Zeitschrift: Helvetica Physica Acta
Band: 23 (1950)
Heft: I-II

Artikel: Rotationsspektren der Atomkerne
Autor: Preiswerk, Peter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-112091

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 04.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Rotationsspektren der Atomkerne

von **Peter Preiswerk.**

(18. X. 1949.)

Die experimentelle Kernspektroskopie hat schon recht zahlreiche Daten über die Anregungsstufen der Atomkerne geliefert. Doch fehlen geeignete Prinzipe, die in diese Mannigfaltigkeit Ordnung brächten. Es wurden schon frühzeitig Versuche unternommen[1]), von speziellen Modellen, die der Atom- und Molekularphysik entnommen wurden, auszugehen und daraus die möglichen Kernniveaux abzuleiten. Die besten — und weiter ausbaufähige — Resultate wurden für die leichten Kerne durch Betrachtungen über Rotationen und Vibrationen eines aus α-Teilchen aufgebauten Gebildes erzielt[2]). Die allgemeine Anwendung des Modells des starren Rotators wurde hauptsächlich von GUGGENHEIMER diskutiert und befürwortet[3]). Seine Ergebnisse lassen aber keinen eindeutigen Entscheid über die Brauchbarkeit des Modelles zu. Wenn hier erneut die Frage aufgeworfen wird[4]), ob von diesem einfachen — und im Grunde genommen sehr allgemeinen — Modell ausgehend, ein Teil der Kernniveaux beschrieben werden kann, so geschieht es aus der Meinung heraus, dass manche in den bisherigen Diskussionen gebrauchte Argumente nicht mehr stichhaltig sind, und dass, sollte sich die Anwendbarkeit erweisen, eine nicht triviale Eigenschaft der Atomkerne in Erfahrung gebracht wäre.

Der Versuch besteht im Vergleich der aus dem Modell folgenden Aussagen mit den empirischen kernspektroskopischen Daten. In einer ersten Näherung werden zunächst die Kerne als starre kugelsymmetrische Körper betrachtet. Diese Annahme liefert bereits die Lage der möglichen Rotationsanregungsstufen, wenn die Trägheitsmomente I der verschiedenen Kerne bekannt sind. Man wird nicht sehr fehl gehen, wenn man für den Trägheitsradius den nach dem Tröpfchenmodell aus der Bindungsenergie folgenden Kernradius $R = A^{1/3} r_0$, unter Benützung des numerischen Wertes $r_0 = 1{,}4\ 10^{-13}$ cm, probeweise einsetzt. Kann dadurch eine Übereinstimmung erzielt werden, so wird der Trägheitsradius der Kerne zu einer experimentell sehr genau bestimmbaren Grösse werden.

Tabelle 1.

Energie-Niveaux (Energie in MeV)

A	Kern	J 1	2	3	4	
10	B		3,58	7,26		
11	B			5,8		
12	C			5,5	9,5	
13	C	0,8			8,25	(5) 12,5
13	N		2,29			
14	N			4,0		
15	N				6,0	
16	N		1,64			
16	O				5,5	
19	F		1,2			
20	Ne			2,2		(5) 5,4 (6) 7,8
21	Ne	0,31 ± 0,09			3,58	
24	Mg		0,83	1,66	(2,76)	(5) 4,16 (6) 7,70
25	Mg		0,78	1,55	2,6	
28	Al				2,15	
29	Si			1,25		
43	Ca				1,05	
49	Sc				0,8	
52	V	0,080				
56	Mn					(5) 1,07 (7) 1,77 (8) 2,48 (10) 3,61 (11) 4,38
57	Fe		0,202			
60	Co	0,0589				
62	Ni				0,56	
65	Zn	0,0538	0,17			
67	Zn		0,301			
75	As		0,124		0,405	
78	Se		0,1077			
80	Br	0,037				
83	Br				0,34	
87	Sr	0,034	0,102	0,184	0,313	
103	Rh	0,0235			0,239	
125	Te				0,174	
134	Cs				0,150	
141	Pr				0,145	(6) 0,315
142	Nd				0,1337	
144	Nd				0,135	
152	Gd				0,123	
153	Eu			0,0695		(5) 0,1725
154	Gd		0,0399		0,1221	
152/154	Sm				0,124	(6) 0,247
181	Ta				0,087	(5) 0,134
182	W			0,0583	0,0931	(5) 0,138
199	Hg		0,025	0,052		
210	Bi	0,076	0,024	0,0463	0,078	
227	RdAc			0,037		
231	Pa		(0,019)	0,035		
237	Np				0,057	

Zahlenmässige Übereinstimmung der nach der Rotatorformel

$$E_J = \frac{\hbar^2}{2I} J(J+1) = \frac{\hbar^2}{2 \cdot 0{,}4\, M_0 A^{5/3} r_0^2} J(J+1)$$

errechneten Niveaux mit empirisch bekannten ist in zahlreichen Fällen — innerhalb einer Genauigkeit von 2% — vorhanden. Die empirischen Niveaux, für welche diese Bedingung erfüllt ist, sind in Tabelle 1 aufgeführt. Zahlenmässige Übereinstimmung ist zwar notwendig, bedeutet aber noch keineswegs einen hinreichenden Beweis für die Brauchbarkeit des Modells. Dazu müssen mindestens noch zwei weitere Aussagen nachgewiesen werden.

Erstens muss die Lage der Niveaux bei verschiedenen Kernen mit $A^{-5/3}$ variieren und zweitens sollten bei den einzelnen Kernen Folgen von Rotationsstufen auftreten.

Zur Prüfung der ersten Bedingung sind in Fig. 1 die bisher bekannten Energieniveaux als Funktion der Massenzahl aufgetragen. Dabei wurden Termschemata verwendet, die plausibel erschienen. Eindeutige Termschemata sind erst in wenigen Fällen bekannt. Prüft man zunächst für das tiefste Rotationsniveau $J = 1$ die $A^{-5/3}$ Abhängigkeit, so findet man diese durch eine Reihe von bekannten Niveaux bestätigt. Das bisherige Material zeigt, dass bis auf zwei Ausnahmen das erste Rotationsniveau der tiefste allgemeine Anregungszustand ist. Eine Ausnahme bilden die leichten Kerne, bei welchen das erste Rotationsniveau schon hoch, bei rund 1 MeV, liegt. Die andere Ausnahme umfasst einige isomere Zustände.

Die empirischen Werte der als erste Rotationsstufe deutbaren Niveaux dürfen jetzt zu einer besseren Anpassung der theoretischen Werte benützt werden. Als Mittelwert aus den Energieniveaux verschiedener Kerne ergibt sich:

$$r_0 = 1{,}37 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$$

Auch bei den nächsthöheren Niveaux $J = 2{,}3$, und 4 ist die Kurve, die die $A^{-5/3}$-Abhängigkeit enthält mit experimentellen Punkten belegt. Bei noch höheren Niveaux lässt sich eine solche Abhängigkeit ebenfalls nachweisen, doch wird auf einen Beleg verzichtet, da bei den höheren Niveaux die Gefahr, dass zufällig Punkte auf die Kurven zu liegen kommen, anwächst.

Dass auch die zweite, weitere Forderung, dass Folgen von Rotationsniveaux auftreten können, erfüllt ist, zeigt die Tabelle 1. Niveaux, entsprechend J höher als 4 wurden nur dann aufgeführt, wenn beim selben Kern auch das Auftreten tiefer liegender Ro-

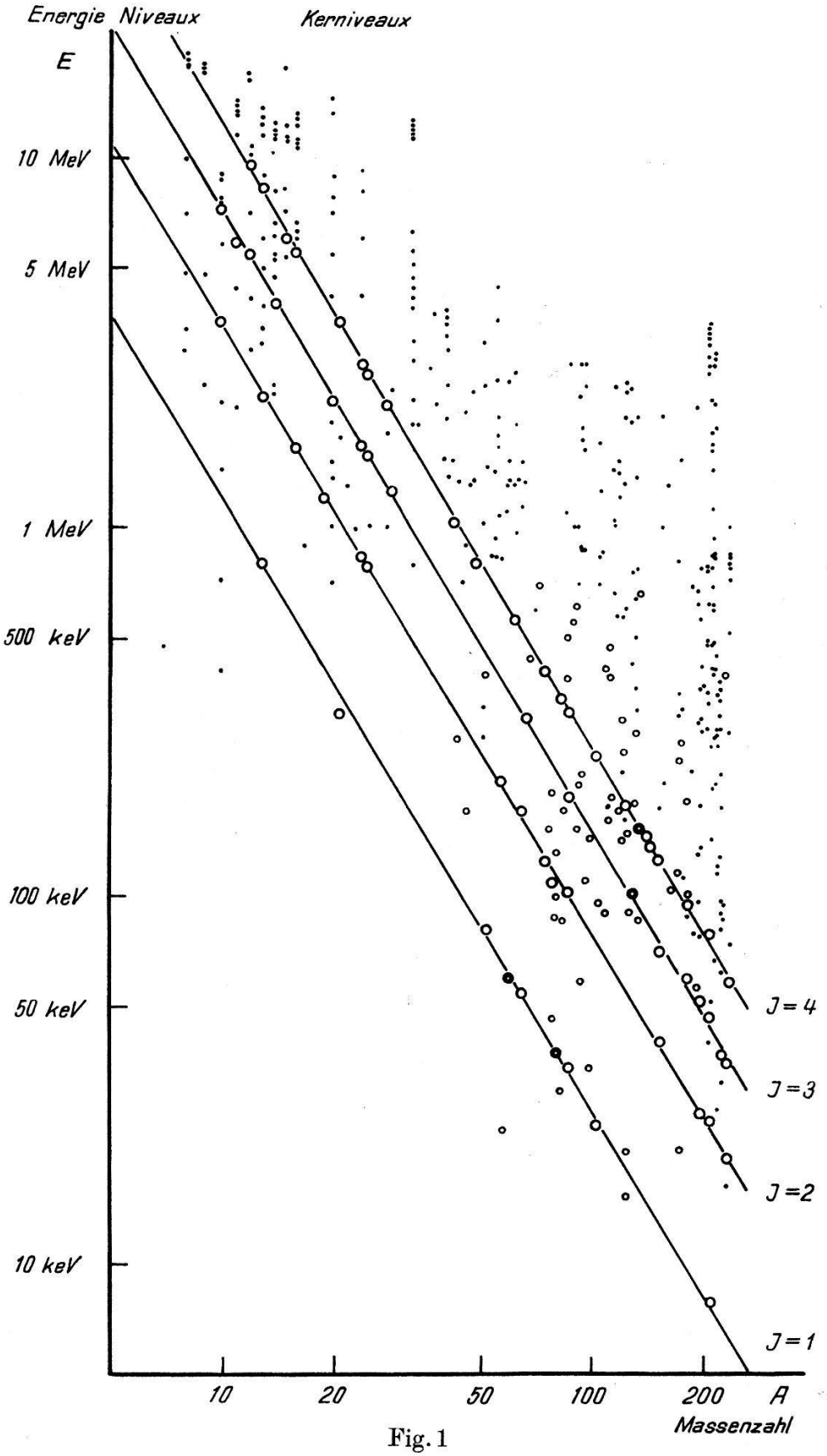

Fig. 1

○ Niveaux der Tabelle 1 ∘ Metastabile Niveaux • Übrige Niveaux

tationsniveaux festgestellt wurde. Aus dieser Tabelle seien zwei Beispiele herausgegriffen, die in mancher Hinsicht aufschlussreich sind.

Das Beispiel des Bi^{210}-Kernes zeigt zunächst, dass bei den schweren Kernen in der Tat Niveaux mit sehr geringer Anregungsenergie, wie sie nach dem Rotatormodell zu erwarten sind, auftreten können. Experimentell wurden bei der RaD—RaE-Umwandlung durch Aufnahmen mit Kristallspektrographen und Wilsonkammer γ-Linien beobachtet, deren Wellenlängen in den Bereich der Röntgenstrahlen fallen. Die beobachteten Linien — die nicht gesicherte 43-keV-Linie wurde weggelassen — sind in Tabelle 2 aufgeführt. Es ist in diesem Zusammenhang nicht unwichtig zu bemerken, dass die 7 keV-γ-Linie durch Messungen mit der neuen Proportionalzählermethode sichergestellt wurde.

Tabelle 2.

γ-Linien der RaD-RaE-Umwandlung und Energieniveaux des Bi^{210} (RaE)

Experimentelle Werte		Deutung als Rotationsspektrum	
nach FRILLEY, SURUGUE TSIEN TSIANG[5])	nach CURRAN, ANGUS, COCKROFT[6])		
46,7 keV	46,0 keV	$6 \times 7{,}75 = 46{,}5$	$J = 3 - J = 0$
37		$5 \times 7{,}75 = 38{,}8$	$J = 3 - J = 1$
32		$4 \times 7{,}75 = 31{,}0$	$J = 4 - J = 3$
23,2	25,8	$3 \times 7{,}75 = 23{,}3$	$J = 3 - J = 2$
			$J = 2 - J = 0$
7,3	7,8	$1 \times 7{,}75 = 7{,}8$	$J = 1 - J = 0$

Die Energiewerte dieser Linien stehen in rationalen Verhältnissen. Sie sind ganze Vielfache von 7,75 keV und lassen sich als Differenzlinien der Rotationsniveaux $J = 0$ bis $J = 4$ interpretieren. Errechnet man daraus den Wert von r_0, so erhält man $r_0 = 1{,}35\ 10^{-13}$ cm, einen Wert, der etwas kleiner ist als der, welcher als Mittelwert aus Niveaux verschiedener Kerne abgeleitet wurde. Es ist sehr wohl denkbar, dass das Kernvolumen einen von const. $A r_0^3$ leicht abweichenden Gang aufweist. Die Fehlergrenzen der spektroskopischen Werte sind noch zu gross, um mit Sicherheit auf ein solches Verhalten schliessen zu lassen.

Als weiteres Beispiel führen wir die Anregungsstufen eines leichten Kernes Mg^{24} an. Auch hier fände das rationale Verhältnis der Energie der beiden γ-Linien, 1,380 MeV und 2,765 MeV, die bei der Umwandlung des Na^{24} emittiert werden, eine Erklärung. Diese Annahme würde zu einem Rotationsniveau mit $J = 4$ bei 2,76 MeV und einem solchen von $J = 5$ bei 4,14 MeV mit $r_0 = 1{,}38\ 10^{-13}$ führen.

Es ist bemerkenswert, dass die tiefer liegenden Niveaux, ausgenommen das Niveau $J = 1$, bei anderen Anregungsreaktionen in Erscheinung treten. Siehe Tabelle 3.

Tabelle 3.
Energieniveaux des Mg^{24}

Theoretische Rotationsniveaux	Anregungsreaktion		
	$Na^{24}(\beta)Mg^{24}$ [7]	$Na^{23}(dn)Mg^{24}$ [8]	$Mg^{24}(pp)Mg^{24}$ [9]
$J = 7$ 7,73 MeV		7,70 MeV	7,32 ± 0,3 MeV
$J = 6$ 5,78			5,51 ± 0,2
$J = 5$ 4,14	4,14	4,16	4,17 ± 0,2
$J = 4$ 2,76	(2,76)		
$J = 3$ 1,65		1,66	1,58 ± 0,2
	(1,38)		1,45 ± 0,2
$J = 2$ 0,83		0,83	1,00 ± 0,2
$J = 1$ 0,28			

Mit den in Tabelle 1 aufgeführten Niveaux wird ein relativ grosser Teil aller in diesem Energiebereich beobachteten Niveaux erfasst. Als Kriterium für die Aufnahme von experimentell bestimmten Niveaux in der Tabelle 1 wurde nur verlangt, dass die Energiewerte mit denen der errechneten Rotationsniveaux zusammenfallen. Es können sich daher sehr wohl auch Niveaux darunter befinden, die einem anderen Anregungsmechanismus zuzuordnen sind, zufällig aber in den Energiewerten übereinstimmen. Zusätzliche Daten, die eine eindeutige Entscheidung zulassen würden, sind leider vorläufig nur spärlich vorhanden. In manchen Fällen kann die experimentelle Bestimmung des Multipolcharakters der emittierten Strahlung ein Unterscheidungsmerkmal abgeben. Die meisten isomeren Niveaux figurieren nicht in Tabelle 1. Von vorneherein war zu erwarten, dass dieser Klasse ein anderer — oder zumindest ein zusätzlicher — Anregungsmechanismus entspricht.

Es ist andererseits möglich, dass einem Teil der in Tabelle 1 nicht angeführten Niveaux ebenfalls reine Rotationsanregungen entsprechen, aber als solche direkt nicht erkannt werden. So hat eine Reihe von γ-Linien eine Energie, die der Differenz von Rotationsniveaux entspricht, ohne dass aber eine γ-Linie beobachtet worden wäre, die einem Kaskadenübergang in den Grundzustand entspricht. Es gibt Fälle, in denen der zweite Übergang schwerer nachzuweisen ist und aus diesem Grunde noch unbekannt sein kann. In diesen Fällen erlaubt das Modell, das Auftreten der zweiten Linie vorauszusagen. Es ist der augenfälligste Beweis für die Nützlichkeit

einer Theorie, wenn sich ihre Voraussagungen als richtig erweisen. Die Suche nach einigen dieser zu erwartenden Linien ist im Gange. Bei der Untersuchung der Umwandlung des Cu^{61} konnte auf Grund dieser Überlegungen eine neue γ-Linie aufgefunden werden[10]).

Die angeführten Kriterien sprechen für die Brauchbarkeit des Modells. Ein erster Schritt ist damit getan. Von vorneherein war klar, dass das Modell in dieser ersten Näherung nur zur Beschreibung einer Gruppe von Erscheinungen ausreichen kann. In mancher Hinsicht, selbst wenn nur reine Rotationen beschrieben werden sollen, ist es ungenügend und bedarf der Ergänzung und der Erweiterung. Dieser nächste erforderliche Schritt besteht vorerst mehr in einem Programm, als in der Mitteilung von Ergebnissen und in der Diskussion der Möglichkeiten, die sich aus den bisherigen Erkenntnissen ergeben.

Eine wesentliche Lücke besteht darin, dass die Regeln, die die Wahrscheinlichkeiten der Übergänge bestimmen, noch fehlen. Diese auf dem empirischen Weg, den wir bisher eingeschlagen haben, abzuleiten, scheint nicht sehr aussichtsreich. Aus den vorliegenden Daten lassen sich nur einige Auffälligkeiten herausschälen. Die theoretische Behandlung müsste weitere Zusatzhypothesen über die Kernstruktur einführen, was wir hier aber noch nicht zu tun wagen.

Eine erste Erweiterung des Modells lässt sich hingegen leicht angeben. Kerne besonders mit einer Protonenzahl um 70 weichen, wie die Quadrupolmomente zeigen, merklich von der Kugelgestalt ab. Für diese Kerne ist die allgemeinere Rotatorformel mit zwei Trägheitsmomenten I_a und I_b zu verwenden.

$$E_{JK} = \frac{h^2}{2}\left[\frac{1}{I_a} J(J+1) + \left(\frac{1}{I_b} - \frac{1}{I_a}\right) K^2\right]$$

Rechnet man mit den Elongationen, die die empirischen Quadrupolmomente zeigen, so ergibt sich, dass die Aufspaltung der Rotationslinien, die jetzt zu erwarten sind und in den verschiedenen Quantenzahlen K ($|K| \leq J$) zum Ausdruck kommen, einige keV betragen kann. Aufspaltungen von γ-Linien sollten also bei den Kernen mit grossem Quadrupolmoment beobachtbar sein. Man ist versucht, das Auftreten von zahlreichen Linien, die in den Spektren der seltenen Erden und des Tantals beobachtet wurden, und deren Energien sich teilweise nur um einige keV unterscheiden, damit in Zusammenhang zu bringen. Um sichere Schlüsse ziehen zu können, muss man die einwandfreie experimentelle Bestätigung dieser Linien und ihre genauere Messung abwarten. Immerhin scheint diese Prüfung lohnend, da das Modell die Möglichkeit verspricht, Quadrupolmomente auf kernspektroskopische Weise zu bestimmen.

Aufspaltungen von Rotationslinien sind ferner zu erwarten, sobald man den Gesamtspin der Kerne in Betracht zieht. Und wiederum ist man versucht, einzelne Gruppen von Niveaux in der Nähe von Rotationsniveaux damit in Zusammenhang zu bringen. Zum Beispiel sind vielleicht die Niveaux 202 keV und 215 keV des Fe^{57} als Aufspaltung des Rotationszustandes $J = 2$, und die beiden isomeren Niveaux 20 keV und 15 keV des Sb^{124} als Aufspaltung des Rotationszustandes $J = 1$ zu interpretieren. Neben einer Kopplung zwischen Spin und Bahn darf die magnetische Kopplung bei Rotationen des Gesamtkernes wohl nicht vernachlässigt werden.

Lassen wir das Modell des starren Rotators — schon in seiner jetzigen noch mangelhaften Form — als Arbeitshypothese zu, so öffnet sich noch ein weiterer Weg: die Kernniveaux lassen sich klassifizieren. Man kann die Gruppe der Niveaux, die als reine Rotationsniveaux erscheinen, von der Gesamtheit abtrennen. Es bestehen Anzeichen dafür, dass bei der Restgruppe Regelmässigkeiten zum Vorschein kommen, die bisher verwischt waren.

Physikalisches Institut der ETH., Zürich.

Literatur.

[1]) Thibaud, C. R. **191**, 656 (1930).

[2]) Teller, Wheeler, P. R. **53**, 778 (1937).

[3]) Guggenheimer, Proc. Roy. Soc. **181**, 169 (1943).

[4]) Vorl. Mitt. Preiswerk, H.P.A. **22**, 372 (1949).

[5]) Frilley, Surugue, Tsien San Tsiang, J. de Physique Radium (Sér. 8) **7**, 350, (1946).

[6]) Curran, Angus, Cockcroft, Phil. Mag. **40**, 36 (1949).

[7]) Siegbahn, P. R. **70**, 127 (1946); Robinson, Ter-Pergossian, Cook, P. R. **75**, 1099 (1949).

[8]) Mandeville, P.R. **76**, 436 (1949).

[9]) Fulbright, Bush, P. R. **74**, 1323 (1948).

[10]) Noch unveröffentlicht.