,85$  durch Kellog und Rabi<sup>4)</sup>. Man erhält nämlich aus der einfachen Vorstellung, daß das magnetische Moment des Deuterons gleich der Summe der magnetischen Momente von Proton und Neutron ist, mit dem Sternschen Wert des Protonenmagnetonen  $\mu_P = 2,5$  das magnetische Moment des Neutrons zu  $\mu_N = -1,65$  und aus dem neuerdings von Rabi<sup>5)</sup> angegebenen Protonenmagneton  $\mu_P = 2,9$  das Moment des Neutrons zu  $\mu_N = -2,05$ . In Anbetracht der hier möglichen Fehler liefern diese Werte eine gute Bestätigung des früher angegebenen Wertes für  $\mu_N$ .

<sup>1)</sup> H. Schüler, ZS. f. Phys. **88**, 323, 1934. — <sup>2)</sup> Th. Schmidt, ebenda **101**, 486, 1936. — <sup>3)</sup> A. Benson u. R. A. Sawyer, Phys. Rev. **49**, 867, 1936. — <sup>4)</sup> J. M. B. Kellog u. I. I. Rabi, ebenda **49**, 867, 1936. — <sup>5)</sup> Siehe Reviews of Modern Physics, Artikel Bethe u. Bacher, 1936.

III. Eine andere Erscheinung, die bei der Hyperfeinstrukturforschung gefunden wurde, ist die Isotopenverschiebung<sup>1)</sup>. Dieser Effekt ist, was nicht immer geschieht, streng zu trennen von dem bekannten Isotopeneffekt bei den leichten Elementen, der von der Abhängigkeit der Rydberg-Konstanten von der Kernmasse herrührt. Den hier in Frage kommenden Effekt beobachtet man bei Elementen mit verschiedenen geraden Isotopen bei Grobstrukturtermen, deren Elektronendichte am Orte des Kerns besonders groß ist. Es findet eine Differenzierung der Termenergien derart statt, daß die Terme der Isotope entsprechend der Masse der Atomkerne aufeinanderfolgen.

Diese Reihenfolge, die zuerst beim Hg<sup>2)</sup> beobachtet wurde, hat sich bisher ausnahmslos bestätigt. Im allgemeinen liegen die geraden Isotope

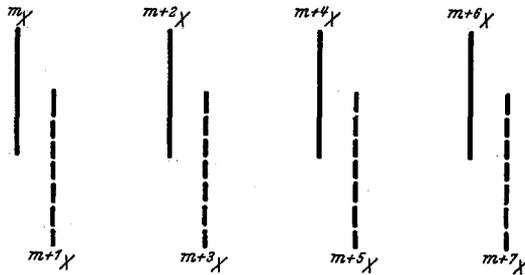


Fig. 1.

in etwa äquidistanten Abständen. Doch zeigt das Beispiel von Sm<sup>3)</sup>, daß die Abstände ganz erheblich differieren können, so daß die Isotopenverschiebung sicher nicht als reiner Masseneffekt gedeutet werden kann. Der Schwerpunkt des Aufspaltungsbildes der dazwischenliegenden ungeraden Isotope ist in allen bisher bekannten Fällen (zuletzt bei Pt, l. c.) exzentrisch zu den beiden umgebenden geraden Isotopen gelagert, und zwar nach der Seite des leichteren verschoben (siehe Fig. 1). Wir haben also auch bei diesem Effekt zwei ausnahmslos geltende Regelmäßigkeiten.

IV. Durch die Isotopenverschiebung ist es nun möglich, bei denjenigen Elementen mit ungeraden Kernprotonen, die zwei Isotope besitzen, durch die Trennung ihrer Aufspaltungsbilder das Verhältnis der Gesamtaufspaltungen und dadurch direkt das Verhältnis der magnetischen Momente sehr genau zu bestimmen. Diese Elemente sind bekanntlich Cl, K, Cu, Ga,

<sup>1)</sup> H. Schüler u. J. E. Keyston, Naturwissensch. 19, 320, 1931. —

<sup>2)</sup> H. Schüler u. J. E. Keyston, ZS. f. Phys. 72, 423, 1931. — <sup>3)</sup> H. Schüler u. Th. Schmidt, ebenda 92, 148, 1934.

Br, Rb, Ag, In, Sb, Eu, Cp<sup>1)</sup>, Re, Ir, Tl. Von ihnen konnten bisher mit Hilfe der Isotopenverschiebung Cu<sup>2)</sup>, Ga<sup>3)</sup>, Eu<sup>4)</sup>, Re<sup>3)</sup>, Tl<sup>5)</sup> genauer untersucht werden. Da die Isotope dieser Elemente alle das gleiche mechanische Moment haben, so würde man vermuten, daß auch die Vektorzusammensetzung beider Isotope identisch ist. Beim Ga und Eu ist das offensichtlich nicht der Fall (entweder andere Vektorzusammensetzung oder veränderte

Kopplungsverhältnisse), da bei Ga  $\frac{\mu_{71}}{\mu_{69}} = 1,270$  und bei Eu  $\frac{\mu_{153}}{\mu_{151}} = \frac{1}{2,22}$

ist. Dagegen wird man bei Cu, Re und Tl, wo  $\frac{\mu_{M+3}}{\mu_{M+1}}$  die Werte zwischen

1,03 und 1,01 besitzen, annehmen müssen, daß der Aufbau der beiden Isotope identisch ist. Die Unterschiede bei diesen Elementen sind gegenüber denen bei Ga und Eu wohl nicht nur gradueller Natur, denn bei Cu, Re, Tl weist die Änderung der magnetischen Momente insofern eine Regelmäßigkeit auf, als das schwerere Isotop immer das größere magnetische Moment besitzt und die prozentuale Änderung des magnetischen Moments etwa ebenso groß ist wie die prozentuale Änderung der Masse des Atomkerns durch den Einbau der beiden Neutronen. Der Unterschied beim Cu ist etwas über 3%, beim Re etwas über 1% und beim Tl etwas unter 1%. Diese Beziehungen sind in keiner Weise bei Ga und Eu erfüllt. Dadurch kommt den kleinen Änderungen zwischen den beiden Isotopen bei Cu, Re, Tl insofern eine Bedeutung zu, als man daraus ablesen müßte, daß die magnetischen Momente der Elementarteilchen im Kern sich beim Übergang von einem Isotop zum anderen um einige wenige Prozent ändern. Ein derartiger Effekt ist bereits früher auf Grund anderer Beobachtungen beim Übergang von einem Element zum anderen diskutiert worden<sup>6)</sup>.

V. Durch die Bestimmung der mechanischen Momente von K<sup>7)</sup> und Ag<sup>8)</sup> sind jetzt bis auf Ir, das noch nicht gesichert ist, die mechanischen Momente aller Elemente mit *ungerader Ordnungszahl*, die zwei Isotope besitzen, bekannt. In der Tabelle 1 sind diese Elemente zusammengestellt und ihre mechanischen Momente und der Mengenanteil<sup>9)</sup> ihrer Isotope angegeben.

1) Cp besitzt außer <sup>175</sup>Cp noch ein weiteres ungerades Isotop von einigen Prozent Häufigkeit. Dissertation H. Gollnow, im Erscheinen. — 2) H. Schüler u. Th. Schmidt, ZS. f. Phys. **100**, 113, 1936. — 3) Die Messungen von Ga und Re werden demnächst veröffentlicht. — 4) H. Schüler u. Th. Schmidt, ZS. f. Phys. **94**, 457, 1935. — 5) H. Schüler u. J. E. Keyston, ebenda **70**, 1, 1931. — 6) H. Schüler u. Th. Schmidt, ebenda **98**, 430, 1936. — 7) J. H. Manley, Phys. Rev. **49**, 867, 1936. — 8) D. A. Jackson u. H. Kuhn, Nature **137**, 1030, 1936. — 9) Die Werte sind entnommen: O. Hahn, Ber. d. D. Chem. Ges. **69**, 5, 1936.

In bezug auf die Mengenverhältnisse lassen sich die Elemente in zwei Gruppen teilen. Die eine Gruppe (in Rubrik I und II eingetragen), enthält diejenigen Elemente, bei denen die Häufigkeit der beiden Isotope von der gleichen Größenordnung ist. Sie enthält weitaus die meisten Elemente. Die andere Gruppe (in Rubrik III eingetragen) enthält die Elemente, bei denen die Häufigkeit der beiden Isotope größenordnungsmäßig verschieden ist. In der Rubrik I, deren Elemente nur Isotope mit gleichem

Tabelle 1.

I			II			III		
	Häufigkeit	<i>i</i>		Häufigkeit	<i>i</i>		Häufigkeit	<i>i</i>
$^{35}_{17}\text{Cl}$	75 %	$5/2$						
$^{37}_{17}\text{Cl}$	25 %	$5/2$						
						$^{39}_{19}\text{K}$	93,4 %	$3/2$
						$^{40}_{19}\text{K}$	0,01 %	
						$^{41}_{19}\text{K}$	6,6 %	$3/2$
$^{63}_{29}\text{Cu}$	70 %	$3/2$						
$^{65}_{29}\text{Cu}$	30 %	$3/2$						
$^{69}_{31}\text{Ga}$	61,5 %	$3/2$						
$^{71}_{31}\text{Ga}$	38,5 %	$3/2$						
$^{79}_{35}\text{Br}$	50,6 %	$3/2$						
$^{81}_{35}\text{Br}$	49,4 %	$3/2$						
			$^{85}_{37}\text{Rb}$	72,7 %	$5/2$			
			$^{87}_{37}\text{Rb}$	27,3 %	$3/2$			
$^{107}_{47}\text{Ag}$	52,5 %	$1/2$						
$^{109}_{47}\text{Ag}$	47,5 %	$1/2$						
						$^{113}_{49}\text{In}$	4,5 %	?
						$^{115}_{49}\text{In}$	95,5 %	$9/2$
			$^{121}_{51}\text{Sb}$	56 %	$5/2$			
			$^{123}_{51}\text{Sb}$	44 %	$7/2$			
$^{151}_{63}\text{Eu}$	50,6 %	$5/2$						
$^{153}_{63}\text{Eu}$	49,4 %	$5/2$						
						$^{175}_{71}\text{Cp}$	[etwa 96 %]	$7/2$
						$^{177}_{71}\text{Cp}$	[etwa 4 %]	$9/2?$
$^{185}_{75}\text{Re}$	38,2 %	$5/2$						
$^{187}_{75}\text{Re}$	61,8 %	$5/2$						
$^{191}_{77}\text{Ir}$	33 %	$1/2?$						
$^{193}_{77}\text{Ir}$	67 %	$1/2?$						
$^{203}_{81}\text{Tl}$	29,4 %	$1/2$						
$^{205}_{81}\text{Tl}$	70,6 %	$1/2$						

Anmerkung: Cp: siehe Dissertation H. Gollnow, im Erscheinen.  
 Br: siehe J. P. Blewett, Phys. Rev. 49, 900, 1936.

Spin enthalten, zeigen die Mengenverhältnisse der Isotopen einen bestimmten Gang, der in Fig. 2 dargestellt ist.

Als Abszisse sind die Massenzahl und als Ordinate die prozentuale Häufigkeit des leichteren Isotops aufgetragen. Die Elemente Rb und Sb, deren Isotope ja verschiedene mechanische Momente haben und definitionsgemäß nicht zu dieser Rubrik gehören, fallen auch aus dem Kurvenzug

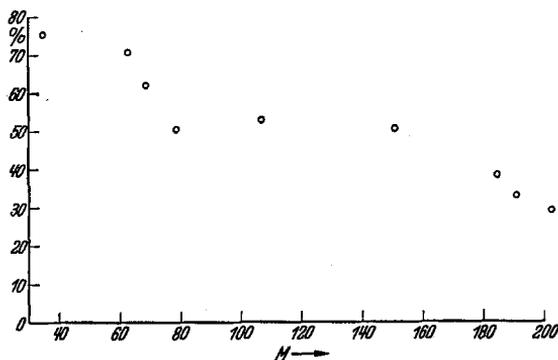


Fig. 2.

heraus. Dieser Befund läßt sich so formulieren: Bei den Elementen mit *ungerader Ordnungszahl* und zwei Isotope, deren Häufigkeit etwa von der gleichen Größenordnung ist, zeigt das Mengenverhältnis oder, was damit parallel gehen sollte, die relative Stabilität der Isotope einen klaren Gang, wenn man mit Hilfe der mechanischen Momente die Elemente sondert.

Weiter sieht man noch aus der Tabelle 2, daß die Isotope bei weitaus den meisten Elementen das gleiche mechanische Moment besitzen<sup>1)</sup> und daß bei den wenigen Elementen, bei denen der Spin sich ändert, die Änderung nur eine Einheit beträgt

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß aus den Hyperfeinstrukturen sich bereits eine Anzahl von Regeln für den Aufbau des Atomkerns angeben lassen, die, wie die Vervollständigung des Beobachtungsmaterials beweist, ohne Ausnahme gelten.

Diese Untersuchung wurde mit der dankenswerten Unterstützung der I. G. Farbenindustrie, Ludwigshafen-Oppau, durchgeführt.

<sup>1)</sup> H. Schüler u. Th. Schmidt, ZS. f. Phys. **94**, 457, 1935.