

# Fermion

**Fermionen** (benannt nach Enrico Fermi) sind Teilchen im physikalischen Sinn, die einen **halbzahligen Spin** besitzen. Unter den Elementarteilchen gehören zu den Fermionen die Leptonen (z. B. das **Elektron** und das **Neutrino**) und die Quarks. Unter den zusammengesetzten Teilchen unter anderem alle Teilchen, die aus einer ungeraden Anzahl von Quarks aufgebaut sind, wie zum Beispiel alle Baryonen, zu denen auch das **Proton** und das **Neutron** gehören.

Fermionen grenzen sich ab von den **Bosonen, die einen ganzzahligen Spin** besitzen. Ein Elementarteilchen ist immer entweder ein Boson oder ein Fermion.

Fermionen gehorchen dem **Pauli'schen Ausschlussprinzip**, welches besagt, dass zwei Fermionen nicht gleichzeitig am gleichen Ort einen identischen Quantenzustand annehmen können. Allgemein gilt, dass die quantenmechanische Wellenfunktion zweier oder mehrerer gleichartiger Fermionen bei Vertauschung zweier Fermionen vollkommen antisymmetrisch sein muss, d. h. das Vorzeichen ändert sich.

Auf die Elektronen in einem Atom angewendet erklärt das Pauli-Prinzip, dass **nicht alle Elektronen in den gleichen Grundzustand fallen können**, sondern paarweise die verschiedenen Orbitale eines Atoms auffüllen. Erst durch diese Eigenschaft erklärt sich der **systematische Aufbau des Periodensystems der chemischen Elemente**.

Eine weitere Eigenschaft von Fermionen mit dem Spin  $1/2$  ist, dass ihre quantenmechanische Wellenfunktion nach einer Rotation um  $360^\circ$  das Vorzeichen ändert; erst nach einer Rotation um  $720^\circ$  (also zweimal komplett gedreht) ist der Ausgangszustand wieder hergestellt. Das lässt sich anschaulich mit einer Uhr vergleichen: erst nach einer Drehung des Stundenzeigers um  $720^\circ$  hat man wieder die gleiche Tageszeit.

# Boson

**Bosonen** (nach dem indischen Physiker Satyendranath Bose) sind im Standardmodell der Teilchenphysik alle Teilchen, die einen ganzzahligen Spin besitzen. Hierzu gehören:  
unter den Elementarteilchen: die Eichbosonen als Vermittler der Grundkräfte  
unter den zusammengesetzten Teilchen: alle **Atomkerne mit gerader Nukleonenzahl** (z. B. der Kern des schweren Wasserstoffs Deuterium, der aus zwei Fermionen besteht: Proton und Neutron).

# Minitest 10

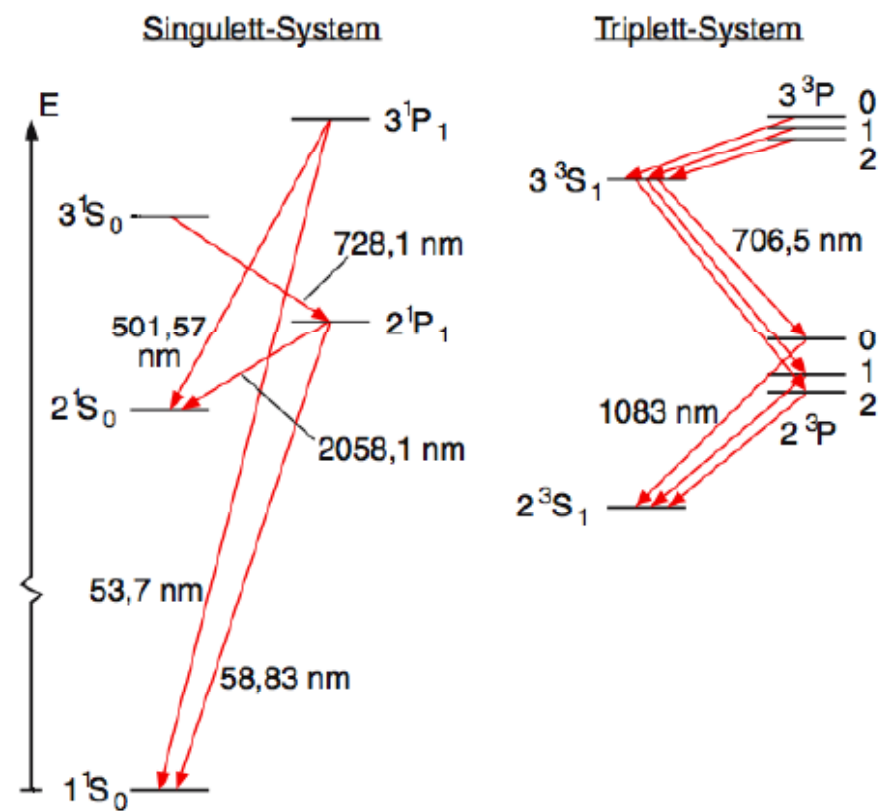
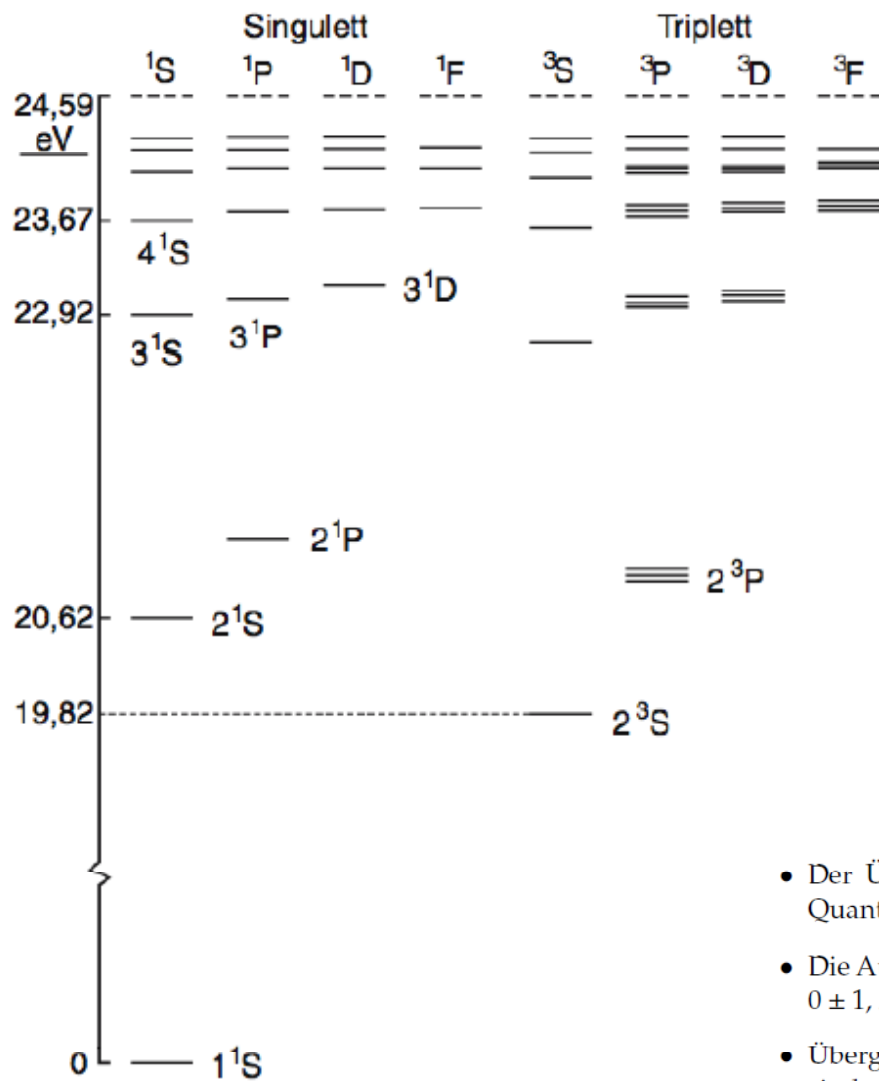
- Wenn Elektronen Bosonen gibt, würde es dann metallische Leiter geben?
- Wenn Elektronen Bosonen gibt, würde es dann Halbleiter geben?

## Termschema des Heliumatoms

- Der Grundzustand des Heliumatoms ist gegeben, wenn beide Elektronen sich im energetisch niedrigsten Niveau befinden:  $n_1 = n_2 = 1, l_1 = l_2 = 0, m_{l_1} = m_{l_2} = 0$ , mit unterschiedlichen Spinquantenzahlen  $m_{s_1} = +1/2$  und  $m_{s_2} = -1/2$ .
- Der Grundzustand ist ein Singulett-Zustand ( $S = s_1 + s_2 = 0, M_S = m_{s_1} + m_{s_2} = 0$ ).
- Die Anzahl der Einstellmöglichkeiten des Gesamtspins  $S$  im Magnetfeld ergibt sich nach  $2S + 1$  (**Multiplizität**). Man schreibt den Grundzustand des He-Atoms als  $1^1S_0$ -Zustand mit  $n = 1, S = 0 \Rightarrow 2S + 1 = 1, L = 0$  (Gesamtbahndrehimpuls beider Elektronen  $L = l_1 + l_2$ ),  $J = 0$  (Gesamtdrehimpuls  $J = L + S$  mit  $|J| = \sqrt{J(J + 1)}\hbar$ ) Der Index 0 unten rechts ( $1^1S_0$ ) bezeichnet  $J$ . Der Index 1 oben links gibt die Multiplizität an.

*Während der Grundzustand wegen des Pauliprinzipis ein Singulett-Zustand ist, können angeregte Zustände als Singulett- und Triplett-Zustände realisiert werden.*

- Wegen der Spin-Bahn-Kopplung spalten alle Triplett-Zustände mit  $S = 1$  und  $L \geq 1$  auf in drei Feinstrukturkomponenten mit  $J = l_1 + l_2 + l_1 + s_2$ . Das Termschema des He-Atoms besteht deshalb aus nicht-aufspaltbaren Singulett-Zuständen und aufspaltbaren Triplett-Zuständen.
- Aufgrund des Pauliprinzipis unterscheiden sich Singulett- und Triplett-Zustände energetisch voneinander, auch wenn die räumlichen Quantenzahlen ( $n_1, l_1, m_{l_1}$ ) identisch sind, z.B.  $\Delta E = E(2^1S) - E(2^3S) = 0,78 \text{ eV}$ . Durch die Pauli-Abstoßung kommt es zu einem größeren Abstand der beiden Elektronen im Zustand  $2^3S$  als im  $2^1S$ -Zustand, was zu einer kleineren mittleren Coulomb-Energie im  $2^3S$ -Zustand führt:  $\langle E_{pot}(2^3S) \rangle < \langle E_{pot}(2^1S) \rangle$ .



- Der Übergang eines Elektrons in ein neues Niveau führt zu einer Änderung dessen Quantenzahlen  $(n, l, m, j, s)$ , wobei das andere Elektron unverändert bleibt.
- Die Auswahlregeln für die Übergänge entsprechen denen des H-Atoms:  $\Delta L = \pm 1$ ,  $\Delta M_L = 0 \pm 1$ ,  $\Delta S = 0$ .
- Übergänge zwischen Zuständen des Singulett-Systems ( $S = 0$ ) und des Triplett-Systems sind verboten ( $S = 1$ ).

# Das Schalenmodell der Atomhüllen

- Die radiale Verteilung der Elektronen um den Kern ist bestimmt durch die Hauptquantenzahl  $n$  und die Drehimpulsquantenzahl  $l$ :  $r^2|R_{n,l}(r)|^2$ .
- Zu jedem  $l$  gibt es  $(2l + 1)$  Wellenfunktionen  $Y_m^l$  mit verschiedenen  $m_l$  und  $l = 0, 1, \dots, n - 1$ . Insgesamt gibt es zu jedem  $n$

$$\sum_{l=0}^{n-1} (2l + 1) = n^2 \quad (25)$$

verschiedene Zustände, die für verschiedene Spins mit insgesamt  $2n^2$  Elektronen besetzt werden können.

- Bestimmt man die zeitliche gemittelte Ladungsdichteverteilung der Elektronen um den Kern, so ergibt sich durch Summation über die Quantenzahlen  $l, m_l$  bei festem  $n$  eine kugelsymmetrische Verteilung. Diese Funktion hat Maxima bei verschiedenen Radien, die von  $n$  abhängen. Sie werden als **Elektronenschalen** bezeichnet und geben die wahrscheinlichsten Aufenthaltsorte der Elektronen an:

$n = 1$  : K-Schale,  $n = 2$  : L-Schale,  $n = 3$  : M-Schale,  $n = 4$  : N-Schale,  $n = 5$  : O-Schale

- Die Schalen, in denen die Elektronen die gleichen Quantenzahlen  $(n, l)$  besitzen, nennt man **Unterschalen**.
- Zu jedem Wert von  $n$  gibt es  $n$  verschiedene  $l$  und damit  $n$  Unterschalen.
- *Nach dem Pauliprinzip kann jede Elektronenschale mit maximal  $2n^2$  Elektronen besetzt sein.*

## Sukzessiver Aufbau der Atomhüllen mit steigender Kernladungszahl

- Folgende Abbildung verdeutlicht den Aufbau der Elektronen für die Grundzustände aller Elektronen bis  $Z = 10$ .

