

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ТАБЛИЦА ЯДЕРНЫХ МОМЕНТОВ*)

Дж. Е. Макк

I. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ТАБЛИЦЫ

Ниже приведена таблица ядерных моментов по данным на январь 1950 г. Таблица снабжена рядом пояснений, не являющихся, однако, общим обзором вопроса о ядерных моментах.

Окончательные таблицы могут быть составлены только в тех областях, изучение которых завершено. В отношении же ядерных моментов, которые продолжают активно изучаться, сделать этого нельзя. Поэтому всякая таблица моментов устаревает раньше, чем она достигает читателя. Но, с другой стороны, в настоящее время такая таблица особенно полезна. Предыдущие таблицы такого типа¹⁻¹⁴ свидетельствуют о неуклонном росте числа изученных ядер. Это ясно видно из нижеследующей таблицы (а). Сейчас наступил переходный период: имеются экспериментальные сведения о ядерных моментах всех 109 устойчивых изотопов (за исключением 15) с нечётным массовым числом. Основное внимание уделяется теперь повышению точности определения моментов. Тем не менее, несколько приведённых значений спинов уже нуждаются в новом определении, многие устойчивые чётно-чётные изотопы и большое число радиоактивных ядер остаются неизученными; изучение квадрупольных и более высоких мультипольных моментов только начато.

Таблица I (см. стр. 396—411), составленная в начале 1950 г., содержит значения механических или спиновых моментов I и наиболее вероятные значения магнитных дипольных моментов μ и электрических квадрупольных моментов Q для каждого ядра в нормальном состоянии. Здесь спин I выражен в единицах \hbar , момент μ — в единицах ядерного магнетона $e\hbar/2M_p c$ и Q — в единицах, равных $e \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$, где e — величина электронного заряда в CGSE, M_p — масса покоя протона и c — скорость света в вакууме. Положительное значение Q означает вытянутое, а отрицательное значение Q — сплюснутое, несферическое распределение заряда,

*) J. E. Mack, Rev. Mod. Phys. 22, 64 (1950).

Таблица а

Эволюция таблиц ядерных моментов

Ссылка на литературу	Год	Количество ядер	Нечётные ядра	Максимальное число знаков	Квадратные моменты	Расхождения в значениях / с настоящей таблицей (приблизительно)
1	1930	13	12	—	0	1
2	1931	40	23	—	0	6
3	1932	52	34	—	0	7
4	1933	55	36	—	0	6
5	1934	74	51	2	0	7
6	1935	—	—	—	8	—
7	1936	71	64	2	3	8
8	1937	121	72	—	—	8
9	1938	102	70	3	—	5
10	1938	—	—	—	16	—
11	1941— —1946	81	72	4	20	4
12	1946	89	78	5	21	5
13	1948	107	87	5	28	5
14	1949	112	98	7	39	3
Настоящая таблица	1950	180	101	7	54	—

так как $Q = \int \int \rho_I (3z^2 - r^2) d\tau$, где ρ_I — плотность заряда в состоянии с $m_I = I$ и остальные обозначения имеют свои обычные значения.

Каждый столбец таблицы соответственно означает:

1. N — число нейтронов (жирным шрифтом нечётное N).
2. Z — число протонов или атомный номер (жирным шрифтом нечётное Z).
3. Химический символ элемента.
4. $A = N + Z$, массовое число (звёздочкой отмечены радиоактивные ядра).
5. I (в единицах \hbar).
6. μ (в единицах $e\hbar, 2M_p c$).
7. Q (в единицах $e \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$).
8. Ссылки на литературу, относящуюся к значениям I .
9. Ссылки на литературу, относящуюся к μ (курсивом указаны статьи, использованные при вычислениях).
10. Ссылки на литературу, относящуюся к Q (курсивом отмечены статьи, использованные при вычислениях).
11. Химические символы элементов (второй раз).
12. Массовое число (второй раз).

Величины, могущие считаться сомнительными, заключены в скобки (когда кроме заключённой в скобки величины приведена величина, не заключённая в скобки, последняя предполагается более вероятной). Вопросительный знак внутри скобок указывает на сильное сомнение и на отсутствие сколько-нибудь строгих и окончательных доказательств. Для ядер с нечётными ядерными числами, данные для которых ещё не получены, в таблице оставлены пустые места.

В конце статьи приведён список литературы, четыре столбца которого соответственно обозначают: 1) символ, указывающий автора и год; 2) ссылку на статью; 3) химические символы элементов, которым посвящена данная статья, и 4) символ, указывающий на характер экспериментальных данных, согласно следующим обозначениям, заимствованным из предыдущих таблиц ^{3, 13, 14}:

- A — магнитно-резонансный метод с атомным пучком,
- B — полосатый спектр,
- C — спектр комбинационного рассеяния,
- H — теплоёмкость,
- M — магнитно-резонансный метод с молекулярным пучком,
- N — ядерное рассеяние,
- O — орто-пара превращение,
- P — поляризация резонансного излучения,
- R — резонансное поглощение или индукция,
- S — сверхтонкая структура в линейчатых спектрах,
- W — поглощение микрорадиоволн,
- Z — отклонение атомного пучка.

ЯДЕРНЫЕ

N	Z	АТОМ	A	$I (\hbar)$	μ (я. м.)	$Q (e \cdot 10^{-24} \text{ см}^2)$
1	0	п	1*	$1/2$	$-1,91280$ ± 9	
0	1	H	1	$1/2$	$+2,79255$ (раздел IIIA)	
1	1	H	2	1	$+0,857354$ ± 9	$+0,00273$ ± 5
2	1	H	3*	$1/2$	$+2,978643$ ± 28	
1	2	He	3	$1/2$	$(-), 2,127414$ ± 3	
2	2	He	4	0		
3	3	Li	6	1	$+0,82189$ $\pm 4h$	$ < 9 \cdot 10^{-4} $
4	3	Li	7	$3/2$	$+3,25586$ ± 11	
5	4	Be	9	см. табл. (b)	$(-), 0,7849 \times I$ ± 5	
5	5	B	10	3	$+1,8004$ ± 7	$+0,06$ ± 4
6	5	B	11	$3/2$	$+2,68858$ ± 28	
6	6	C	12	0		$+0,03$ ± 2
7	6	C	13	$1/2$	$+0,70225$ ± 14	
8	6	C	14*	0		
7	7	N	14	1	$+0,40365$ ± 3	$+0,02$
8	7	N	15	$1/2$	$-0,28299$ ± 3	
8	8	O	16	0		
9	8	O	17	$(1/2)$		$ < 0,02 $
10	8	O	18	(0)		$ 4 \cdot 10^{-3} $
10	9	F	19	$1/2$	$+2,6285$ ± 7	

Таблица I

МОМЕНТЫ

Ссылки			Атом	А
I	μ	Q		
SI37	AC40, AQ47, BL48, RV49		n	1*
DM27, HM30	KE39 ₂ , ML41, TH49, TA49, RV49, GD49, HP49		ll	1
FA34, MY34	KE39 ₂ , AQ47, RU47, BL47 ₃ , BI47, WJ49, SN49, ZI49, SR50	KE39 ₁	ll	2
BL47 ₁ , DQ49	AN47, BL47 ₂		H	3*
DS49	AN48		He	3
MU29			He	4
MB37	KU49 ₂ , KU49 ₄	KU49 ₁	Li	6
HE30, GS30, GU31	GS32, FP35, ML41, BI49, KU49 ₂ , SN49, ZI49	KU49 ₃	Li	7
	KU39 ₁ , DN49 ₁ , CH49		Be	9
GO48 ₁	ML39 ₁ , BI49	GO48 ₁	B	10
GO48 ₂	ML39 ₁ , BI49, AD49, ZI49, AE49	GO48 ₂	B	11
MU29, HM30			C	12
TW39, HH41, JE47, TW47 ₂	HH41, PH49		C	13
JE48, RU48			C	14*
KR28, OR28, RR29, TW47 ₁	KU39 ₂ , PR50	DE46, TW47 ₁ , TW48	N	14
KS38, WO38	ZA40, PR50		N	15
MU29			O	16
		LO49	O	17
		TW48	O	18
GA29, GO48 ₁	CA33, ML41, PH49, SN49, ZI49		F	19

N	Z	Атом	A	$I (\hbar)$	μ (я. м.)	$Q (e \cdot 10^{-24} \text{ см}^2)$
10	10	Ne	20	(0)	~ 0	
11	10	Ne	21	$3/2 (> 3/2?)$	< 0	
12	10	Ne	22	(0)	\sim	
11	11	Na	22*	3	$+1,74582$ $\pm 22h$	
12	11	Na	23	$3/2$	$+2,21711$ ± 25	
12	12	Mg	24	(0)	~ 0	
13	12	Mg	25	$5/2 (\pm)$ табл. (b)	$-0,96 (\pm)$ $\pm 7h$	
14	12	Mg	26	(0)	~ 0	
14	13	Al	27	$5/2$	$+3,6408$ ± 4	$+0,156$ ± 3
14	14	Si	28	(0)		~ 0
15	14	Si	29	$(1/2)$		~ 0
16	14	Si	30	(0)		~ 0
16	15	P	31	$1/2$	$+1,13165$ ± 20	
16	16	S	32	0		
17	16	S	33	$3/2$	$(+)(0,3 \pm 0,2; 0,9)$	$-0,08$
18	16	S	34	(0)		$ < 2 \cdot 10^{-3} $
19	16	S	35*	$3/2$		$+0,06$
20	16	S	36	(0)		$< 0,01$
18	17	Cl	35	$3/2$	$+0,82191$ ± 22	$-0,0795$ ± 5
19	17	Cl	36*	2		$-0,0172$ ± 4
20	17	Cl	37	$3/2$	$+0,68414$ ± 24	$-0,0621$ ± 5
18	18	A	36	(0)	~ 0	
22	18	A	40	(0)	~ 0	
20	19	K	39	$3/2$	$+0,391$ $\pm 1h$	
21	19	K	40*	4	$-1,291$ $\pm 4h$	
22	19	K	41	$3/2$	$+0,215$ $\pm 1h$	

Таблица I (Продолжение)

Ссылки			Атом	А
	μ	Q		
KH49	HC27		Ne	20
	KH49		Ne	21
	HC27		Ne	22
DI48 ₁	DI49 ₂		Na	22*
JF33, GS33, RA34	EL34, FP35, ML41, BI49, KU49 ₂ , ZI49		Na	23
	MW31		Mg	24
CR49 ₃ , CR50	CR49 ₃		Mg	25
	AR50		Mg	26
HN38 ₂ , LE49	ML39 ₂ , BI49, ZI49	LE48, DI49 ₃ , LE49	Al	27
		TW49 ₂	Si	28
		TW49 ₂	Si	29
		TW49 ₂	Si	30
JE32	PO48 ₂ , BI49, CH49, CR49 ₅		P	31
ND31, OL36			S	32
TW48	JD50, RU50, XX50	TW48	S	33
		TW47 ₂ , TW48	S	34
CO49		cTW48, CO49	S	35*
		LO49	S	36
TW47 ₁	BI49, DI49 ₃ , CH49	TW48, GO48 ₁ , DI48 ₂ , DI49 ₃	Cl	35
TW49 ₁		TW49 ₁	Cl	36*
TW47 ₁	KU39 ₃ , DI49 ₃ , PR50	TW48, GO48 ₁ , DI48 ₂ , DI49 ₃	Cl	37
	KP37 ₂		A	36
	KP37 ₂		A	40
ML35, KU39 ₂	ML35, FP35, KU39 ₂ , KU40, cTA49		K	3)
ZA42	ZA42, cTA49, DI49 ₂		K	4)
ML35, MB36	ML35, MB36, KU49 ₂ , cTA49		K	41

<i>N</i>	<i>Z</i>	АТОМ	<i>A</i>	<i>I</i> (\hbar)	μ (я. м.)	Q ($e \cdot 10^{-24}$ с.м ²)
20	20	Ca	40	(0)	~ 0	
23	20	Ca	43			
24	21	Sc	45	$7/2$	+4,8	
25	22	Ti	47			
27	22	Ti	49			
28	23	V	51	$7/2$	(+) $5,1478 \pm 5$	
29	24	Cr	53			
30	25	Mn	55	$5/2$	$+3,4681 \pm 4$	
31	26	Fe	57		~ 0	
32	27	Co	59	$7/2$	$+4,6484 \pm 6$	
33	28	Ni	61		~ 0	
34	29	Cu	63	$3/2$	$+2,22617 \pm 36$	$-0,26 \pm 10$
36	29	Cu	65	$3/2$	$+2,3845 \pm 4$	$-0,15 \pm 10$
34	30	Zn	64	(0)	~ 0	
36	30	Zn	66	(0)	~ 0	
37	30	Zn	67	$5/2$	+0,9	
38	30	Zn	68	(0)	~ 0	
38	31	Ga	69	$3/2$	$+2,0167 \pm 11$	$\left. \begin{array}{l} +0,2318 \pm 23 \\ +0,1461 \pm 15 \end{array} \right\} r$
40	31	Ga	71	$3/2$	$+2,5614 \pm 10$	
38	32	Ge	70	(0)		$< 7 \cdot 10^{-3}$
40	32	Ge	72	(0)		$< 7 \cdot 10^{-3}$
41	32	Ge	73	$9/2, > 9/2$		$-0,21 \pm 10$
42	32	Ge	74	(0)		$< 7 \cdot 10^{-3}$
44	32	Ge	76	(0)		$< 7 \cdot 10^{-3}$
42	33	As	75	$3/2$	+1,4	$+0,3 \pm 2$
40	34	Se	74	(0)		

Таблица I (Продолжение)

Ссылки			Атом	А
I	μ	Q		
	FR31		Ca	40
			Ca	43
КР34 ₃ , SH34 ₄	КР37 ₁		Sc	45
			Ti	47
			Ti	49
КР34 ₃ , PR50	KG49 ₂ , PR50		V	51
			Cr	53
WH30	WH30, FI38, PR50, CH50		Mn	55
	GV49 ₂ , BS49, RW50		Fe	57
GR33 ₁ , КР34 ₁ , МО34, RS36	МО34, PR50		Co	59
	AR50		Ni	61
RT32	GQ33, SH36 ₂ , SH37 ₂ , PO48 ₁ , BI49, ZI49	SH35 ₂ , SH36 ₂ , BQ49 ₂	Cu	63
RT32	GQ33, SH36 ₂ , SH37 ₂ , PO48 ₁ , BI49, ZI49	SH35 ₂ , SH36 ₂ , BQ49 ₂	Cu	65
	MW31		Zn	64
	MW31		Zn	66
LY37, AR48	LY37		Zn	67
	MW31		Zn	68
JA32 ₁ , CA32	GQ33, SH36 ₄ , BG48, PO48 ₂	SH36 ₄ , BG48, DI49 ₃	Ga	69
JA32 ₁ , CA32	GQ33, SH36 ₄ , BG48, PO48 ₂	SH36 ₄ , BG48, DI49 ₃	Ga	71
		TW49 ₂	Ge	70
		TW49 ₂	Ge	72
TW49 ₂		TW49 ₂	Ge	73
		TW49 ₂	Ge	74
		TW49 ₂	Ge	76
TL32 ₂ , RO33, CR33, DE48	GQ33, SH35 ₂ , SH36 ₃ , MW50	SH35 ₂ , SH36 ₃ , DE48	As	75
ST49			Se	74

<i>N</i>	<i>Z</i>	АТОМ	<i>A</i>	<i>I</i> (\hbar)	μ (я. м.)	Q ($e \cdot 10^{-24}$ см ²)
42	34	Se	76	(0)	~ 0	$\left < 2 \cdot 10^{-3} \right $
43	34	Se	77	$7/2 \pm 1, (1/2)$ см. табл. б		$\left < 2 \cdot 10^{-3} \right $
44	34	Se	78	(0)	~ 0	$\left < 2 \cdot 10^{-3} \right $
46	34	Se	80	0		$\left < 2 \cdot 10^{-3} \right $
48	34	Se	82	(0)	~ 0	
44	35	Br	79	$3/2$	$+2,10576$ ± 37	$\left. \begin{array}{l} +0,26 \\ \pm 8 \\ +0,21 \\ \pm 7 \end{array} \right\} r$
46	35	Br	81	$3/2$	$+2,2696$ ± 5	
46	36	Kr	82	(0)	~ 0	
47	36	Kr	83	$9/2$	$-0,9704$	$+0,15$
48	36	Kr	84	(0)	~ 0	
50	36	Kr	86	(0)	~ 0	
48	37	Rb	85	$5/2$	$+1,3532$ ± 4	
50	37	Rb	87	$3/2$	$+2,7501$ ± 5	
48	38	Sr	86	(0)	~ 0	
49	38	Sr	87	$9/2$	$-1,1$	
50	38	Sr	88	(0)	~ 0	
50	39	Y	89	$1/2$	$-0,14$	
51	40	Zr	91	$5/2$		
52	41	Nb	93	$9/2$	$+6,1659$	~ 0
50	42	Mo	92	(0)	~ 0	
52	42	Mo	94	(0)	~ 0	
53	42	Mo	95	$(5/2)$		
54	42	Mo	96	(0)	~ 0	
55	42	Mo	97	$(5/2)$		
56	42	Mo	98	(0)	~ 0	
58	42	Mo	100	(0)	~ 0	
55	44	Ru	99			
57	44	Ru	101			

Таблица I (Продолжение)

Ссылки			Атом	А
I	μ	Q		
ST49	RF33	ST49, TW49	Se	76
ST49, MA49 ₁		ST49, GO50, TW50	Se	77
ST49	RF33	ST49, TW50	Se	78
OL34, ST49		ST49, TW50	Se	80
	RF33		Se	82
BU30, TL32 ₁ , TW47 ₁	CA33, BR47, PO47, ZI49	TL40, GO47, GO48 ₁ , TW48, PO47	Br	79
BU30, TL32 ₁ , TW47 ₁	CA33, BR47, PO47, BI49, ZI49	TL40, GO47, GO48 ₁ , TW48, PO47	Br	81
	KP33 ₃		Kr	82
MW32, KQ38, KH49	KP33 ₂ , SH38, KE46	KQ38, SH38	Kr	83
	KP33 ₂		Kr	84
	KP33 ₃		Kr	86
KP33 ₁ , ML36	KP33 ₁ , KU39 ₃ , BI49, KU49 ₂ , CH49		Rb	85
KP33 ₁ , ML36	KP33 ₁ , KU39 ₃ , BI49, ZI49		Rb	87
	FR31		Sr	86
HN38 ₁	HN38 ₁		Sr	87
	FR31		Sr	88
WK40, CR49 ₄	WK40, CR49 ₄		Y	89
AR49 ₁			Zr	91
BF34	MF47, CH50	MF47	Nb	93
	AR50		Mo	92
	AR50		Mo	94
	AR50		Mo	95
	AR50		Mo	96
	AR50		Mo	97
	AR50		Mo	98
	AR50		Mo	100
			Ru	99
			Ru	101

<i>N</i>	<i>Z</i>	Атом	<i>A</i>	<i>I</i> (\hbar)	μ (я. м.)	<i>Q</i> ($e \cdot 10^{-24}$ см ²)
58	45	Rh	103	($1/2^?$)	> 0	
59	46	Pd	105			
60	47	Ag	107	$1/2$	$-0,086$	
62	47	Ag	109	$1/2$	$-0,160$	
62	48	Cd	110	(0)	~ 0	
63	48	Cd	111	$1/2$	$-0,59492$ ± 8	
64	48	Cd	112	(0)	~ 0	
65	48	Cd	113	$1/2$	$-0,62238$ ± 8	
66	48	Cd	114	(0)	~ 0	
68	48	Cd	116	(0)	~ 0	
64	49	In	113	$3/2$	$+5,486$ $\pm 3h$	1,144
66	49	In	115	$3/2$	$+5,500$ $\pm 3h$	
65	50	Sn	115	$1/2$	$-0,91779$ ± 10	
66	50	Sn	116	(0)	~ 0	
67	50	Sn	117	$1/2$	$-0,99982$ ± 10	1,161
68	50	Sn	118	(0)	~ 0	
69	50	Sn	119	$1/2$	$-1,04600$ ± 10	
70	50	Sn	120	(0)	~ 0	
70	51	Sb	121	$5/2$	$+3,7$	$-0,3$ ± 2
72	51	Sb	123	$7/2$	$+2,8$	
71	52	Te	123	$1/2$		$-1,2$ ± 2
73	52	Te	125	$1/2$		
74	52	Te	126	(0)	~ 0	
76	52	Te	128	(0)	~ 0	
78	52	Te	130	(0)	~ 0	

Таблица I (Продолжение)

Ссылки			Атом	А
<i>I</i>	μ	<i>Q</i>		
SM37	SM37		Rh	103
			Pd	105
JA37	JA37, CR49 ₁		Ag	107
JA37	JA37, CR49 ₁		Ag	109
	SH29		Cd	110
SH29	GQ33, JO33 ₁ , PR49 ₃ , PR50		Cd	111
	SH29		Cd	112
SH29	GQ33, JO33 ₁ , PR49 ₃ , PR50		Cd	113
	SH29		Cd	114
	SH29		Cd	116
JA32 ₂ , BA37, HD42	HD42, cTA49	MD50	In	113
CA32, JA32 ₂ , PC34	SH37 ₁ , ML38, KU48, cTA49, MD50	SH35 ₂ , BA37, HA39, DI49 ₃ , MD50	In	115
GV49 ₁	GV49 ₁ , PR49 ₃ , PR50		Sn	115
	MW31		Sn	116
SH33, TL33	TL33, TL41, PR49 ₂ , PR50		Sn	117
	MW31		Sn	118
SH33, TL33	TL33, TL41, PR49 ₂ , PR50		Sn	119
	MW31		Sn	120
BD32, CR34	GQ33, CR34	SH35 ₂ , TM40, MW49	Sb	121
BD32, CR34	GQ33, CR34	SH35 ₂ , TM40, MW49	Sb	123
MA49 ₂	MA49 ₂		Te	123
FO49			Te	125
	RF33		Te	126
	RF33		Te	128
	RF33		Te	130

<i>N</i>	<i>Z</i>	Атом	<i>A</i>	<i>I</i> (\hbar)	μ (я. м.)	Q ($e \cdot 10^{-24}$ см ³)
74	53	I	127	$5/2$	$+2,8086$ ± 8	$-0,59$ ± 20
76	53	I	129*	$7/2$	$(+) 2,74$ $\pm 14h$	$-0,43$ ± 15
75	54	Xe	129	$1/2$	$-0,8$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} r$
77	54	Xe	131	$3/2$	$+0,7$	
78	54	Xe	132	(0)	~ 0	
80	54	Xe	134	(0)	~ 0	
82	54	Xe	136	(0)	~ 0	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} r$
78	55	Cs	133	$7/2$	$+2,5771$ ± 9	
80	55	Cs	135*	$7/2$	$+2,7271$ $\pm 33h$	
82	55	Cs	137*	$7/2$	$+2,8397$ $\pm 30h$	
78	56	Ba	134	(0)	~ 0	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} r$
79	56	Ba	135	$3/2$	$+0,8346$ $\pm 25h$	
80	56	Ba	136	(0)	~ 0	
81	56	Ba	137	$3/2$	$+0,9351$ $\pm 27h$	
82	56	Ba	138	(0)	~ 0	$\neq 0$
82	57	La	139	$7/2$	$+2,7760$ ± 28	
82	59	Pr	141	$5/2$	$+4,5938$	
83	60	Nd	143			
85	60	Nd	145			
85	62	Sm	147	$(> 1/2)$		
87	62	Sm	149	$(> 1/2)$		
88	63	Eu	151	$5/2$	$+3,4$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} r$
90	63	Eu	153	$5/2$	$+1,5$	
91	64	Gd	155			
93	64	Gd	157			
94	65	Tb	159	$3/2$		

Таблица I (Продолжение)

Ссылки			Атом	А
<i>I</i>	μ	<i>Q</i>		
MW33, GO47	<i>PO48₂</i> , <i>ZI49</i>	SC39, MW39, GO47, GO48 ₁ , TW48	I	127
LI49	<i>GO48₁</i>	LN49	I	129*
KP33 ₃ , JO33 ₃ , RS50	<i>KP33₃</i>		Xe	129
KP33 ₃ , KQ38, RS50	<i>KP33₃</i>	KQ38, <i>SH38</i>	Xe	131
	<i>JO33₂</i>		Xe	132
	<i>JO33₂</i>		Xe	134
	<i>JO33₂</i>		Xe	136
KP32, JA33, CO34, FL37	CO34, KU39 ₂ , <i>BI49</i> , <i>DI49₂</i> , <i>CH49</i>	SC40	Cs	133
NA49	<i>NA49</i> , <i>DI49₂</i>		Cs	135*
DI49 ₁ , NA49	<i>NA49</i> , <i>DI49₂</i>		Cs	137*
	AR50		Ba	134
MW32, HH41, AR49 ₂	<i>HH41</i>		Ba	135
	AR50		Ba	136
KA32, MW32, HH41, AR49 ₂	<i>HH41</i>		Ba	137
	AR50		Ba	138
WH33, AO34	WK40, DK49 ₂ , <i>CH49</i>	<i>DN49₂</i>	La	139
WH29	CH50		Pr	141
			Nd	143
			Nd	145
BQ49 ₁			Sm	147
BQ49 ₁			Sm	149
SH35 ₂	<i>SH35₂</i>	<i>SH35₂</i>	Eu	151
SH35 ₂	<i>SH35₂</i>	<i>SH35₂</i>	Eu	153
			Gd	155
			Gd	157
SH34 ₃			Tb	159

<i>N</i>	<i>Z</i>	Атом	<i>A</i>	<i>I</i> (\hbar)	μ (я. м.)	Q ($e \cdot 10^{-24}$ см ³)
95	66	Dy	161			
97	66	Dy	163			
98	67	Ho	165	$7/2$		
99	68	Er	167			
100	69	Tm	169	$1/2$		
101	70	Yb	171	$1/2$	+0,45	} <i>r</i> +3,9 ±4
103	70	Yb	173	$5/2$	-0,65	
104	71	Lu	175	$7/2$	+2,6	+5,9
105	71	Lu	176*	≥ 7	+3,8	+7 ±1
105	72	Hf	177	$(1/2, 3/2)$		
106	72	Hf	178	(0)	~ 0	
107	72	Hf	179	$(1/2, 3/2)$		
108	72	Hf	180	(0)	~ 0	
108	73	Ta	181	$7/2$	+2,1	+6
108	74	W	182	(0)		
109	74	W	183	$1/2$		
110	74	W	184	(0)		
112	74	W	186	(0)		
110	75	Re	185	$5/2$	+3,3	} <i>r</i> (+2,8) +2,6
112	75	Re	187	$5/2$	+3,3	
111	76	Os	187			
113	76	Os	189	$1/2$		
114	77	Ir	191	$(> 1/2)$	} <i>r</i> > 0	
116	77	Ir	193	$(3/2)$		
116	78	Pt	194	(0)	~ 0	
117	78	Pt	195	$1/2$	+0,60592 ±8	
118	78	Pt	196	(0)	~ 0	
119	79	Au	197	$3/2$	+0,20	
118	80	Hg	198	(0)	~ 0	

Таблица I (Продолжение)

Ссылки			Атом	А
I	μ	Q		
			Dy	161
			Dy	163
SH35 ₁			Ho	165
			Er	167
SH34 ₅			Tm	169
SH38	SH38		Yb	171
SH38	SH38	SH38	Yb	173
SH34 ₂	SH35 ₂ , GL36	SH35 ₂ , SH35 ₃ , CC35, GL36	Lu	175
SH39	SH39	SH39	Lu	176*
RS35			Hf	177
	RS35		Hf	178
RS35			Hf	179
	RS35		Hf	180
GR33 ₂ , GI33	GI33	SC43	Ta	181
	GR34		W	182
GR34, KP48			W	183
	GR34		W	184
	GR34		W	186
GT30, MG31, ZE31	SH37 ₂ , SC38	SH37 ₂	Re	185
GT30, MG31, ZE31	SH37 ₂ , SC38	SH37 ₂	Re	187
			Os	187
KD38			Os	189
VS35, MW50	VS35, MW50		Ir	191
VS35, MW50	VS35, MW50		Ir	193
	FU35		Pt	194
JC36, TL37	SC36, PR49 ₃ , PR50		Pt	195
	FU35		Pt	196
ET39	ET39		Au	197
	TL31		Hg	198

<i>N</i>	<i>Z</i>	Атом	<i>A</i>	<i>I</i> (\hbar)	μ (я. м.)	<i>Q</i> ($e \cdot 10^{-24}$ с.м ²)
119	80	Hg	199	$1/2$	$+0,50413 \pm 3$	$+0,5$
120	80	Hg	200	(0)	~ 0	
121	80	Hg	201	$3/2$	$-0,5590 \pm 1h$	
122	80	Hg	202	(0)	~ 0	
124	80	Hg	204	(0)	~ 0	
122	81	Tl	203	$1/2$	$+1,61166 \pm 14$	$-0,4$
124	81	Tl	205	$1/2$	$+1,62750 \pm 14$	
122	82	Pb	204	(0)	~ 0	
124	82	Pb	206	(0)	~ 0	
125	82	Pb	207	$1/2$	$+0,58950 \pm 7$	
126	82	Pb	208	(0)	~ 0	$-0,4$
126	83	Bi	209	$9/2$	$+4,1$	
140	91	Pa	231*	$3/2$		
143	92	U	235*	$(5/2, 7/2)$		
144	93	Np	237*	$5/2$		

Таблица I (Окончание)

Ссылки			Атом	А
<i>I</i>	μ	<i>Q</i>		
SH31 ₂	GQ33, SH35 ₄ , MR40, PR49 ₈ , PR50		Hg	199
	TL31		Hg	200
SH31 ₂	GO33, SH35 ₄ , MR40	SH35 ₂ , SH35 ₄	Hg	201
	TL31		Hg	202
	TL31		Hg	204
SH29, SH31 ₁	GQ33, SH37 ₁ , SH37 ₂ , PR49 ₁ , PH49, CR49 ₂		Tl	203
SH29, SH31 ₁	GQ33, SH37 ₁ , SH37 ₂ , PR49 ₁ , PH49, CR49 ₂		Tl	205
	GE50		Pb	204
	MW31		Pb	206
KP31, CT36	GQ33, CT36, PR49 ₂ , CR49 ₄ , SA49		Pb	207
	MW31		Pb	208
GO27	GQ33, WK40, XX50	SH36 ₁	Bi	209
SH34 ₁			Pa	231*
AO47, TL50			U	235*
TP48			Np	237*

II. МЕХАНИЧЕСКИЙ МОМЕНТ I

В отличие от моментов μ и Q значения механических моментов не содержат небольших ошибок, так как согласно квантовомеханическим правилам коммутации I является строго целочисленным для чётного A и строго половиной нечётного числа при нечётном A ¹⁵.

Ниже приводятся все случаи, когда имеются расхождения в значениях I , не основанные на новых данных и имеющиеся среди послевоенных таблиц.

Т а б л и ц а *b*

Расхождения в значениях I в послевоенных таблицах

Ссылка	${}^5_4\text{Be}^9$	${}^{13}_{12}\text{Mg}^{25}$	${}^{43}_{34}\text{Se}^{77}$	${}^{143}_{92}\text{U}^{235}$
12	3/2	—	—	—
13	3/2	—	1/2	5/2 (7/2)
14	(3/2)	5/2	$1/2 > 1/2$	5/2 или 7/2
Настоящая таблица	—	5/2 (\pm)	$7/2 \pm 1, (1/2)$	5/2, 7/2

${}^5_4\text{Be}^9$ — Теоретически указанное¹⁵ и обычно принимаемое значение 3/2 для $I(\text{Be}^9)$ экспериментально не обосновано. Исключение значения 1/2 было основано на правдоподобных аргументах ^{KU39}, а исключение величин, больших 3/2, — на тех соображениях, что при известном гиромагнитном отношении такой спин привёл бы к частичному разрешению сверхтонкой структуры ^{PD 41}.

${}^{13}_{12}\text{Mg}^{25}$ — Крауфорд ^{CR 50} оценивает возможность отличия $I(\text{Mg}^{25})$ от 5/2 как 1:10.

${}^{43}_{34}\text{Se}^{77}$ — Оба значения $I = 7/2 \pm 1$ получены при использовании правила интервалов к частично разложенной сверхтонкой структуре ^{MA 49}. Значение $|Q| < 2 \cdot 10^{-3} \text{GO}^{50}, \text{TW}^{50}$ представляется хорошо установленным для Se^{77} . Эти значения не исключают друг друга абсолютно, хотя необычайно низкое значение Q , меньшее, чем в дейтероне, естественно, приводит к предположению, что I должно быть равно 1/2. Были проведены эксперименты ^{SA 50} для независимого определения спина.

III. МАГНИТНЫЙ ДИПОЛЬНЫЙ МОМЕНТ μ

А. Момент протона

Перед самым опубликованием этой таблицы стали известны новые важные данные о первом непосредственном измерении магнитного момента протона в ядерных магнетонах — я. м. (т. е. протонных магнетонах), проведенном Хиппелем, Соммером и Томасом^{HP49}. Отношение частоты ядерного резонанса для протона ν_p к циклотронной частоте протона ν_c , измеренной в том же магнитном поле, есть непосредственно (без диамагнитной поправки, см. раздел III С.1) значение $\mu(^0\text{H}^1)$ в специальных единицах (я. м.), независимо ни от каких других измерений. Таким образом, получается значение $\mu(^0\text{H}^1, \text{ без поправки}) = 2,792\,469 \pm 0,000\,078$ я. м., которое является лишь предварительным, так как авторы ещё не выяснили вопроса о возможных систематических ошибках. Тем не менее, я предпочитаю этот метод (с внесением диамагнитной поправки) всякому другому в силу того, что он является наиболее прямым. Внесение диамагнитной поправки $[1 - (3 \pm 2) \cdot 10^{-5}]$ повышает первоначальное значение на $(8 \pm 6) \cdot 10^{-5}$ магнетонов, так что после округления последнего знака лучшее значение, использованное в таблице, в настоящее время таково:

$$\mu(^0\text{H}^1, \text{ с диамагнитной поправкой}) = 2,79255 \pm 0,00010 \text{ я. м.}$$

Все остальные значения μ в таблице получены из их отношений к $\mu(^0\text{H}^1 \text{ без поправки})$, и если величина, принятая для $\mu(^0\text{H}^1)$, изменится, то соответственно должны быть изменены все другие величины в 6-м столбце.

В. Отношение моментов дейтерона и протона

Из всех отношений между ядерными магнитными моментами наиболее изученным является отношение между моментами дейтерона и протона. В связи со специальным интересом, проявляемым к этому отношению, рассмотрим его детальнее. В то время как обширность и точность имеющихся сведений далеко не типична, операция усреднения, описанная ниже, может рассматриваться как характерный метод получения значений μ для таблицы.

По причинам, обсуждённым ниже (раздел III С. 2), для вычисления $\mu(^2\text{H}^3)$ использовались только измерения методом ядерного резонанса. Результаты приведены в таблице II (см. стр. 414). За отсутствием достаточных сведений вес каждого измерения, указанный в последнем столбце таблицы II, принимался обратно пропорциональным ошибкам, указанным соответствующим автором. Среднее значение есть 0,3070150; в качестве неточности (см. раздел III D) принимаем значение 0,000003, которое выше неточностей, указываемых в большинстве отдельных определений (это сделано с

целью перекрытия неточностей всех определений). Биттер (см. В 150) рекомендует считать ошибки (неточности) втрое большими, чем здесь. В силу некоторых физических соображений, указанных в разделе III, оценивать ошибку более детально не представляется целесообразным.

Т а б л и ц а II

ОТНОШЕНИЕ МОМЕНТОВ ДЕЙТЕРОНА И ПРОТОНА

Ссылка	Исследуемое вещество	μ_2/μ_1	Вес измерения
BV47	вода	$0,307002 \pm 0,000014$	7
BL47 ₃	вода	$0,3070126 \pm 0,000002$	50
BI47	жидкий H ₂	$0,307021 \pm 0,000005$	20
WJ49	вода	$0,3070117 \pm 0,0000017$	59
SN49	вода	$0,3070183 \pm 0,0000015$	67
ZI49	вода	$0,30710 \pm 0,0001$	1
SR50	вода	$0,3070122 \pm 0,0000014$	21
LM50	парафиновое масло	$0,3070165 \pm 0,0000005$	200
LM50	вода	$0,3070143 \pm 0,0000005$	200
Среднее значение		$0,3070150$	

Измерения BI47 и WJ49 были выполнены в одной лаборатории, так же как и измерения SN49 и LM50. В последней группе опытов была достигнута особенно высокая однородность поля порядка 10^{-5} .

Было бы преждевременно отбросить какие-либо величины из таблицы II, так как исследованиям подвергались различные химические соединения. Кроме того, ввиду «химического эффекта» (см. раздел III С.2) и ощутимой разницы в физических и химических

свойствах между лёгким и тяжёлым водородом в принципе могут возникнуть возражения против сопоставления непоправленных дейтерон-протонных отношений, полученных для различных химических образцов. И в самом деле, Линдстрем показал в ^{LM50}, что два исследуемых соединения дали разность в отношении, равную $(7 \pm 3) \cdot 10^{-6}$. В газообразных образцах, где поправка может быть вычислена, отношение $\mu(\text{H}^2)/\mu(\text{H}^1)$ нуждается в новом определении.

Недавно началось изучение дейтеронных и протонных моментов и, особенно, их отношения на базе новых методов ¹⁶⁻¹⁸.

С. Поправки

В настоящее время моменты вычисляются с настолько большой точностью, что становится неизбежным обсуждение некоторых малых поправок.

В целях понимания нижеследующих рассуждений необходимо помнить, что в отличие от методов ядерного резонанса магнитно-резонансные методы с атомными и молекулярными пучками, метод поглощения микрорадиоволн и метод сверхтонкой структуры в оптических линейчатых спектрах основаны, по существу, на измерениях сверхтонкой структуры, т. е. на измерении энергетической разницы между двумя наинизшими уровнями, из которой может быть приближённо вычислен магнитный дипольный момент ядра ¹⁹⁻²⁵. При обсуждении поправок удобно рассмотреть вместе все методы, попадающие в категорию измерений сверхтонкой структуры. Ниже в этой статье они все будут называться методами сверхтонкой структуры. В самой таблице моменты, полученные методами ядерного резонанса, отличаются от тех, которые получены методами сверхтонкой структуры, следующим образом. Значение, полученное методом ядерного резонанса, всегда сопровождается указанием ошибки, следующей за знаком \pm без специальных символов; значения, полученные методами сверхтонкой структуры, или даются без указания ошибки, или отмечаются после ошибки буквой *h*. Значения, внесённые в таблицу, даются без изменений, за исключением диамагнитной поправки. Значения, полученные методами сверхтонкой структуры, отмечаются только для удобства читателей, желающих применить другие поправки (раздел III С. 3—6).

Среди данных, пригодных для расчётов ядерных дипольных моментов, измерения большинства хорошо известных образцов были проведены, с одной стороны, методами ядерной индукции или ядерного резонанса и, с другой стороны, методами магнитного резонанса атомных или молекулярных пучков (метод сверхтонкой структуры). Но в каждом случае применения обоих методов измерения

методом ядерного резонанса или ядерной индукции дают более высокую точность. В тех случаях, когда имеются измерения обоих типов, во избежание путаницы я полностью пренебрегаю методами сверхтонкой структуры. При этом приходится в принципе пренебрегать некоторыми независимыми данными, но относительно небольшой вес этих данных в соединении с возможными неточностями в поправках побудили меня встать на этот путь.

С. 1. Диамагнитная поправка

Диамагнитная поправка есть поправка на взаимодействие между ядрами и диамагнитным моментом атомных электронов. Диамагнитное взаимодействие оказывает на измерение ядерного момента такое же влияние, как если бы ядерный момент (действительный, в противоположность наблюдаемому) умножался на коэффициент, равный единице, минус величина, приблизительно пропорциональная атомному номеру в степени $4/3$. Эта поправка сводится к делению наблюдаемого ядерного g -фактора на $1 - DZ^{4/3}$, где D в модели Ферми-Томаса есть $3,19 \cdot 10^{-5}$. В более точной модели Хартри D несколько меньше и является медленно возрастающей функцией Z , которая была вычислена Лэмбом²⁶. Рамзей (Phys. Rev. **77**, 567 (1950)) указал, что ни диамагнитный поправочный коэффициент Лэмба (см.²⁶, формула (6)), равный для водорода 0,9999822, ни гелиоподобное приближение Андерсона^{AN48}, дающее коэффициент 0,9999676, не являются пригодными в случае опытов с молекулами. Рамзей предлагает теоретический коэффициент, учитывающий спин-вращательное взаимодействие молекулы и равный для газа H_2 0,9999729. К сожалению, вплоть до настоящего времени опыты были выполнены только с другими веществами (см. таблицу II), хотя один и был сделан с газом H_2 ^{HP50}. Важный, но сложный случай «бумеранговидной» молекулы воды ещё не рассмотрен. Таким образом, в настоящий момент главное значение замечания Рамзея состоит в предупреждении против ожидания слишком большой точности при применении диамагнитных поправок. В данной статье используется андерсоновская величина для гелия и величина, приблизительно такая же как у Рамзея, для водорода. Остальные величины взяты из статьи Лэмба²⁶ или получены с помощью линейной интерполяции (для $_{81}Tl$ и $_{82}Pb$ значения экстраполированы от $_{74}W$ и $_{80}Hg$). Заключение в скобки указывает, что диамагнитно-исправленная величина была взята из^{PR50}. Интерполяция в широком интервале между $Z=1$ и $Z=19$ является, несомненно, грубой процедурой, но она приводит к поправкам, которые малы по сравнению с поправками для более тяжёлых атомов. На протяжении всей таблицы, для единообразия, поправка иногда внесена в большее количество мест, чем это оправдано нашими знаниями о её величине.

Т а б л и ц а с

Диаманитные поправки, использованные в таблице I

Z	$D \cdot 10^5$	Поправка	A	Прибавленная поправка (в я. м.)
0	—	1 (точно)		0 (точно)
1	3 ± 2	0,99997	1	0,000084
1			2	0,000026
1			3	0,000089
2	2,8	0,999930	3	0,000149
3	1,87	0,9999192	6	0,00007
3			7	0,00026
4	1,915	0,9998755	9	0,000143
5	1,960	0,999832	10	0,00030
5			11	0,00045
6	2,005	0,999802	13	0,00014
7	2,050	0,999744	14	0,00010
7			15	0,00007
9	2,140	0,999611	19	0,0010
11	2,230	0,999456	22	0,00095

Таблица с (Продолжение)

Z	$D \cdot 10^5$	Поправка	A	Прибавленная поправка (в я. м.)
11			23	0,00121
13	2,320	0,999282	27	0,00261
15	2,410	0,999088	31	0,00103
17	2,500	0,998877	35	0,00092
17			37	0,00077
19	2,590	0,998687	39	0,0005
19			40	0,0017
19			41	0,0003
23	2,610	0,998293	51	0,0088
25	2,623	0,998083	55	(0,0066)
27	2,645	0,997858	59	(0,0100)
29	2,680	0,997612	63	0,00532
29			65	0,00569
31	2,684	0,997387	69	0,0053
31			71	0,0067
35	2,695	0,996916	79	0,0065

Т а б л и ц а с (Продолжение)

Z	$D \cdot 10^5$	Поправка	A	Прибавленная поправка (в я. м.)
35			81	0,0070
36	2,697	0,996800	83	0,0031
37	2,700	0,996671	85	0,00450
37			87	0,00915
47	2,722	0,99538	107	0,0004
47			109	0,0008
48	2,724	0,995248	111	(0,00283)
48			113	(0,00296)
49	2,727	0,995110	113	0,0268
49			115	0,0269
50	2,729	0,994973	115	(0,00461)
50			117	(0,00502)
50			119	0,00526
53	2,736	0,994553	127	0,00530
53			129	0,0149
55	0,740	0,994269	133	0,0148

Таблица с (Окончание)

Z	$D \cdot 10^5$	Поправка	A	Прибавленная поправка (в я. м.)
55			135	0,0156
55			137	*0,0163
56	2,742	0,994125	135	0,0049
56			137	0,0055
57	2,743	0,993983	139	0,01672
78	2,790	0,990702	195	(0,00563)
79	2,795	0,990526	197	(0,0019)
80	2,800	0,990349	199	0,00486
81	2,805	0,990170	203	0,01584
81			205	0,01600
82	2,810	0,989989	207	0,00590

Согласно Лэмбу, диамагнитная поправка применима при измерениях методом сверхтонкой структуры и обычно применяется также при всех измерениях μ в атомах, т. е. в ядрах, окружённых электронами, независимо от того, каким методом измеряется этот момент. В то время как сам эффект зависит от степени ионизации атома, поправка обычно считается только функцией Z , т. е. вносится в предположении, что все атомы являются нейтральными.

С. 2. Химические эффекты

В последних статьях, посвящённых наиболее точным измерениям, имеется ряд указаний на линии необычной формы и, в особенности, на асимметрию некоторых синглетных линий. Обширная литература, посвящённая времени релаксации, здесь обсуждаться

не будет. Возник вопрос, может ли характер химического соединения оказывать влияние на частоту ядерного резонанса (см., например, ^{99}Sn). Пейк обнаружил ^{99}Sn удвоение протонного резонанса в кристаллах, а Найт нашёл ^{99}Sn , что ядерная частота в металле на десятки процентов выше частоты того же ядра в соли. Совсем недавно некоторые асимметричные линии были разрешены на группы, и сотрудники нескольких лабораторий независимо пришли к убеждению, что этот эффект возникает не от недостатков аппаратуры, а связан с характером химического соединения атомов, ядра которых наблюдаются (см. ^{51}V , ^{55}Mn , ^{59}Co). Обнаруженные до сих пор расщепления имеют относительные значения от 10^{-5} до $5 \cdot 10^{-3}$ и, по крайней мере в первом приближении, пропорциональны силе внешнего поля. Наибольшее из указанных значений было обнаружено (см. ^{15}N) в водный раствор NH_4NO_3 даёт два сигнала с интервалом в 5,3 гаусса при напряжённости поля в $1,05 \cdot 10^4$ гаусса, а опыты с другими соединениями показывают, что аммониевая группа даёт значения для $\mu(\text{N})$, более высокие, чем нитратная *). Рамзей подчёркивает, что отделение химического эффекта от магнитного является искусственным. Химический эффект более высокого порядка, зависимость отношения резонансных частот двух изотопов одного и того же элемента от химического соединения, проявляется в данных ^{13}C (см. две последние строки в таблице II).

С.3. Радиационная поправка

Введение радиационной поправки необходимо вследствие того, что масса электрона зависит от поля, в котором он находится. Швингер²⁷ и Люттингер²⁸ устранили обнаруженное различие между отношением расщепления сверхтонкой структуры и отношением магнитных дипольных моментов для изотопов водорода и некото-

*) В силу наличия химического эффекта важно указать соединения, на которых проводились измерения. В случае измерений, указанных в ^{15}N , использовались, преимущественно в виде водных растворов, следующие соединения:

$^{14}\text{N}:\text{HNO}_3$	$^{110}\text{Cd}:\text{CdCl}_2$
$^{15}\text{N}:\text{NH}_3$	$^{116}\text{Sn}:\text{SnCl}_2$
$^{35}\text{Cl}:\text{HCl}$	$^{195}\text{Pt}:\text{H}_2\text{PtCl}_6$
$^{51}\text{V}:\text{NaVO}_3$	$^{200}\text{Hg}:\text{HgNO}_3$
$^{55}\text{Mn}:\text{LiMnO}_4, \text{KMnO}_4$	$^{207}\text{Tl}:\text{Tl}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)$
$^{59}\text{Co}:\text{K}_3\text{Co}(\text{CN})_6$	$^{208}\text{Pb}:\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$

рых других элементов^{29-31 *}) с помощью введения в магнитный момент, связанный со спином электрона, радиационной поправки $(1 + \alpha/2\pi) = 1,001162$. Здесь α — константа тонкой структуры, приблизительно равная $1/137$. Деление на этот фактор величины сверхтонкого расщепления, которое определяется взаимодействием между ядром и магнитным моментом внеядерных электронов, должно, согласно интерпретации, сделать эту величину совместимой со значениями, полученными методами ядерного резонанса.

С. 4. Релятивистские эффекты

Электрон, быстро движущийся в силовом поле, имеет в силу релятивистских эффектов слегка отличный момент, что приводит к некоторому изменению сверхтонкой структуры атома. Вопрос о магнитном моменте тяжёлого атома обсуждался Брейтом³². Маргенау³³ нашёл поправку, связанную с быстрым движением заряжённых частиц в центральном поле. Эта поправка для S -электрона равна $\left(1 - \frac{Z_0^2 \alpha^2}{3 n_{эф}^2}\right)$, где $\frac{Z_0^2}{n_{эф}^2}$ — ионизационный потенциал атома в единицах Ридберга. Этот эффект в типичных случаях имеет относительную величину порядка 10^{-5} . Значения поправок для единичных не S -электронов можно найти у Маргенау.

С. 5. Эффект приведённой массы

Брейт и его сотрудники³⁴⁻³⁵ показали, что движение ядра даёт вклад в сверхтонкую структуру порядка $\left(1 + \frac{m}{M}\right)^{-3}$, что количественно соответствует 10^{-8} к тонкой структуре водорода. Здесь m и M — соответственно массы электрона и ядра. Введение фактора $\left(1 + \frac{m}{M}\right)^{-3}$ в применении к изотопным парам более тяжёлых атомов, хотя формально и не обосновано, вошло в употребление и помогает согласовать измерения сверхтонкой структуры с измерениями методами ядерного резонанса. Фактор $\left(1 + \frac{m}{M}\right)^{-3}$ даёт поправку $8 \cdot 10^{-4}$ между H^1 и H^2 , поправку $4 \cdot 10^{-4}$ между Li^6 и Li^7 и поправку $2 \cdot 10^{-6}$ между K^{39} и K^{41} .

*) Соответствующие измерения проводились для следующих элементов:

H	ссылка ^{29, 30}
Li, Na, K, Pb, Cs	ссылка ^{KU49,}
Na, Ga	ссылка ³¹
Na, Ga, In	ссылка ^{KU48, MD50}
Cl	ссылка ^{DI49, PR50}
Tl	ссылка ^{BH50}

С. 6. Эффекты размеров и структуры ядра.

Розенталь и Брейт³⁶ обнаружили, что энергетические уровни атома заметно зависят от размеров ядра, даже когда ядро является сферически-симметричным. В противоположность этому эффекту размеров, который в основном существует для тяжёлых ядер, Бор³⁷ обратил внимание на структурный эффект, который может быть существенен и для лёгких ядер. Этот эффект связан с пространственным распределением ядерного магнитного момента и зависит от того, каким образом этот момент распределяется среди ядерных частиц. Для Rb два нечётных изотопа $^{87}_{37}\text{Rb}$ и $^{89}_{37}\text{Rb}$ имеют основные состояния с различными спинами и есть указания на наличие замкнутой оболочки^{38—40}. Для этого случая Биттер⁴¹ обращает внимание на наличие аномалии в сверхтонкой структуре, несмотря на то, что здесь объяснение этой аномалии эффектом размеров в высшей степени невероятно. Тем самым подчёркивается, что структурный эффект, т. е. распределение момента, оказывает влияние, по крайней мере сравнимое с эффектом размера. В рубидии величина аномалии порядка $3 \cdot 10^{-3}$.

D. Ошибки в значениях μ

Величина ошибки, указанная в таблице I для каждого дипольного момента, отнюдь не является полной ошибкой при определении значения μ . Обычно эта ошибка совпадает с указанной автором, но в тех случаях, когда данные различных авторов расходятся за пределами ошибок, значение ошибки в таблице увеличено. Произведённые увеличения ошибок невелики, за исключением случая Be^9 , где даётся ошибка $\pm 8 \cdot 10^{-4}$, хотя один из двух авторов давал значение, равное около $1/50$ этой величины. В таблице не были приняты в расчёт никакие систематические ошибки и, в частности, хотя диамагнитная поправка была введена согласно разделу III С. 1, другие эффекты (раздел III С. 2—III С. 6) не были приняты во внимание. В настоящее время для наилучших измерений едва ли можно с уверенностью принять относительную ошибку меньше чем 10^{-3} только в силу наличия одного химического эффекта. В случаях, когда величина даётся без указания ошибки, её можно, вероятно, полагать правильной с точностью до последнего знака.

Для двух величин, отмеченных фигурными скобками со знаком r в вершине скобки, отношение известно лучше, чем сами их индивидуальные значения; это отношение, обычно, может быть найдено в ссылке, общей для обеих величин, и всегда в ссылке, помещённой по крайней мере для одной величины. В случае Hg, когда скобка даётся без знака r , отношение было использовано для определения момента одного из изотопов. Знак $r > 0$ в случае Ir означает, что моменты имеют одинаковый знак.

IV. КВАДРУПОЛЬНЫЙ МОМЕНТ Q

Значения квадрупольных моментов, указанные в таблице, едва ли могут рассматриваться иначе чем ориентировочные, хотя некоторые из них даются с ошибками порядка одного процента.

В тех случаях, когда известно отношение квадрупольных моментов, скобки и символ τ применяются аналогично тому, как это сделано в отношении момента μ .

Доказательства существования октапольных и магнитных квадрупольных моментов не являются убедительными (см. BG48, DJ49), несмотря на некоторые противоположные утверждения Толанского².

V. ЛИТЕРАТУРА

Указанная в таблице литература не является полной. Однако указывается по крайней мере, первая статья, в которой опубликовано значение «правильного» спина. Приводится также достаточное количество последних статей. В основном сноски на литературу, касающуюся спиновых моментов, не даются курсивом, и статьи, дающие явно ошибочные величины спинов, не указаны. Литература, относящаяся к дипольным и квадрупольным моментам, дана курсивом в тех случаях, когда она содержит значения, представляющиеся предпочтительными.

Ссылки, отмеченные индексом c , указывают на использование соответствующей статьи при вычислении момента, хотя сама статья значения момента не содержит.

ЛИТЕРАТУРА К ПОЯСНЕНИЯМ К ТАБЛИЦЕ

1. L. Pauling and S. Goudsmit, *The Structure of Line Spectra* (1930)
2. K. Murakawa, *Sci Pap. Tokyo JPCR* 17, 6 (1931).
3. H. Kallman and H. Schüler, *Ergeb. d. exakt. Naturwiss.* 11, 134 (1932).
4. E. Marx, *Handbuch der Radiologie* (Leipzig, 1933).
5. H. E. White, *Introduction to Atomic Spectra* (New York, 1934).
6. См. ^{SH35} в таблице I (только квадрупольные моменты).
7. H. A. Bethe and R. F. Bacher, *Rev. Mod. Phys.* 8, 82 (1936).
8. G. Herzberg, *Atomic Spectra and Atomic Structure* (New York, 1937).
9. R. Gregoire, *Tables Annuelles des Constantes, etc., Physique Nucléaire* (Paris, 1938), № 26.
10. См. ^{SH38} в таблице I (только квадрупольные моменты).
11. J. Mattauch and S. Flügge, *Nuclear Physics Tables; 1941* (New York, 1946), английский перевод.
12. W. F. Meggers, *J. Opt. Soc. Am.* 36, 431 (1946).
13. H. H. Goldsmith and D. Inglis, *Brookhaven report BNL—1—5* (1948).
14. H. L. Poss, *Brookhaven report BNL26* (T. — 10) (1949).
15. M. Rose and H. A. Bethe, *Phys. Rev.* 61, 205; поправка, стр. 993 (1937).
16. J. M. Luttinger, *Helv. Phys. Acta* 21, 483 (1948); *Phys. Rev.* 75, 309 (1949); 75, 1277 (1949).

17. M. Slotnick and W. Heitler, Phys. Rev. **75**, 1645 (1949).
18. K. M. Case, Phys. Rev. **76**, 1 (1949).
19. S. Goudsmit and R. F. Bacher, Phys. Rev. **34**, 1501 (1929).
20. S. Goudsmit, Phys. Rev. **43**, 636 (1933).
21. См. GU31.
22. G. Racah, Zeits. f. Physik **71**, 431 (1931).
23. G. Breit and L. A. Wills, Phys. Rev. **44**, 470 (1933).
24. E. Fermi and E. Segré, Zeits. f. Physik **82**, 729 (1933).
25. M. F. Crawford, Phys. Rev. **47**, 768 (1935); M. F. Crawford and L. A. Wills, Phys. Rev. **48**, 69 (1935); M. F. Crawford and A. L. Schawlow, Phys. Rev. **76**, 1310 (1949).
26. W. E. Lamb, Phys. Rev. **60**, 817 (1941).
27. J. Schwinger, Phys. Rev. **73**, 416 (1948); **76**, 790 (1949).
28. J. M. Luttinger, Phys. Rev. **74**, 893 (1948).
29. Nafe, Nelson and Rabi, Phys. Rev. **71**, 914 (1947); J. E. Nafe and E. B. Nelson, Phys. Rev. **73**, 718 (1948).
30. Nagle, Julian and Zacharias, Phys. Rev. **72**, 971 (1947).
31. P. Kusch and H. M. Foley, Phys. Rev. **72**, 1256 (1947); H. M. Foley and P. Kusch, **73**, 412 (1928). Вычисления с точностью до α^2 дают значение $\left(1 + \frac{\alpha}{2\pi} - \frac{2,97 \alpha^2}{\pi^2}\right) = 1,001147$. (R. Karplus and N. M. Kroll, Phys. Rev. **77**, 536 (1950)).
32. G. Breit, Nature **122**, 649 (1928).
33. H. Margenau, Phys. Rev. **57**, 383 (1940).
34. G. Breit and R. E. Meyerott, Phys. Rev. **72**, 1023 (1947); **75**, 1447 (1949).
35. G. Breit and G. E. Brown, Phys. Rev. **74**, 1278 (1948); Breit, Brown and Arken, Phys. Rev. **76**, 1299 (1949).
36. J. E. Rosental and G. Breit, Phys. Rev. **41**, 459 (1932).
37. A. Bohr, V. F. Weisskopf, Phys. Rev. **77**, 94 (1950).
38. M. G. Mayer, Phys. Rev. **74**, 235 (1948); **75**, 1969 (1949).
39. E. P. Wigner and E. Feenberg, Reports on Progress in Physics, London **8**, 274 (1942); E. Feenberg and K. C. Hamack, Phys. Rev. **75**, 1877 (1949); Feenberg, Hamack and Nordheim, Phys. Rev. **75**, 1968 (1949).
40. L. W. Nordheim, Phys. Rev. **75**, 1894 (1949).
41. F. Bitter, Phys. Rev. **76**, 150 (1949).
42. S. Tolansky, Proc. Roy. Soc. London **A170**, 205 (1939).