

PC III

Aufbau der Materie

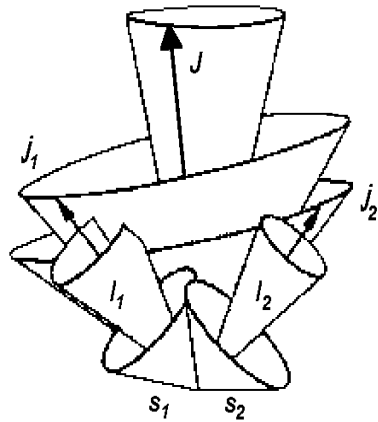
➤ Kapitel 5

Das Periodensystem der Elemente

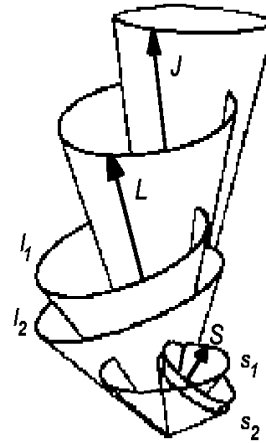
Vorlesung: <http://www.pci.tu-bs.de/aggericke/PC3>

Übung: <http://www.pci.tu-bs.de/aggericke/PC3/Uebungen>

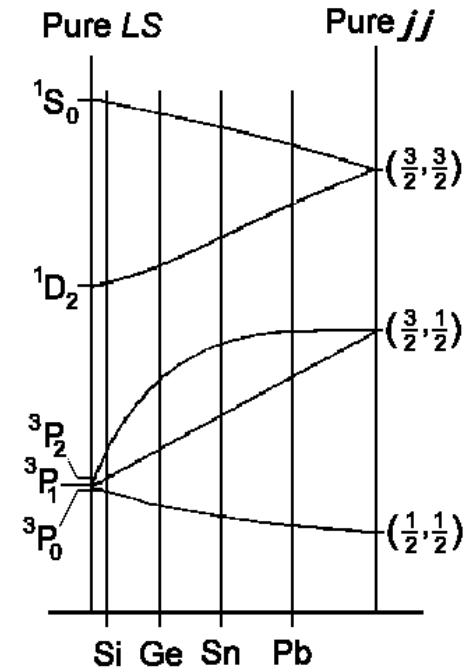
Russel-Saunders - vs. jj-Kopplung



$$\mathbf{j}_i = \mathbf{l}_i + \mathbf{s}_i \quad \mathbf{J} = \sum_i \mathbf{j}_i$$



$$\mathbf{L} = \sum_i \mathbf{l}_i \quad \mathbf{S} = \sum_i \mathbf{s}_i \quad \mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$$

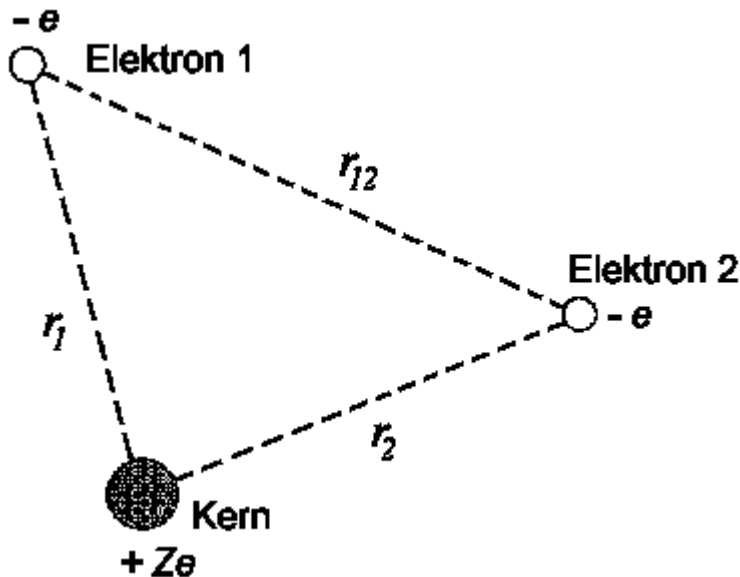


Mehrelektronensysteme

Bahndrehimpulse

kinetische Energie: $\sum_{\text{alle Elektronen}} \frac{1}{2m} \Delta_i$

potentielle Energie $V = \sum_{\text{alle Elektronen}} -Ze^2/4\pi\epsilon_0 r_i + \sum_{\text{alle Paare}} \sum e^2/4\pi\epsilon_0 r_{ij}$



Einfachster Fall sind 2 Elektronen:

$$V = -Ze^2/4\pi\epsilon_0 r_1 - Ze^2/4\pi\epsilon_0 r_2 + e^2/4\pi\epsilon_0 r_{12}$$

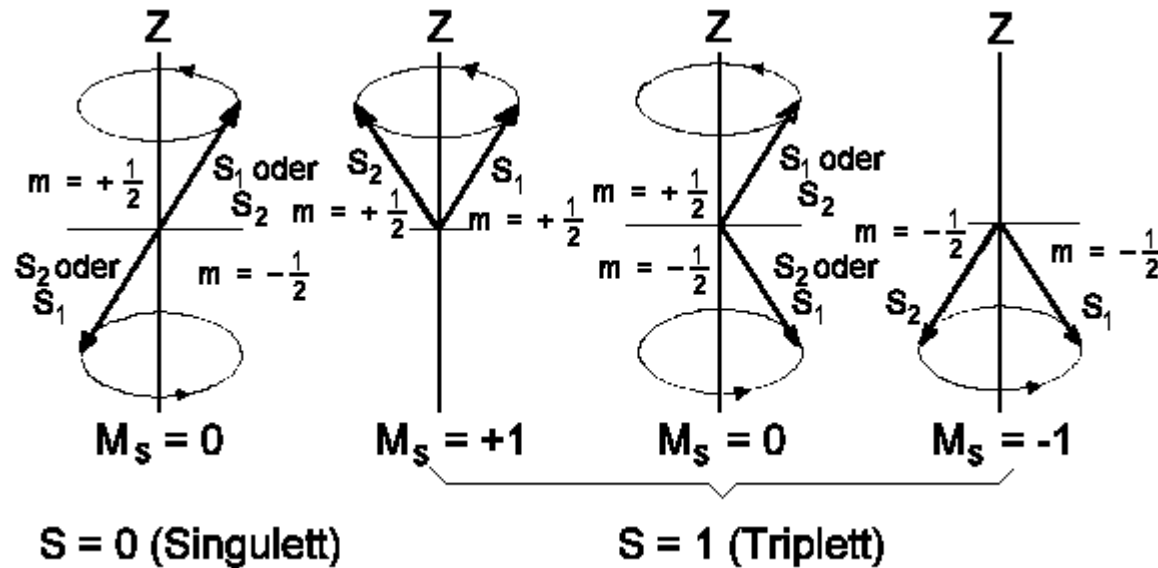
Wir bezeichnen die Bahnquantenzahlen (n, ℓ, m_ℓ) des Elektron 1 mit a und die Quantenzahlen des Elektrons 2 mit b , dann ist

$$\psi_{\text{Atom}} = \psi_a(1) \psi_b(2)$$

nur richtig, wenn die Elektronen nichts voneinander spüren. Bessere Beschreibung durch:

$$\psi_{\text{Atom}} = \psi_a(1) \psi_b(2) \pm \psi_a(2) \psi_b(1)$$

Mehrelektronensysteme Spin



$$\begin{array}{ll}
 \chi_A = \frac{1}{\sqrt{2}} [\chi_+(1) \chi_-(2) - \chi_+(2) \chi_-(1)] & M_S = 0 \\
 \chi_S = \begin{cases} \chi_+(1) \chi_+(2) & M_S = +1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} [\chi_+(1) \chi_-(2) + \chi_+(2) \chi_-(1)] & M_S = 0 \\ \chi_-(1) \chi_-(2) & M_S = -1 \end{cases}
 \end{array}$$

$$\Psi_{\text{total}} = (\text{Bahnwellenfunktion}) \cdot (\text{Spin-Wellenfunktion}) = \begin{array}{l} \Psi_S \chi_A \\ \Psi_A \chi_S \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Singulett} \\ \text{Triplett} \end{array}$$

Ψ_{total} ist immer antisymmetrisch !

Pauli und die Hundsche Regel

Die Gesamtwellenfunktion eines Systems von Elektronen muss antisymmetrisch sein.

Elektronen in einem Atom müssen durch eine **unterschiedlichen** Satz von Quantenzahlen (n, ℓ, m_ℓ, m_s) repräsentiert sein. Daraus folgt die max. Besetzung:

Drehimpuls ℓ :	0	1	2	3	4	5
Symbol:	s	p	d	f	g	h
max. Besetzung, $2(2\ell+1)$:	2	6	10	14	18	22

Hundsche Regeln:

1. Der resultierende Spin des Grundzustandes eines Atoms nimmt den größtmöglichen Wert an, der noch mit dem Pauli'schen Ausschließungsprinzip verträglich ist.
2. Bei gleicher Multiplizität ist der Term mit größtem Bahndrehimpuls energetisch günstiger.
3. Ist die Schale weniger als halb gefüllt, so ist der tiefste Zustand derjenige mit *geringstmöglichem* J ($J = |L - S|$). Ist die Schale mehr als halb gefüllt, dann ist der tiefste Zustand derjenige mit *größtem* J ($J = L+S$).

Friedrich Hund



* 04. Februar 1896 in Karlsruhe
+ 31. März 1997 in Göttingen



Auswahlregeln

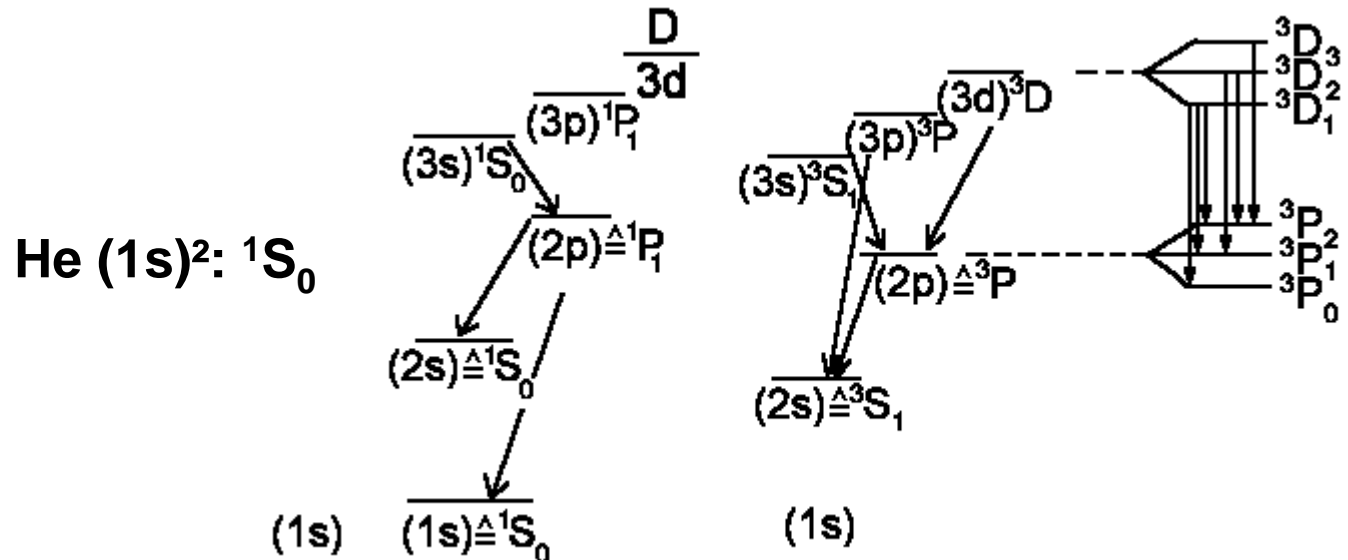
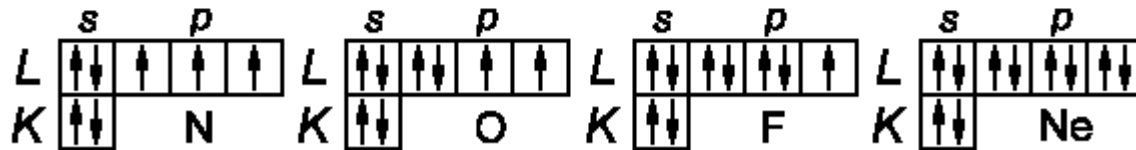
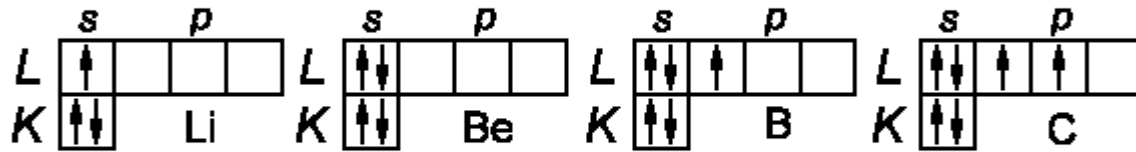
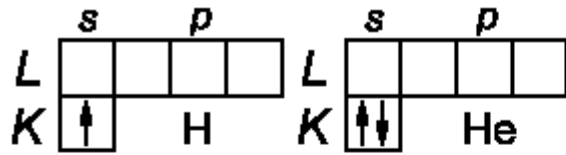
$\Delta L = 0, +/-1$ ($\Delta \ell = +/-1$ bei einem Elektron)

$\Delta J = 0, +/-1$ ($J=0 - J=0$ ist verboten wg. Drehimpulserhaltung)

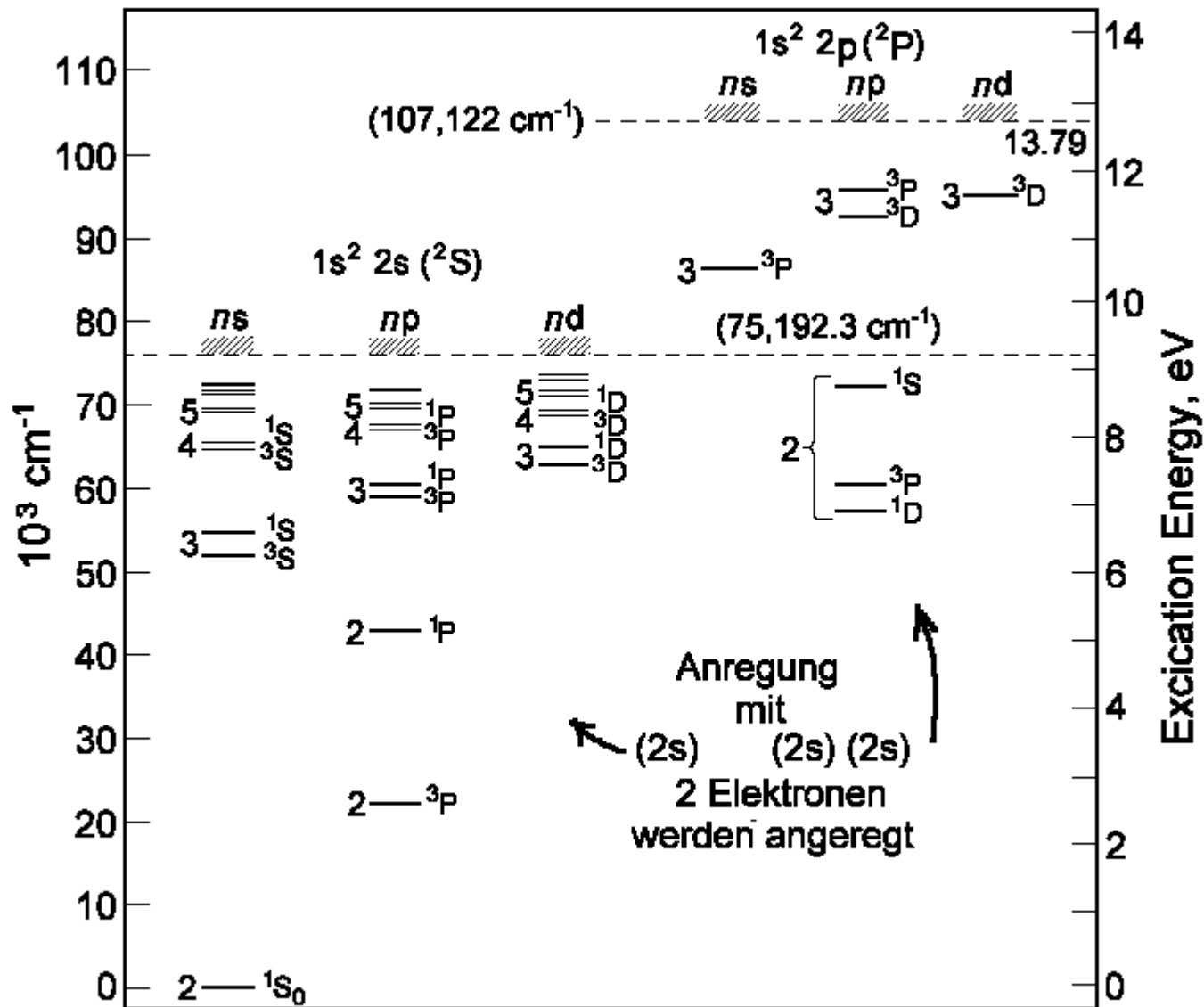
$\Delta S = 0$ (kein wirkliches Verbot, aber sehr unwahrscheinlich bei leichten Atomen)

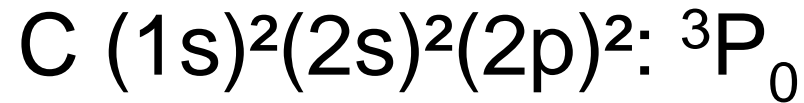
Aufbauprinzip

Drehimpuls l :	0	1	2	3	4	5
Symbol:	s	p	d	f	g	h
max. Besetzung $2(2l+1)$:	2	6	10	14	18	22



Be $(1s)^2(2s)^2: {}^1S_0$





Zwei unterschiedliche p-Elektronen, z.B. (2p) und (3p), unterscheiden sich in der Hauptquantenzahl n und erfüllen damit das Pauliprinzip. Sie können die Zustände ${}^1,{}^3S$, ${}^1,{}^3P$, ${}^1,{}^3D$ bilden.

Zwei äquivalente p-Elektronen, z.B. $(2p)^2$ oder $(3p)^2$ oder $(4p)^2$, müssen sich zumindest in einer Quantenzahl unterscheiden, um das Pauliprinzip zu erfüllen. Welche Zustände fallen dadurch weg

?????

Pauli-Prinzip bei $2p^2$ -Elektronen

Kommentar	$m_{\ell 1}$	$m_{s 1}$	$m_{\ell 2}$	$m_{s 2}$	M_L	M_S
Der Wert $m_{s 2} = -\frac{1}{2}$ entfällt wg. Pauli-Prinzip!	-1	$-\frac{1}{2}$	-1	$-\frac{1}{2}$	*	*
1. mögliche Kombination	-1	$-\frac{1}{2}$	-1	$+\frac{1}{2}$	-2	0
<p>$(m_{\ell 2}, m_{s 2}) = (-1, -\frac{1}{2})$ entfällt, da er in der 1. Zeile vorkommt und beide Elektronen <i>nicht</i> unterscheidbar sind. $(m_{\ell 2}, m_{s 2}) = (-1, +\frac{1}{2})$ entfällt wegen Pauli</p>	"	"	0	$-\frac{1}{2}$	-1	-1
	"	"	0	$+\frac{1}{2}$	-1	0
	"	"	+1	$-\frac{1}{2}$	0	-1
	"	"	+1	$+\frac{1}{2}$	0	0
	-1	$+\frac{1}{2}$	-1	$-\frac{1}{2}$	*	*
	-1	$+\frac{1}{2}$	-1	$+\frac{1}{2}$	*	*
	-1	$+\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	-1	0
	"	"	0	$+\frac{1}{2}$	-1	+1
	"	"	+1	$-\frac{1}{2}$	0	0
	"	"	+1	$+\frac{1}{2}$	0	+1
	0	$-\frac{1}{2}$	0	$+\frac{1}{2}$	0	0
	"	"	+1	$-\frac{1}{2}$	+1	-1
	"	"	+1	$+\frac{1}{2}$	1	0
	0	$+\frac{1}{2}$	+1	$-\frac{1}{2}$	+1	0
	"	"	+1	$+\frac{1}{2}$	+1	+1
1	$-\frac{1}{2}$	+1	$+\frac{1}{2}$	+2	0	

Pauli-Prinzip bei $2p^2$ -Elektronen

- alternative Auftragung -

Zunächst alle Kombinationen (m_ℓ und m_s für das 1. und das 2. Elektron in einer Tabelle notieren und ($M_\ell; M_S$) in Tabelle eintragen. Identische Quantenzahlen für beide Elektronen sind nach Pauli verboten. Doppelt darf nicht gezählt werden (als s.o. in Tabelle gekennzeichnet).

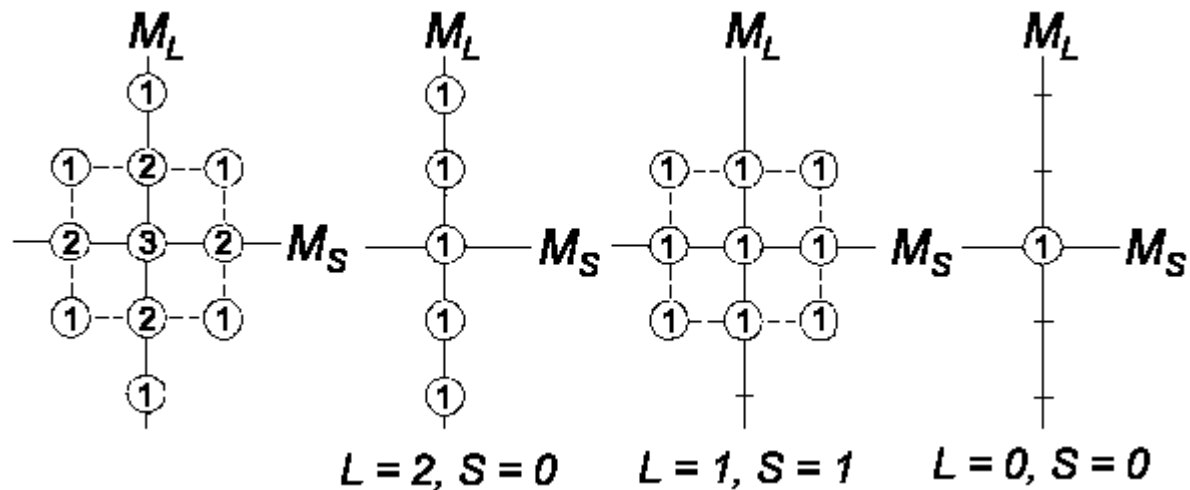
e ⁻		1.						
		m_ℓ	-1		0		+1	
		m_s	-1/2	1/2	-1/2	1/2	-1/2	1/2
2.	-1	-1/2	X	(-2; 0)	(-1; -1)	(-1; 0)	(0; -1)	(0; 0)
		1/2	s.o.	X	(-1; 0)	(-1; 1)	(0; 0)	(0; 1)
	0	-1/2	s.o.	s.o.	X	(0; 0)	(1; -1)	(1; 0)
		1/2	s.o.	s.o.	s.o.	X	(1; 0)	(1; 1)
	+1	-1/2	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	X	(2; 0)
		1/2	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	X

2 p-Elektronen (Zusammenfassen der M_L, M_S zu Zuständen)

$$M_S = m_{s1} + m_{s2}$$

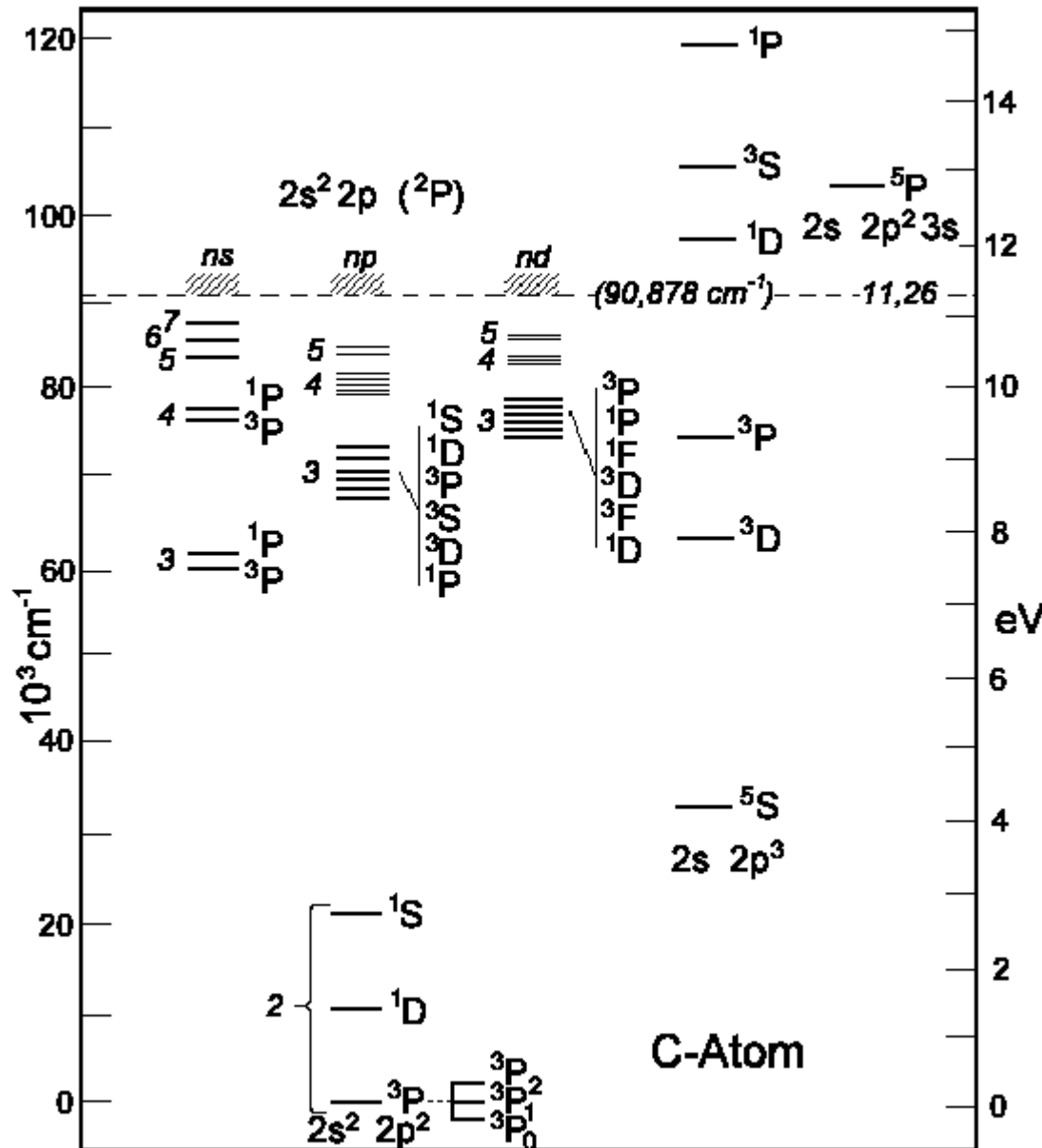
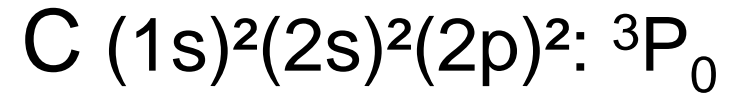
$$M_L = m_{l1} + m_{l2}$$

M_S	-1	0	+1
M_L			
+2		(2, 0)	
+1	(1, -1)	(1, 0) (1, 0)	(1, 1)
0	(0, -1)	(0, 0) (0, 0) (0, 0)	(0, 1)
-1	(-1, -1)	(-1, 0) (-1, 0)	(-1, 1)
-2		(-2, 0)	



Termwerte bei „gleichwertigen“ Elektronen

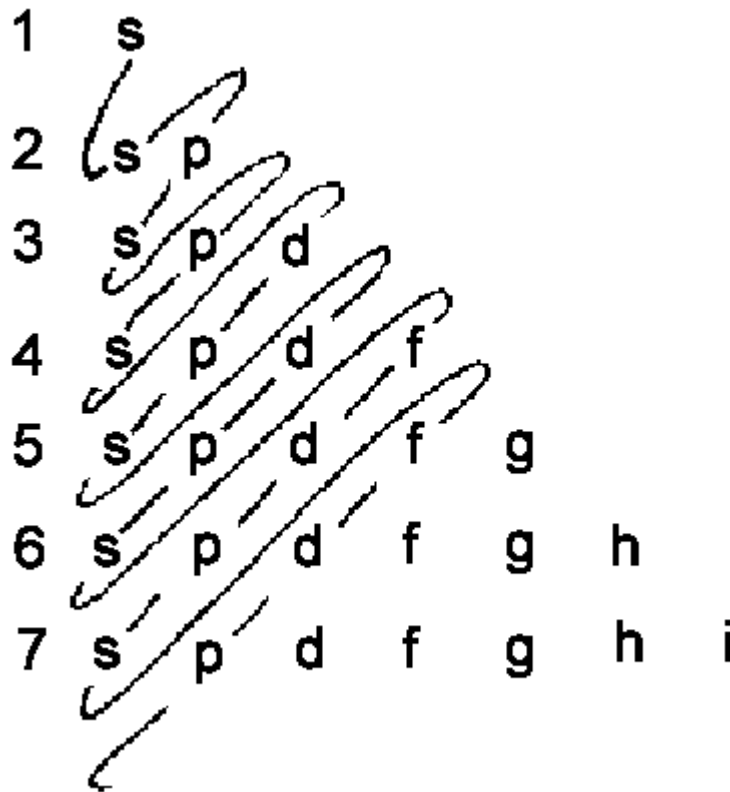
Konfiguration	Term
s	2S
s^2	1S
p, p^5	2P
p^2, p^4	$^1S, ^1D, ^3P$
p^3	$^4S, ^2P, ^2D$
d, d^9	2D
d^2, d^8	$^1S, ^1D, ^1G, ^3P, ^3F$
d^3, d^7	$^2D, ^2F, ^2G, ^2H, ^4P, ^4F$
d^4, d^6	$^1S, ^1D, ^1F, ^1G, ^1I, ^3P, ^3D, ^3F, ^3G, ^3H, ^5D$
d^5	$^2S, ^2P, ^2D, ^2F, ^2G, ^2H, ^2I, ^4P, ^4D, ^4F, ^4G, ^6S$



Periodisches System

Z	Element	Konfiguration	Grundzustandsterm	Ionisationspot. eV
1	H	(1s) ¹	² S _{1/2}	13,6
2	He	(1s) ²	¹ S ₀	24,6
3	Li	(He) (2s) ¹	² S _{1/2}	5,4
4	Be	(He) (2s) ²	¹ S ₀	9,3
5	B	(He) (2s) ² (2p) ¹	² P _{1/2}	8,3
6	C	(He) (2s) ² (2p) ²	³ P ₀	11,3
7	N	(He) (2s) ² (2p) ³	⁴ S _{3/2}	14,5
8	O	(He) (2s) ² (2p) ⁴	³ P ₂	13,6
9	F	(He) (2s) ² (2p) ⁵	² P _{3/2}	17,4
10	Ne	(He) (2s) ² (2p) ⁶	¹ S ₀	21,6
11	Na	(Ne) (3s) ¹	² S _{1/2}	5,1
12	Mg	(Ne) (3s) ²	¹ S ₀	7,6
13	Al	(Ne) (3s) ² (3p) ¹	² P _{1/2}	6,0
14	Si	(Ne) (3s) ² (3p) ²	³ P ₀	8,1
15	P	(Ne) (3s) ² (3p) ³	⁴ S _{3/2}	11,0
16	S	(Ne) (3s) ² (3p) ⁴	³ P ₂	10,4
17	Cl	(Ne) (3s) ² (3p) ⁵	² P _{3/2}	13,0
18	Ar	(Ne) (3s) ² (3p) ⁶	¹ S ₀	15,8

Merkschema für energetische Reihenfolge



Einfaches Merkschema für die energetische Reihenfolge der Besetzungszustände dargestellt durch die geschlungene Kurve

Periodisches System - Fortsetzung

19	K	(Ar) (4s) ¹	² S _{1/2}	4,3
20	Ca	(Ar) (4s) ²	¹ S ₀	6,1
21	Sc	(Ar) (3d) ¹ (4s) ²	² D _{3/2}	6,5
22	Ti	(Ar) (3d) ² (4s) ²	³ F ₂	6,8
23	V	(Ar) (3d) ³ (4s) ²	⁴ F _{3/2}	6,7
24	Cr	(Ar) (3d) ⁵ (4s) ¹	⁷ S ₃	6,7
25	Mn	(Ar) (3d) ⁵ (4s) ²	⁶ S _{5/2}	7,4
26	Fe	(Ar) (3d) ⁶ (4s) ²	⁵ D ₄	7,9
27	Co	(Ar) (3d) ⁷ (4s) ²	⁴ F _{9/2}	7,8
28	Ni	(Ar) (3d) ⁸ (4s) ²	³ F ₄	7,6
29	Cu	(Ar) (3d) ¹⁰ (4s) ¹	² S _{1/2}	7,7
30	Zn	(Ar) (3d) ¹⁰ (4s) ²	¹ S ₀	9,4
31	Ga	(Ar) (3d) ¹⁰ (4s) ² (4p) ¹	² P _{1/2}	6,0
32	Ge	(Ar) (3d) ¹⁰ (4s) ² (4p) ²	³ P ₀	8,1
33	As	(Ar) (3d) ¹⁰ (4s) ² (4p) ³	⁴ S _{3/2}	10,0
34	Se	(Ar) (3d) ¹⁰ (4s) ² (4p) ⁴	³ P ₂	9,8
35	Br	(Ar) (3d) ¹⁰ (4s) ² (4p) ⁵	² P _{3/2}	11,8
36	Kr	(Ar) (3d) ¹⁰ (4s) ² (4p) ⁶	¹ S ₀	14,0

Der Energieunterschied 4s - 3d ist so minimal, dass eine Konkurrenz zwischen beiden Orbitalen auftritt und wir erhalten:

4s, 4s², 4s²3d, 4s²3d², 4s²3d³,
4s¹3d⁵, 4s²3d⁵, 4s²3d⁶, 4s²3d⁷,
 4s²3d⁸, **4s¹3d¹⁰**, 4s²3d¹⁰

Periodisches System - Fortsetzung

Die bisherige Reihenfolge von $z = 19$ bis $z = 36$ mit dem Auffüllen der 4s, 3d und 4p Orbitale wiederholt sich vom 37. bis zum 54. Element mit dem Auffüllen der 5s, 4d und 5p Orbitale und endet beim Xenon

37	Rb	(Kr) (5s) ¹	² S _{1/2}	4,2
38	Sr	(Kr) (5s) ²	¹ S ₀	5,7
39	Y	(Kr) (4d) ¹ (5s) ²	² D _{3/2}	6,6
40	Zr	(Kr) (4d) ² (5s) ²	³ F ₂	7,0
41	Nb	(Kr) (4d) ⁴ (5s) ¹	⁶ D _{1/2}	6,8
42	Mo	(Kr) (4d) ⁵ (5s) ¹	⁷ S ₃	7,2
43	Tc	(Kr) (4d) ⁶ (5s) ¹	⁶ S _{5/2}	7,3
44	Ru	(Kr) (4d) ⁷ (5s) ¹	⁵ F ₅	7,5
45	Rh	(Kr) (4d) ⁸ (5s) ¹	⁴ F _{9/2}	7,7
46	Pd	(Kr) (4d) ¹⁰	¹ S ₀	8,3
47	Ag	(Kr) (4d) ¹⁰ (5s) ¹	² S _{1/2}	7,6
48	Cd	(Kr) (4d) ¹⁰ (5s) ²	¹ S ₀	9,0
49	In	(Kr) (4d) ¹⁰ (5s) ² (5p) ¹	² P _{1/2}	5,8
50	Sn	(Kr) (4d) ¹⁰ (5s) ² (5p) ²	³ P ₀	7,3
51	Sb	(Kr) (4d) ¹⁰ (5s) ² (5p) ³	⁴ S _{3/2}	8,6
52	Te	(Kr) (4d) ¹⁰ (5s) ² (5p) ⁴	³ P ₂	9,0
53	I	(Kr) (4d) ¹⁰ (5s) ² (5p) ⁵	² P _{3/2}	10,4
54	Xe	(Kr) (4d) ¹⁰ (5s) ² (5p) ⁶	¹ S ₀	12,1

Periodisches System - Fortsetzung

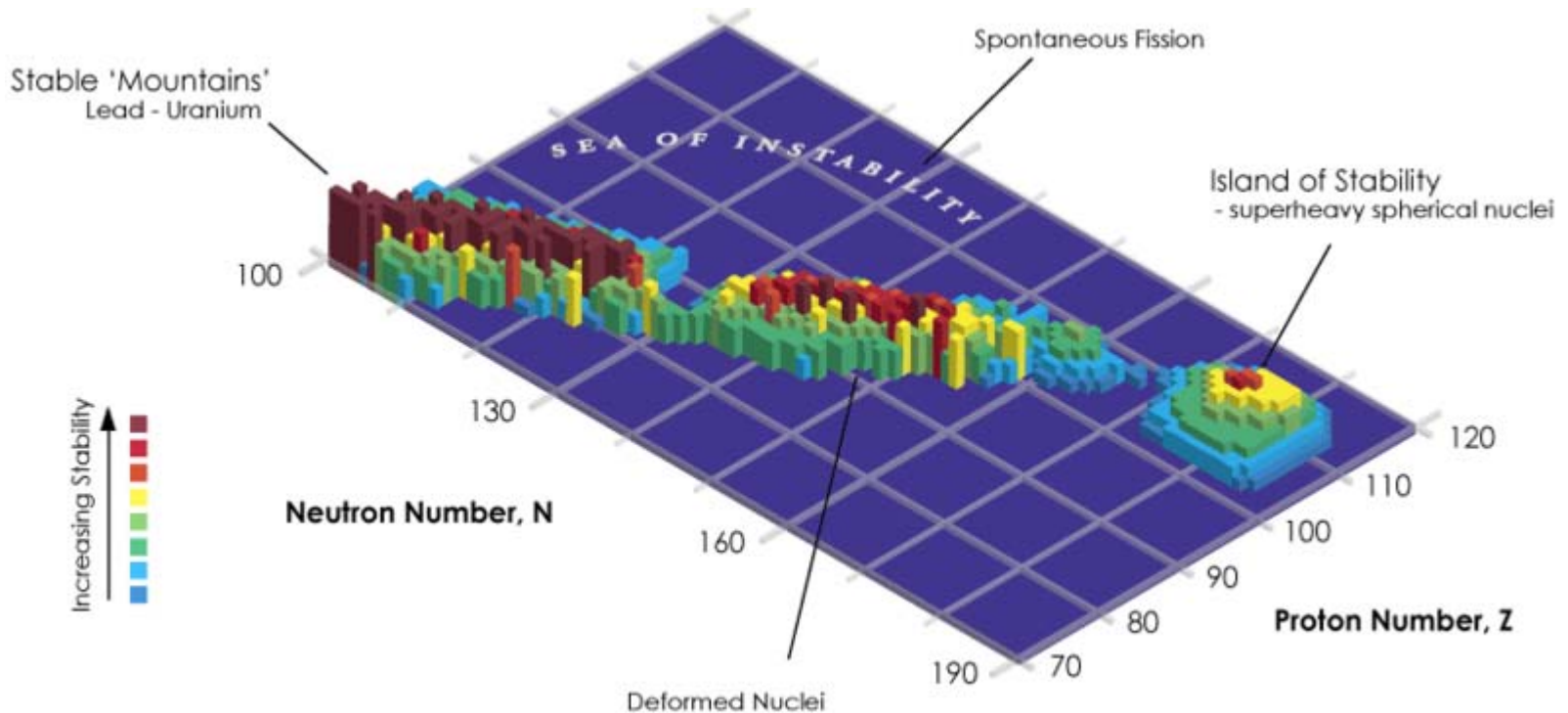
55		Cs	(Xe) (6s) ¹	² S _{1/2}	3,9
56		Ba	(Xe) (6s) ²	¹ S ₀	5,2
57	(	La	(Xe) (5d) ¹ (6s) ²	² D _{3/2}	5,6
58	|	Ce	(Xe) (4f) ¹ (5d) ¹ (6s) ²	¹ G ₄	6,9
59	|	Pr	(Xe) (4f) ³ (6s) ²	⁴ I _{9/2}	5,8
60	|	Nd	(Xe) (4f) ⁴ (6s) ²	⁵ I ₄	6,3
61	|	Pm	(Xe) (4f) ⁵ (6s) ²	⁶ H _{5/2}	5,6
62	|	Sm	(Xe) (4f) ⁶ (6s) ²	⁷ F ₀	5,6
63	Lathanide	Eu	(Xe) (4f) ⁷ (6s) ²	⁸ S _{7/2}	5,7
64	(Seltene	Gd	(Xe) (4f) ⁷ (5d) ¹ (6s) ²	⁹ D ₂	6,2
65	Erden)	Tb	(Xe) (4f) ⁹ (6s) ²	⁶ H _{15/2}	6,7
66	|	Dy	(Xe) (4f) ¹⁰ (6s) ²	⁵ I ₈	6,8
67	|	Ho	(Xe) (4f) ¹¹ (6s) ²	⁴ I _{15/2}	6,0
68	|	Er	(Xe) (4f) ¹² (6s) ²	³ H ₆	6,1
69	|	Tm	(Xe) (4f) ¹³ (6s) ²	² F _{7/2}	6,2
70	|	Yb	(Xe) (4f) ¹⁴ (6s) ²	¹ S ₀	6,2
71	)	Lu	(Xe) (4f) ¹⁴ (5d) ¹ (6s) ²	² D _{3/2}	5,0
72		Hf	(Xe) (4f) ¹⁴ (5d) ² (6s) ²	³ F ₂	5,5
73		Ta	(Xe) (4f) ¹⁴ (5d) ³ (6s) ²	⁴ F _{3/2}	7,9
74		W	(Xe) (4f) ¹⁴ (5d) ⁴ (6s) ²	⁵ D ₀	8,0
75		Re	(Xe) (4f) ¹⁴ (5d) ⁵ (6s) ²	⁶ S _{5/2}	7,9
76		Os	(Xe) (4f) ¹⁴ (5d) ⁶ (6s) ²	⁵ D ₄	8,7
77		Ir	(Xe) (4f) ¹⁴ (5d) ⁷ (6s) ²	⁴ F _{9/2}	9,2
78		Pt	(Xe) (4f) ¹⁴ (5d) ⁹ (6s) ¹	³ D ₃	9,0
79		Au	(Xe) (4f) ¹⁴ (5d) ¹⁰ (6s) ¹	² S _{1/2}	9,2
80		Hg	(Xe) (4f) ¹⁴ (5d) ¹⁰ (6s) ²	¹ S ₀	10,4
81		Tl	(Xe) (4f) ¹⁴ (5d) ¹⁰ (6s) ² (6p) ¹	² P _{1/2}	6,1
82		Pb	(Xe) (4f) ¹⁴ (5d) ¹⁰ (6s) ² (6p) ²	³ P ₀	7,4
83		Bi	(Xe) (4f) ¹⁴ (5d) ¹⁰ (6s) ² (6p) ³	⁴ S _{3/2}	7,3
84		Po	(Xe) (4f) ¹⁴ (5d) ¹⁰ (6s) ² (6p) ⁴	³ P ₂	8,4
85		At	(Xe) (4f) ¹⁴ (5d) ¹⁰ (6s) ² (6p) ⁵	² P _{3/2}	9,5
86		Rn	(Xe) (4f) ¹⁴ (5d) ¹⁰ (6s) ² (6p) ⁶	¹ S ₀	10,7

87		Fr	(Rn) (7s) ¹	² S _{1/2}	3,9
88		Ra	(Rn) (7s) ²	¹ S ₀	5,3
89	(	Ac	(Rn) (6d) ¹ (7s) ²	² D _{3/2}	6,9
90	|	Th	(Rn) (6d) ² (7s) ²	³ F ₂	6,1
91	|	Pa	(Rn) (5f) ² (6d) ¹ (7s) ²	⁴ K _{11/2}	5,9
92	|	U	(Rn) (5f) ³ (6d) ¹ (7s) ²	⁵ L ₆	6,2 (4,5 GJahre)
93	|	Np	(Rn) (5f) ⁴ (6d) ¹ (7s) ²	⁶ L _{11/2}	6,3 (2.1 MJahre)
94	|	Pu	(Rn) (5f) ⁶ (7s) ²	⁷ F ₀	6,1 (79 MJahre)
95	Actiniden	Am	(Rn) (5f) ⁷ (7s) ²	⁸ S _{7/2}	6,0 (7,4 kJahre)
96	|	Cm	(Rn) (5f) ⁷ (6d) ¹ (7s) ²	⁹ D ₂	6,0 (15 MJahre)
97	|	Bk	(Rn) (5f) ⁹ (7s) ²	⁶ H _{15/2}	6,2 (1,4 kJahre)
98	|	Cf	(Rn) (5f) ¹⁰ (7s) ²	⁵ I ₈	6,3 (0,9 kJahre)
99	|	Es	(Rn) (5f) ¹¹ (7s) ²	⁵ I _{15/2}	6,4 (472 Tage)
100	|	Fm	(Rn) (5f) ¹² (7s) ²	³ H ₆	6,5 (100 Tage)
101	|	Md	(Rn) (5f) ¹³ (7s) ²	² F _{7/2}	6,6 (52 Tage)
102	)	No	(Rn) (5f) ¹⁴ (7s) ²	¹ S ₀	6,7 (170 min)
103		Lr	(Rn) (5f) ¹⁴ (7s) ² (7p) ¹ *	² P _{1/2} *	??? (10 h)
104		Rf	(Rn) (5f) ¹⁴ (6d) ² (7s) ² *	³ F ₂ *	??? (13 h)
105		Db	(Rn) (5f) ¹⁴ (6d) ³ (7s) ² *	⁴ F _{3/2} *	??? (5,6 h)
106		Sg	(Rn) (5f) ¹⁴ (6d) ⁴ (7s) ² *	⁵ D ₀ *	??? (120 min)
107		Bh	(Rn) (5f) ¹⁴ (6d) ⁵ (7s) ² *	⁶ S _{5/2} *	??? (90 min)
108		Hs	(Rn) (5f) ¹⁴ (6d) ⁶ (7s) ² *	⁵ D ₄ *	??? (67 min)
109		Mt	(Rn) (5f) ¹⁴ (6d) ⁷ (7s) ² *	⁴ F _{9/2} *	??? (30 min)
110		Ds	(Rn) (5f) ¹⁴ (6d) ⁹ (7s) ¹ *	³ D ₃ *	??? (4 min)
111		Rg	(Rn) (5f) ¹⁴ (6d) ¹⁰ (7s) ¹ *	² S _{1/2} *	??? (10 min)
112		Cn	(Rn) (5f) ¹⁴ (6d) ¹⁰ (7s) ² *	¹ S ₀ *	??? (40 min)

Die Namenlosen: Uu...

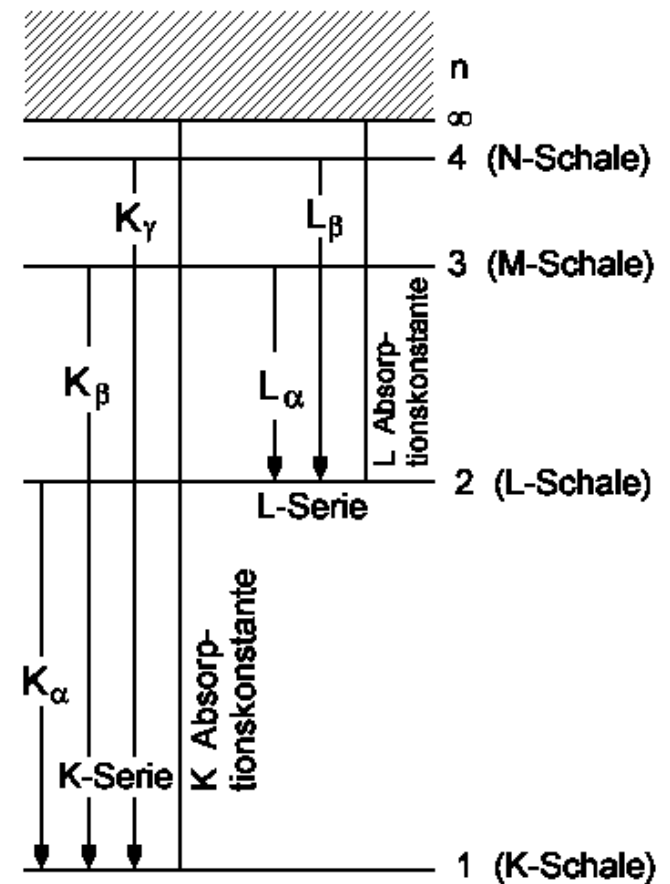
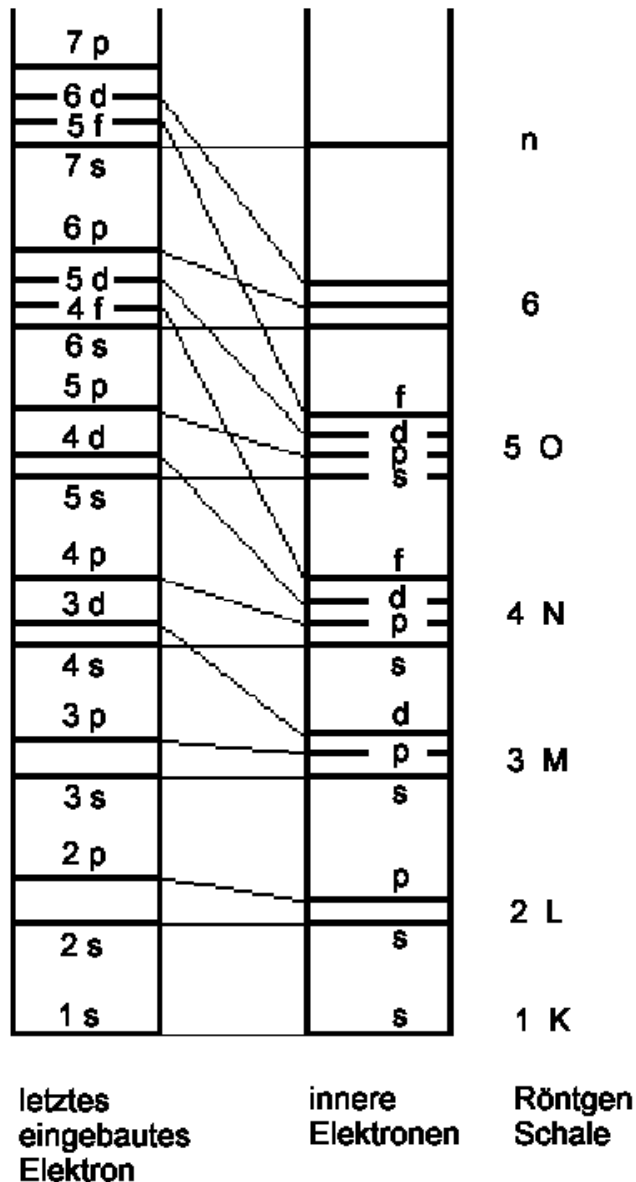
Nr.	Element (beobachtet)	Term (vermutet)	$E_{\text{Ionisation}}$ (Lebensdauer)
113	^{283}Uut (Cn) (7p) ¹	$^2\text{P}_{1/2}$	??? (20 min)
114	^{285}Uuq (Cn) (7p) ²	$^3\text{P}_0$	??? (80 sec)
115	^{288}Uup (Cn) (7p) ³	$^4\text{S}_{3/2}$	??? (60 sec)
116	^{292}Uuh (Cn) (7p) ⁴	$^3\text{P}_2$	??? (120 msec)
117	???Uup (Cn) (7p) ⁵	$^2\text{P}_{3/2}$	??? (50 msec)
118	^{293}Uuh (Cn) (7p) ⁶	$^1\text{S}_0$	??? (5 msec)
119	???PC3 (7p) ⁶ (8s) ¹	$^2\text{S}_{1/2}$??? (???)
120	???PC4 (7p) ⁶ (8s) ²	$^1\text{S}_0$??? (???)
121	..... (5g) ¹	$^2\text{G}_{7/2}$	...

Insel der Stabilität

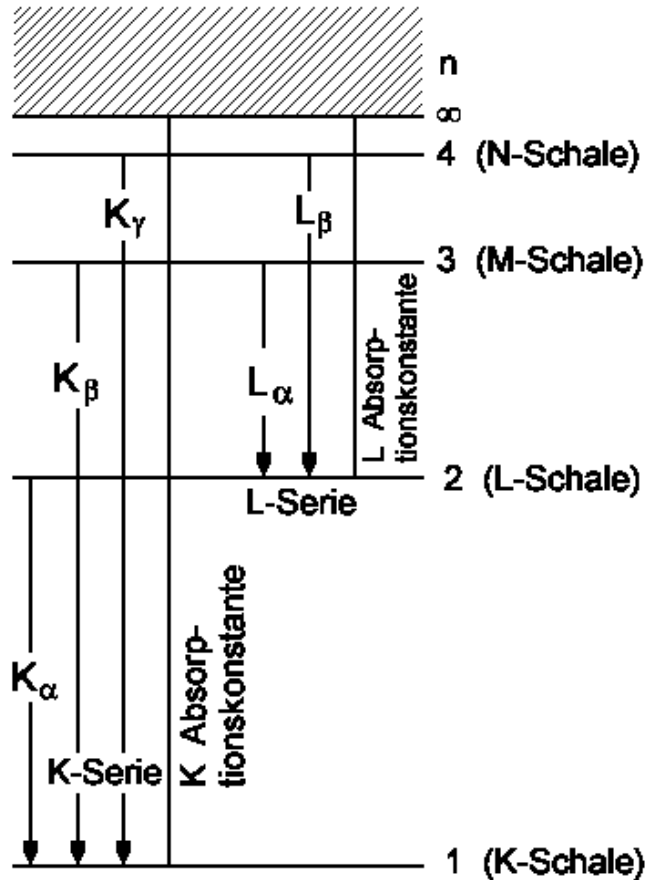


Nach dem Schalenmodell für Kerne ist die magische Neutronenzahl 184 und die entsprechenden Protonenzahlen sind 114, 120 und 126.

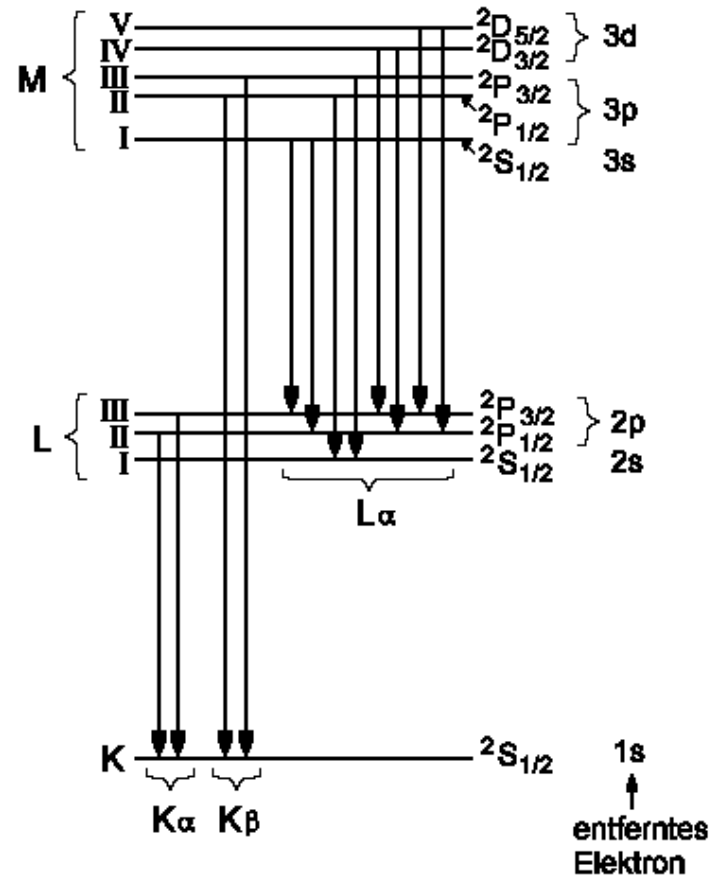
Röntgenstrahlung



Röntgenstrahlung - Feinstruktur



Röntgenübergänge in einem Atom mit einer Atomnummer $Z \sim 36$



Feinstruktur von Röntgenübergängen

Ende Kapitel 5