

Atome & Kerne

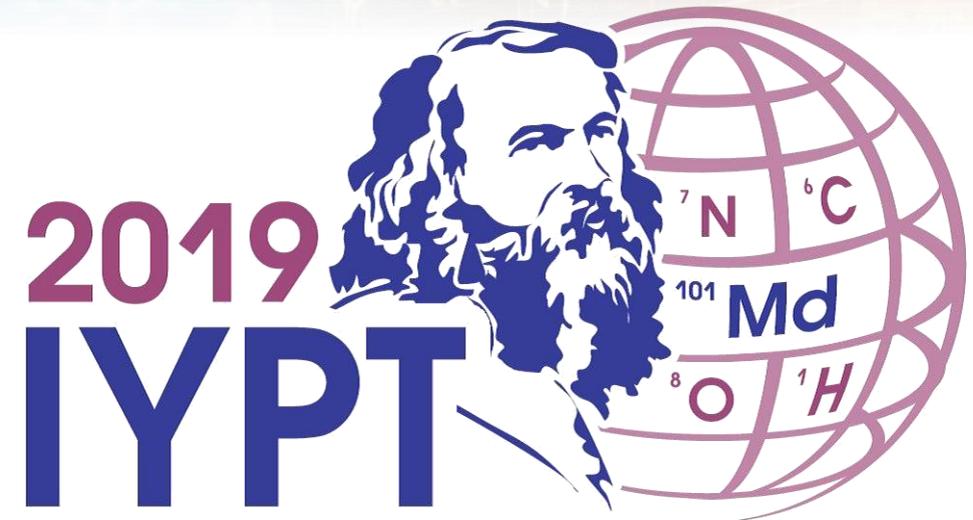
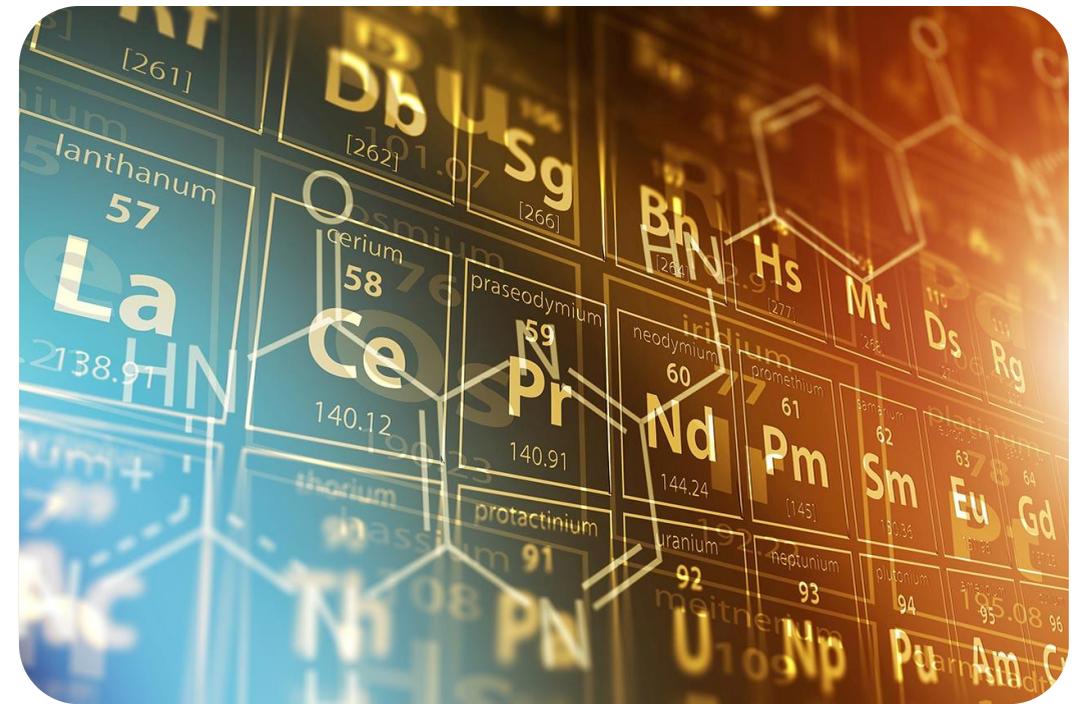
Sommersemester 2019

Vorlesung # 15, 13.06.19

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Teilchenphysik, Fakultät für Physik

Mehrelektronensysteme

- Helium-Atom
- Pauli-Prinzip
- Drehimpuls-Kopplungen
Russel-Saunders (LS)
jj-Schema
- Periodensystem & Schalenstruktur

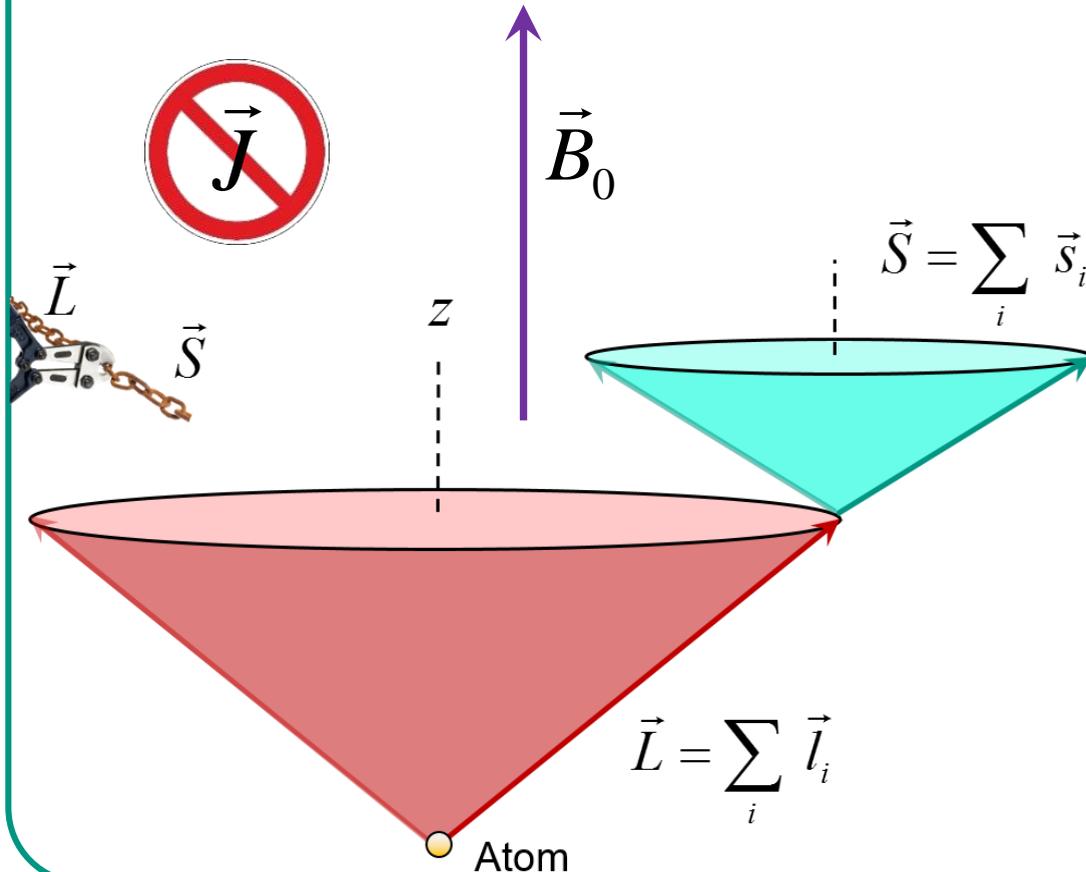


Magnetismus von Hülle & Kern im B-Feld

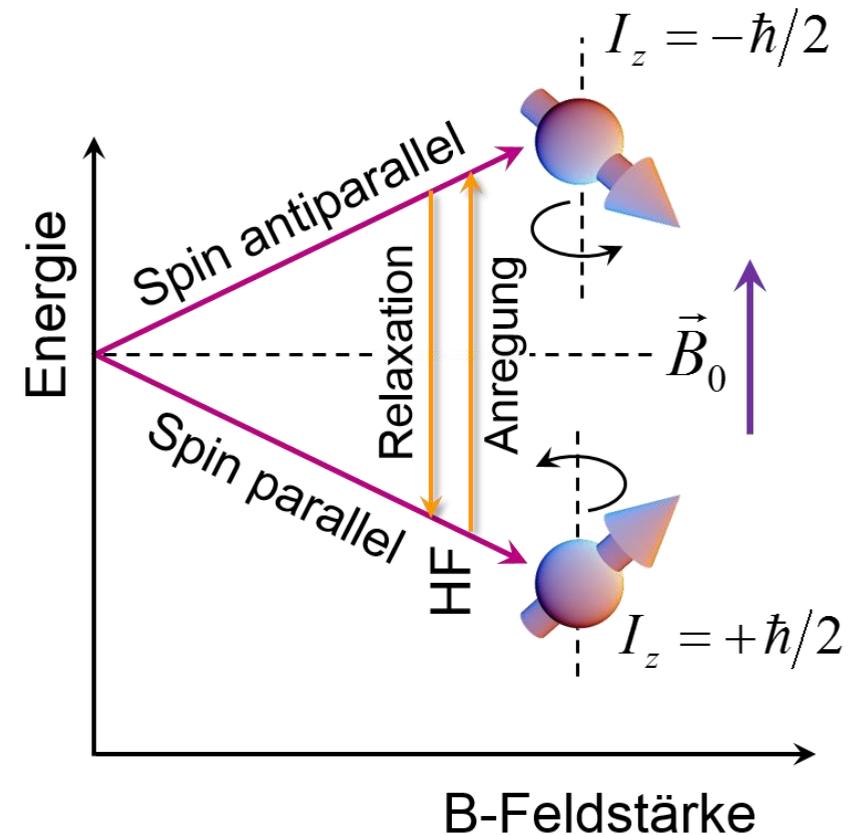


- Neuordnung des Hüllenmagnetismus & Umklappen des Kernspins

- **Paschen-Back Kopplung:** im starken B-Feld entkoppeln \vec{L} & \vec{S} und präzedieren separat um \vec{B}_0



- **Kernspin-Resonanz (NMR):** bei HF-Einstrahlung mit $\omega = \omega_L$ (MHz)
 \Rightarrow Spin- Anregung & -Relaxation

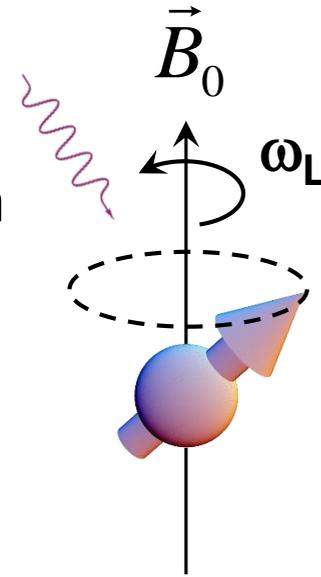


NMR Spektroskopie & MRI

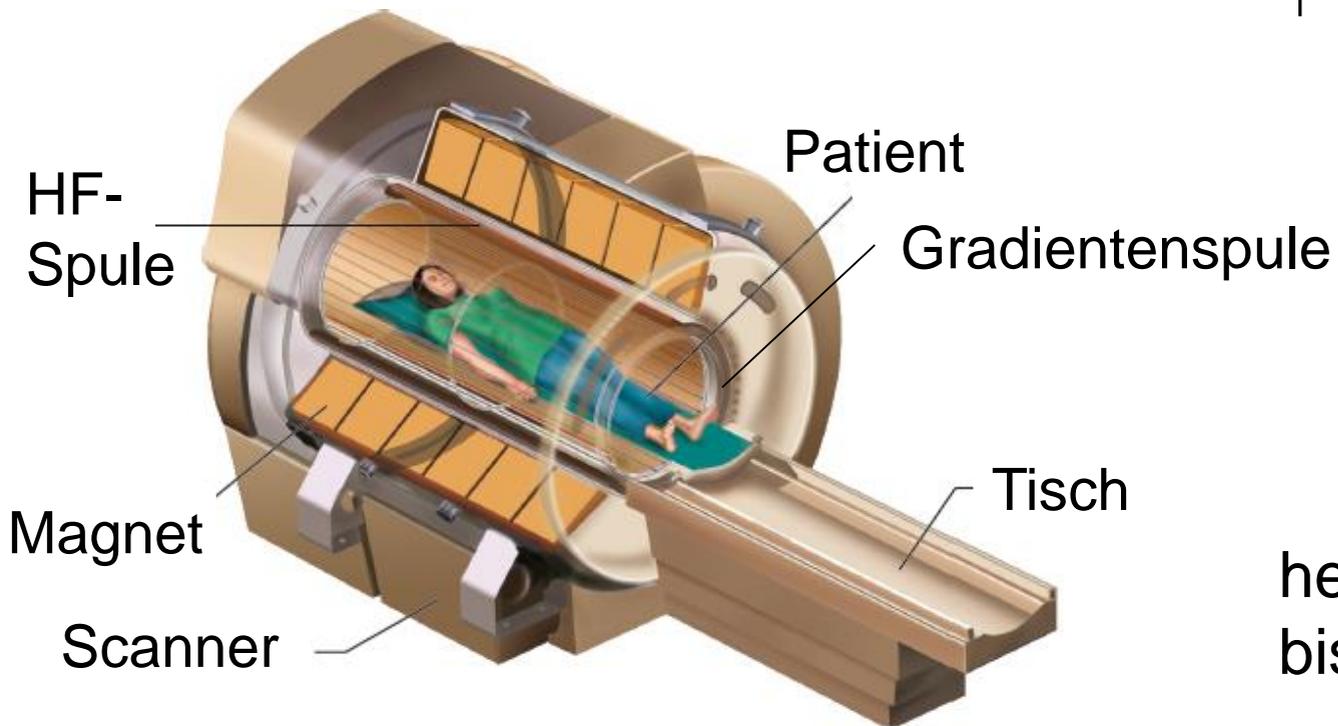


■ NMR: kleiner Polarisations-Effekt

- Besetzungsunterschiede zwischen 2 Zeeman-Niveaus (Polarisation) nur $\Delta F \sim 10^{-6}$ (ppm bei $B_0 = 1$ T)
⇒ **kleiner Polarisations-Effekt**

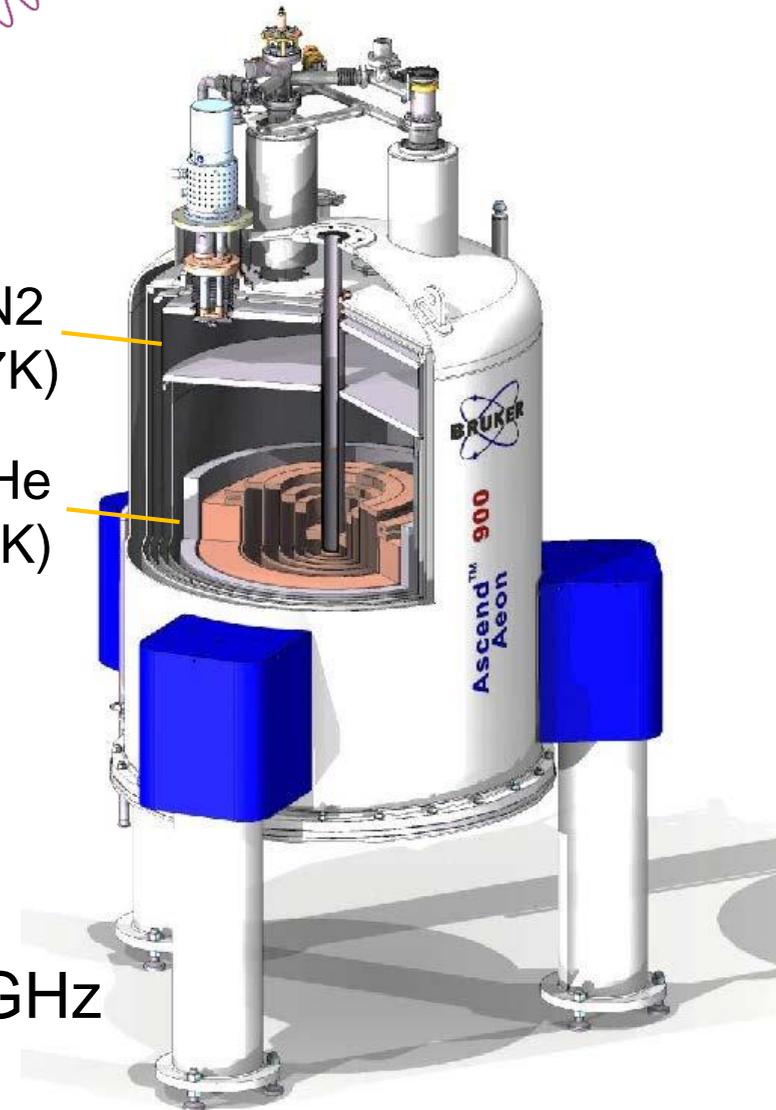


HF via Spule



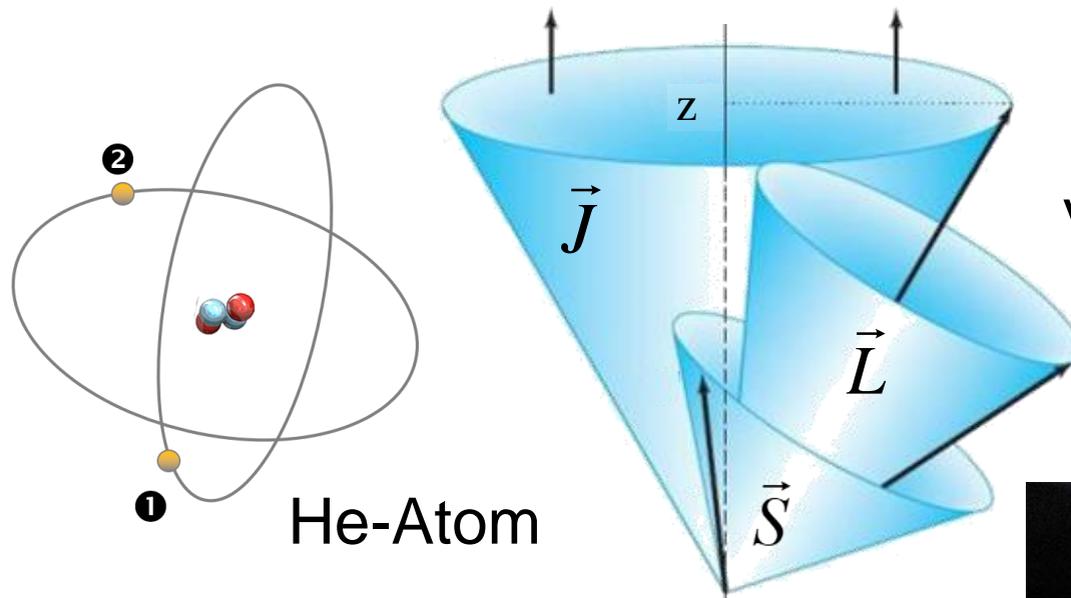
LN2
(77K)

LHe
(4K)



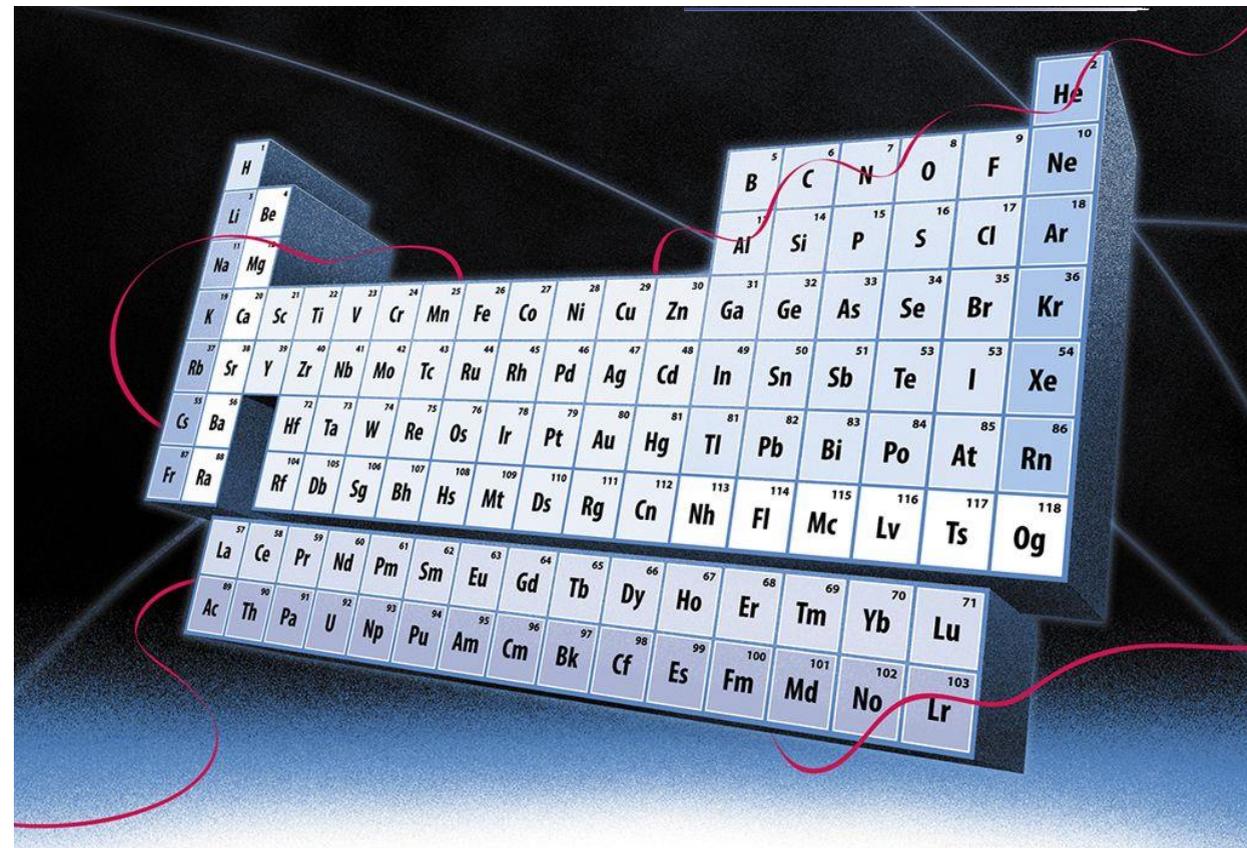
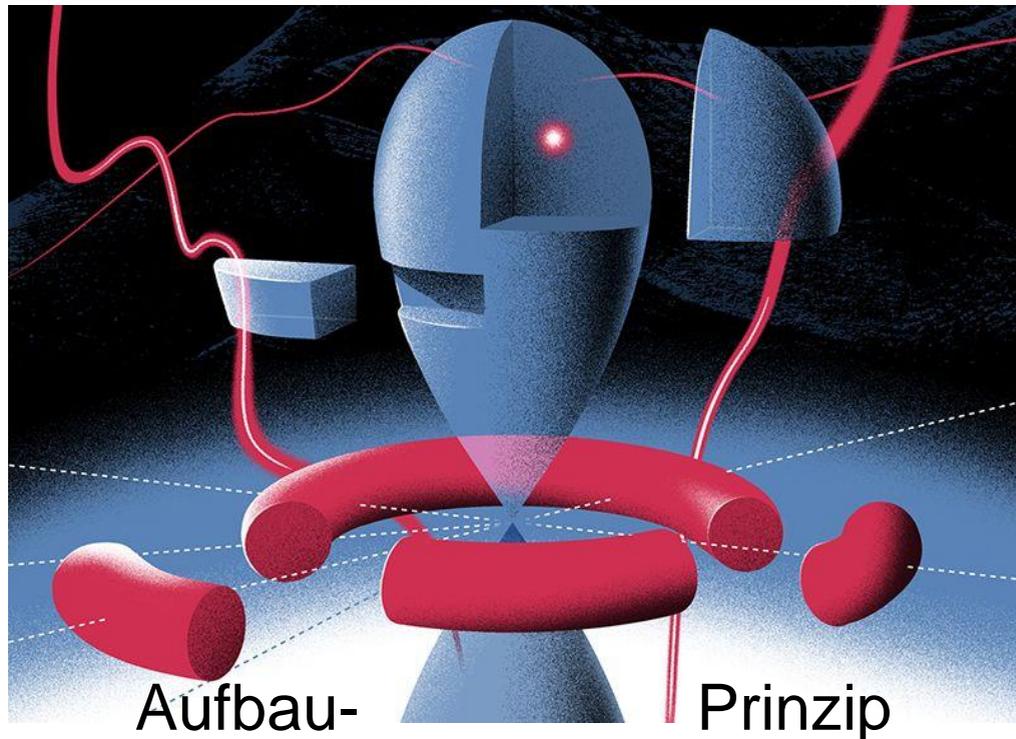
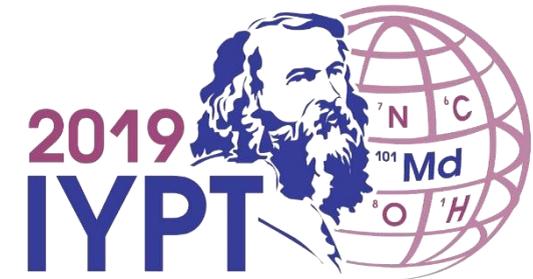
heute:
bis 1,1 GHz

7. Mehrelektronensysteme



Kopplungsarten
von Drehimpulsen

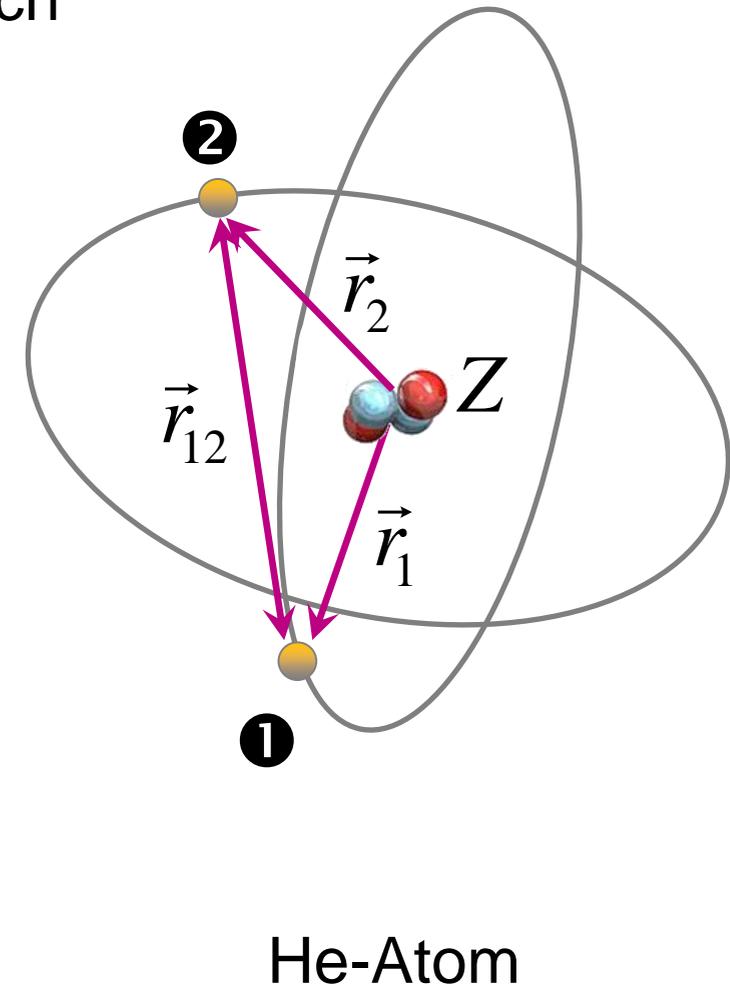
Periodensystem
der Elemente



■ Effekte in Mehrelektronensystemen

- generell beobachtet man **Vielkörperkräfte**
 - ⇒ geeignete Näherungsverfahren erforderlich
- Wechselwirkung des Kerns mit den Hüllen-Elektronen (anziehend)
- Wechselwirkung der Hüllen-Elektronen untereinander (abstoßend)

$$E = - \underbrace{\frac{Z \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot r_1}}_{\substack{\text{Ww.} \\ \text{Kern \&} \\ \text{e- \#1}}} - \underbrace{\frac{Z \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot r_2}}_{\substack{\text{Ww.} \\ \text{Kern \&} \\ \text{e- \#2}}} + \underbrace{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot r_{12}}}_{\substack{\text{Ww.} \\ \text{e- \#1 \&} \\ \text{e- \#2}}}$$



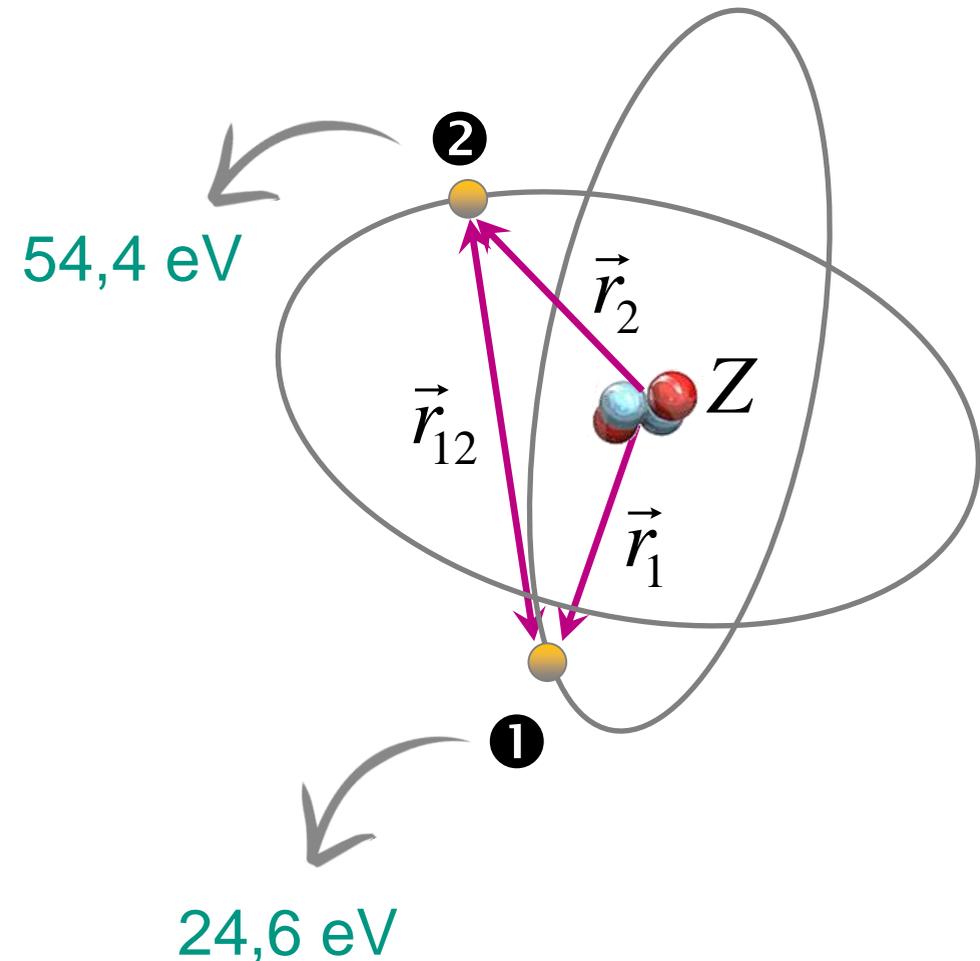
■ Effekte in Mehrelektronensystemen: Näherungsverfahren

- Lösung des 2-Elektronproblems nicht analog zum H-Atom mit Separationsansatz
⇒ **Hartree-Fock-Näherungsverfahren** mit **gemitteltem Potenzial**
- Güte der Berechnungen lässt sich testen an exp. **Ionisationsenergien**.
- Beispiel: He-4 Atom mit $Z = 2$ und 2 Elektronen im 1s Orbital

Ionisationsenergien:

Elektron #**1**: $\Delta E = 24,6 \text{ eV}$

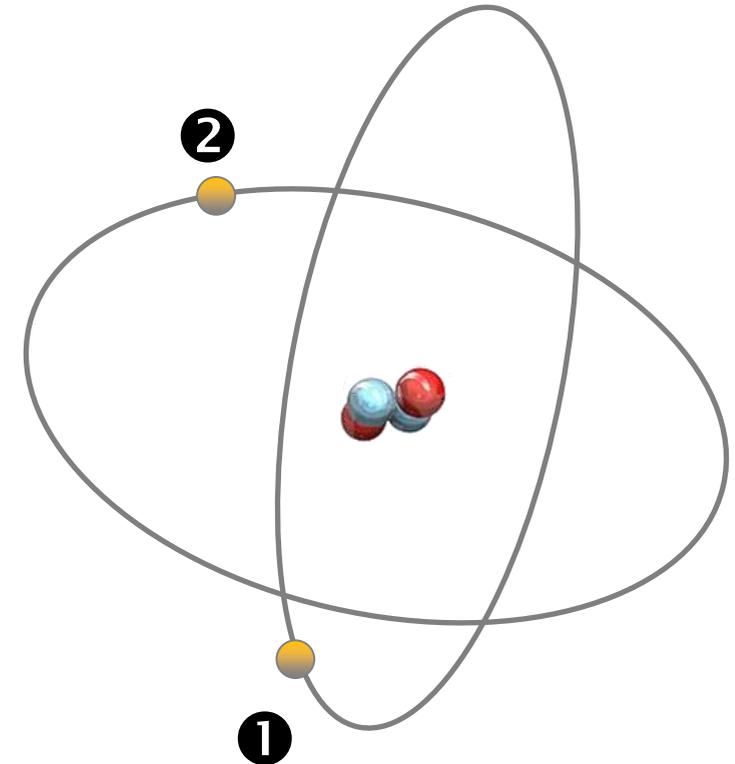
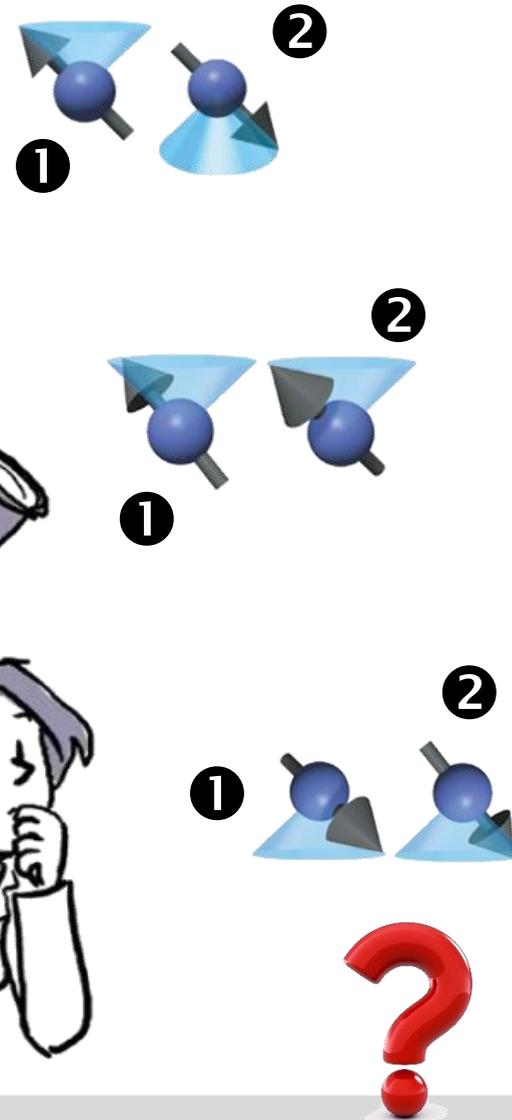
Elektron #**2**: $\Delta E = 54,4 \text{ eV}$



Mehrelektronensysteme – Spins

■ Effekte in Mehrelektronensystemen: Spinzustände

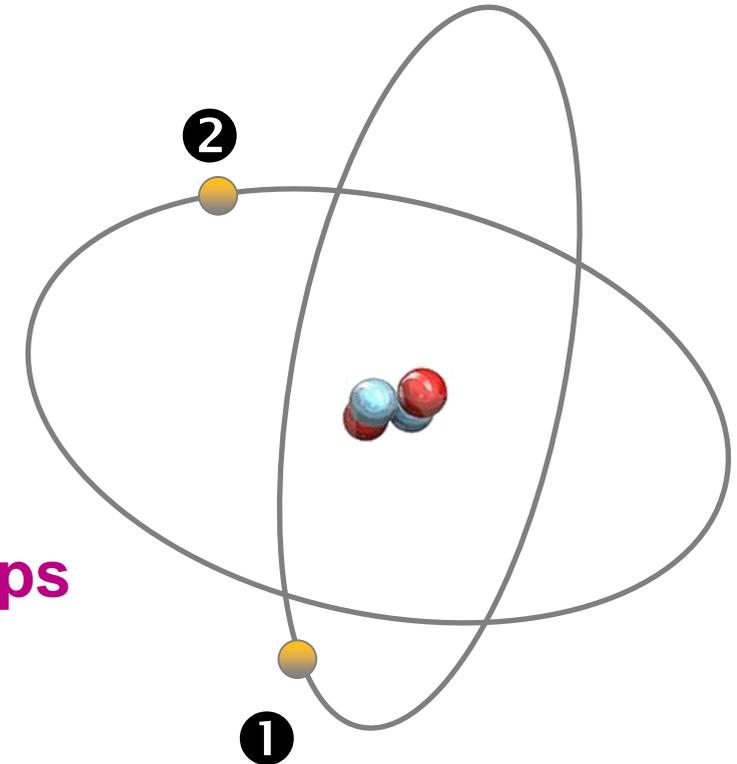
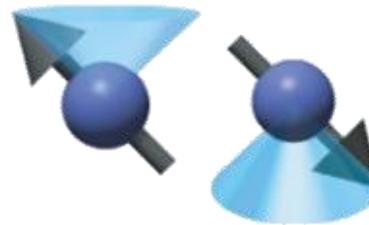
*Ah, Herr Pauli,
wir rotieren gerade:
Was machen die
Spins der e⁻?*



Ausschließungsprinzip von Pauli

■ Effekte im Helium-4 Grundzustand: Spinzustände antiparallel

Ganz einfach,
mein Prinzip
besagt: im
Grundzustand
antiparallel



- Wolfgang Pauli (1925):
Aufstellung des Pauli-Prinzips
⇒ Grundzustand von He nur
mit $L = 0$ und $S = 0$

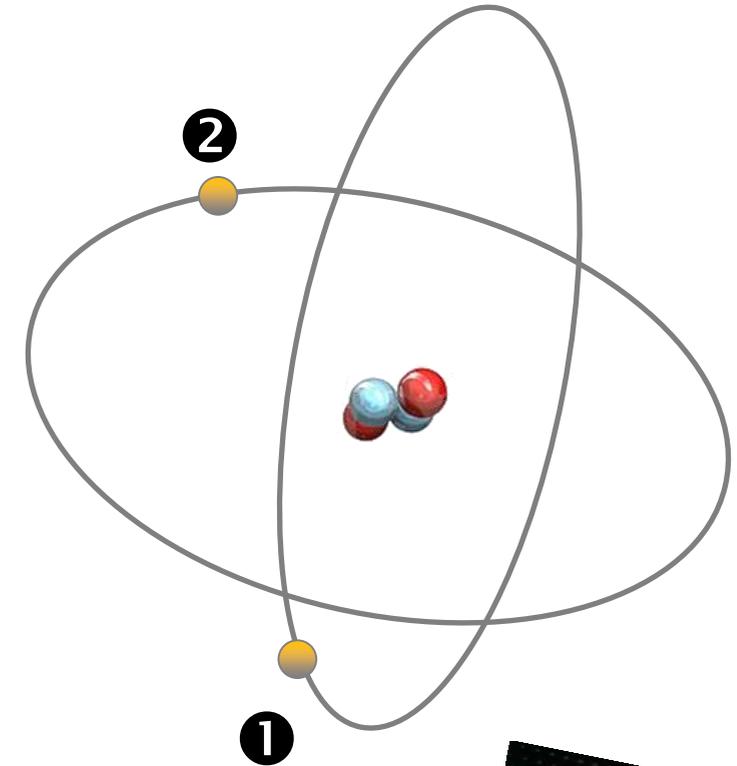
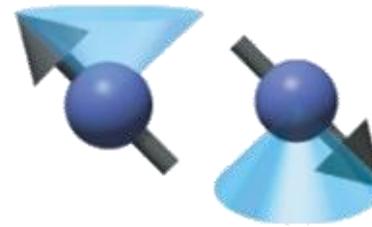
Ausschließungsprinzip: zwei Elektronen in einem Atom können nicht in allen Quantenzahlen übereinstimmen



Nobelpreis
1945

Grundzustand von Helium mit $S = 0$

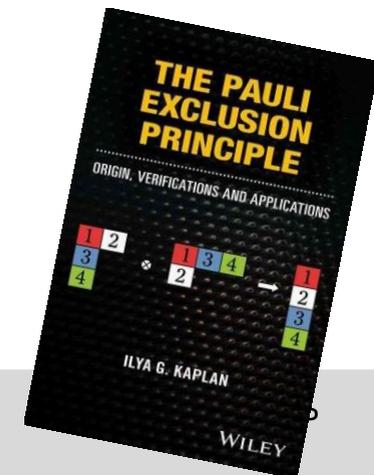
■ Effekte im Helium-4 Grundzustand: Spinzustände antiparallel



■ Wolfgang Pauli (1925):

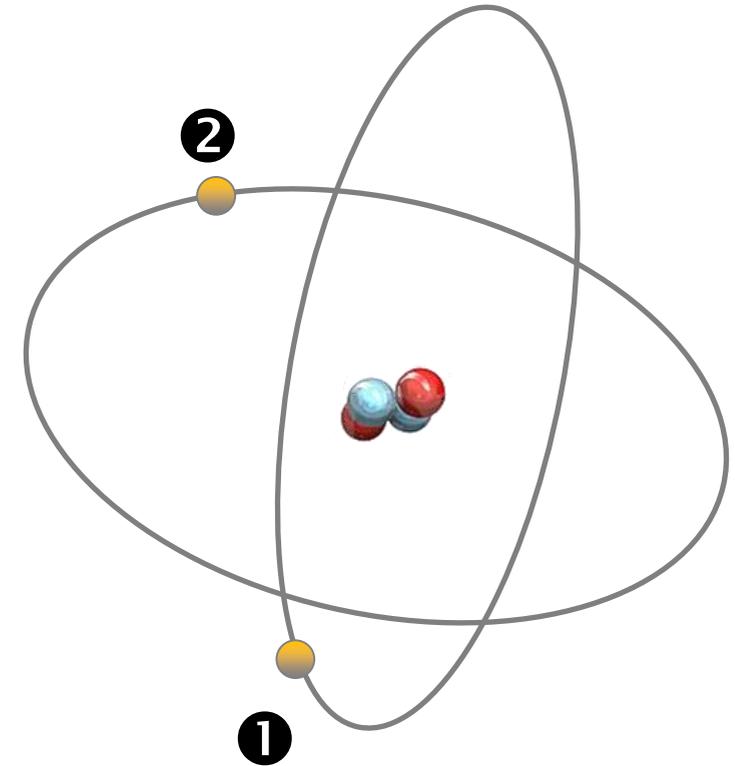
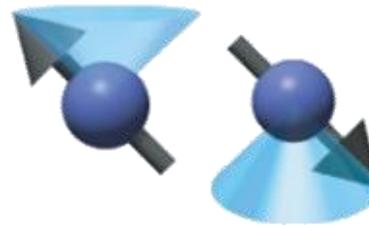
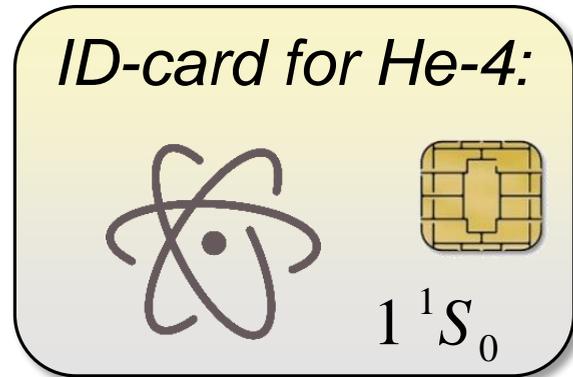
in einem Orbital
mit Quantenzahlen:

- Hauptquantenzahl n
 - Bahndrehimpuls ℓ
 - magnetische Quantenzahl m_ℓ
- ⇒ Spinquantenzahl $m_s = +\frac{1}{2}$ oder $-\frac{1}{2}$



Mehrelektronensysteme – Spins

■ Effekte im Helium-4 Grundzustand: Spinzustände antiparallel



Notation He-Grundzustand

2-Elektronensystem:

L, S, J Quantenzahlen

$n^{2S+1}L_J$ (2S+1: Spin-Multiplizität)

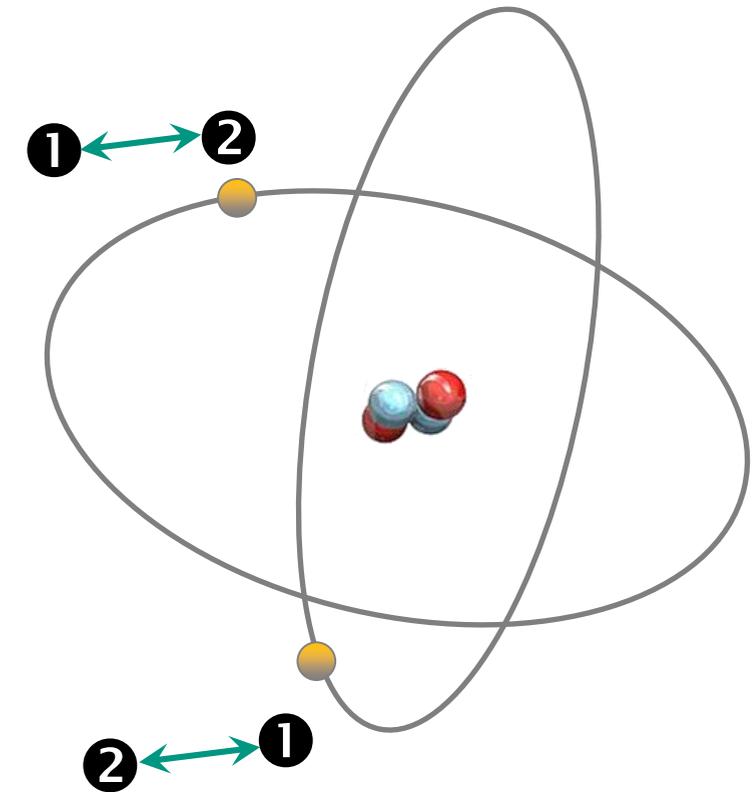
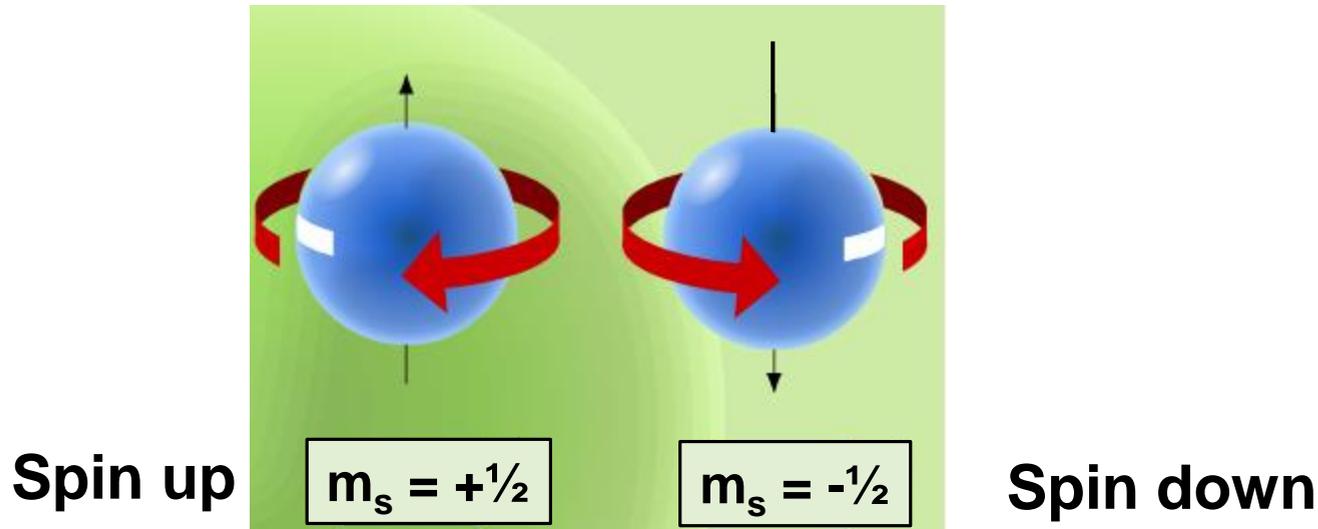
Grundzustand: 1^1S_0 und nicht 1^3S_1

2 Elektronen in 1s Orbital

$n = 1$, **Singulett**, $L = 0$, $J = 0$

Antisymmetrie der Wellenfunktion

- Wellenfunktion eines Quantensystems in Bezug auf Vertauschung von 2 Fermionen ist **antisymmetrisch**



Pauli Exclusion

Q: clubetico.org

Antisymmetrie der Wellenfunktion

- Wellenfunktion eines Quantensystems von 2 Fermionen ist **antisymmetrisch** bei Vertauschung ① ↔ ②

$$\Psi(\vec{r}_1, s_1, \dots, \vec{r}_n, s_n) = -P \Psi(\vec{r}_1, s_1, \dots, \vec{r}_n, s_n)$$

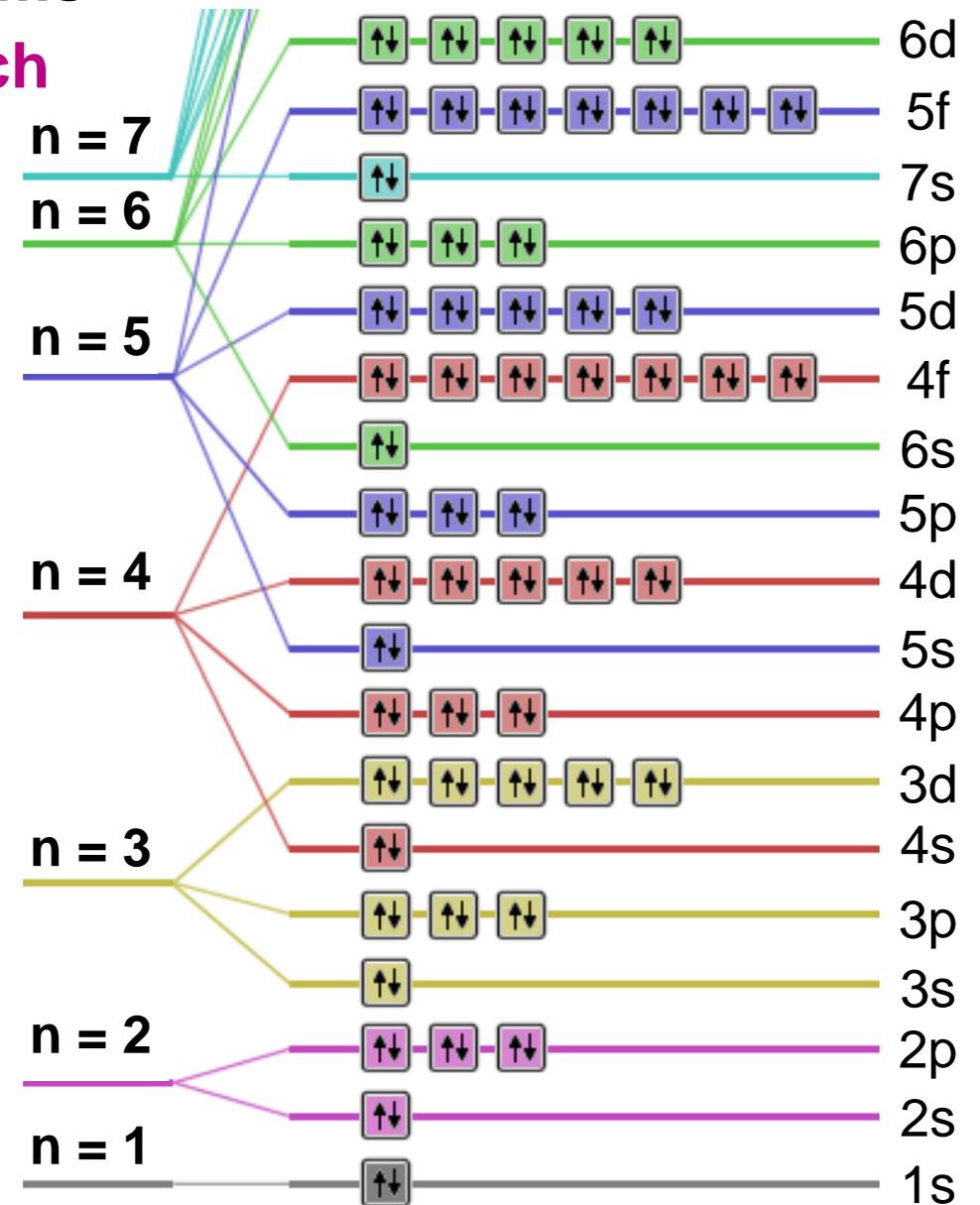
Ort Spin

Ort Spin

Permutationsoperator: 1 ↔ 2

Permutationsoperator: 1 ↔ 2

Aufbau der Atome



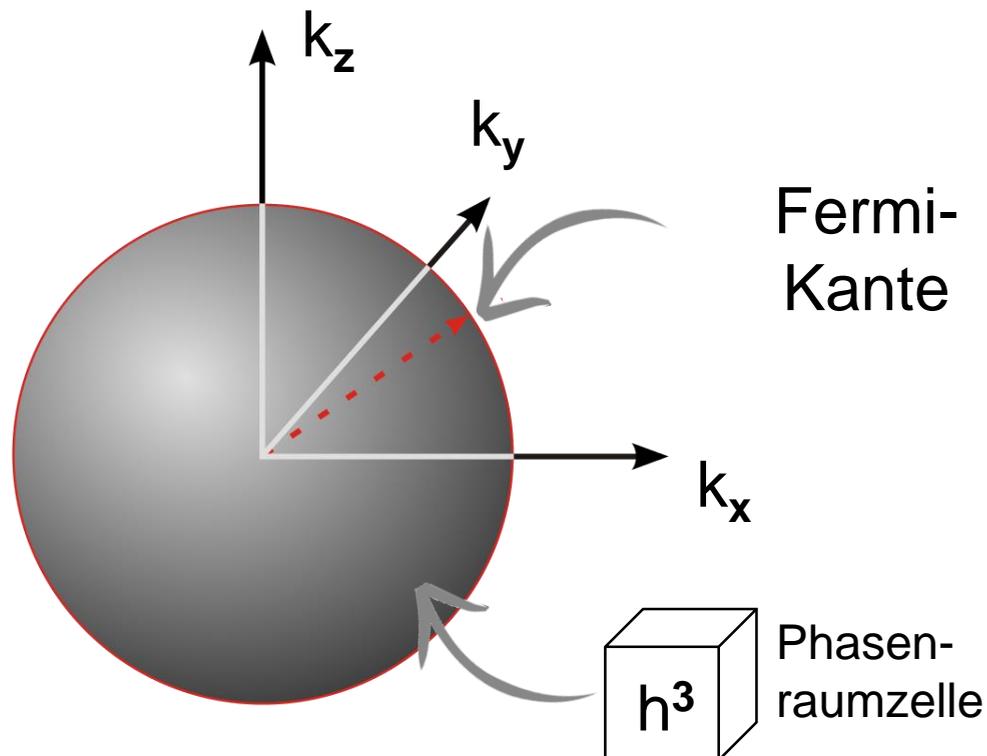
Paulisches Ausschließungsprinzip

- Wellenfunktion eines Quantensystems von 2 Fermionen ist **antisymmetrisch** bei Vertauschung ① ↔ ②

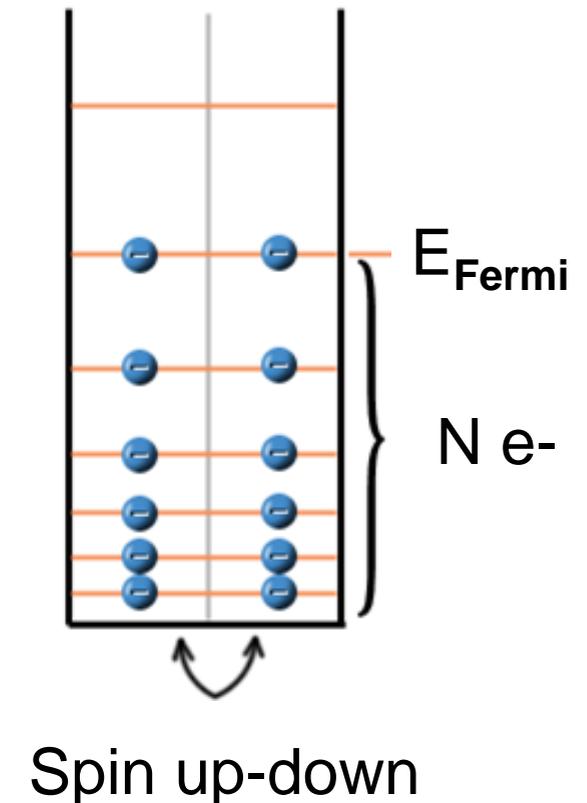
- Konsequenzen für Aufbau Materie:
ausgedehnte makroskopische Objekte
- Fermionen: Fermi-Energie E_F



Enrico Fermi



Elektronen in Festkörpern



Pauli Prinzip – in der Astrophysik

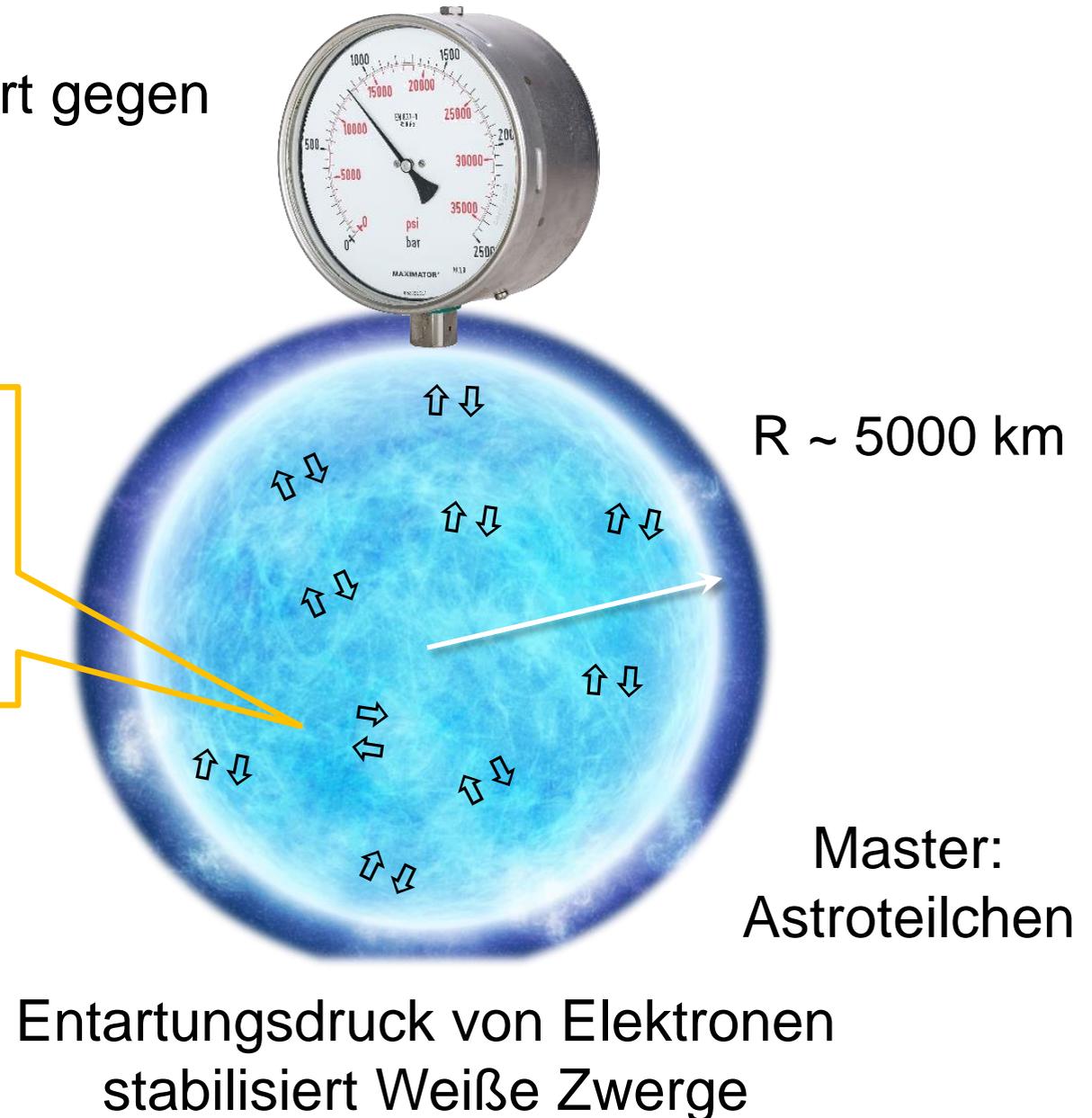
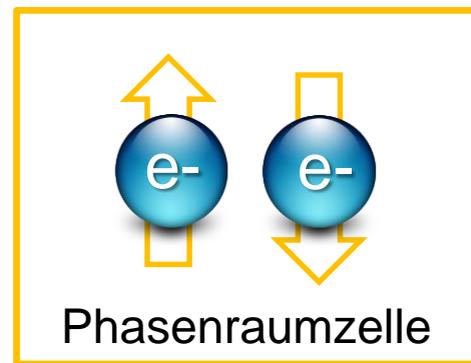
■ Degenerierte Sternmaterie

Weiße Zwerge werden stabilisiert gegen **den Gravitationsdruck** durch **den Entartungsdruck des freien Elektronengases**

Subramanyan
Chandrasekhar



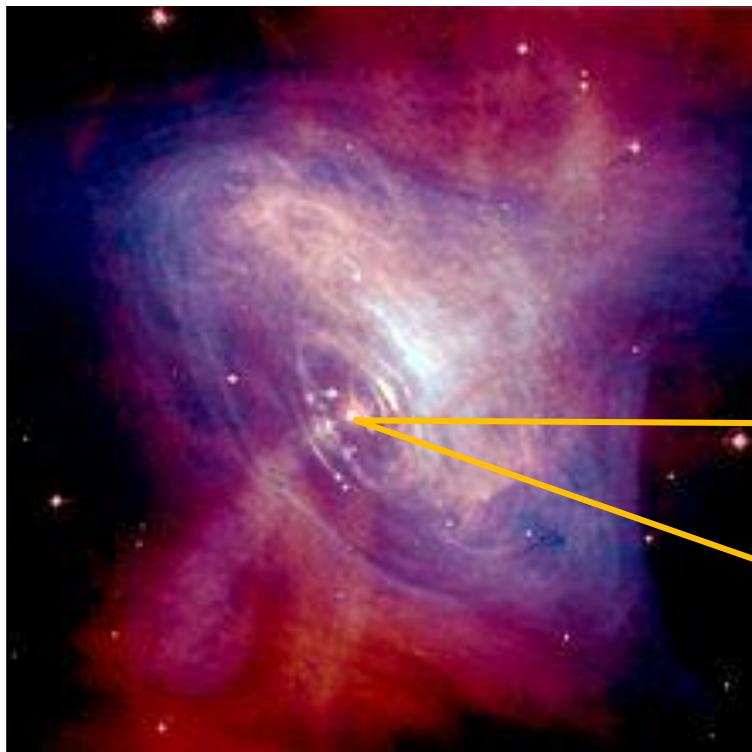
Nobelpreis
1983



Pauli Prinzip – in der Astrophysik

■ Degenerierte Sternmaterie

Neutronensterne werden stabilisiert gegen den **Gravitationsdruck** durch den **Entartungsdruck des freien Neutronengases**

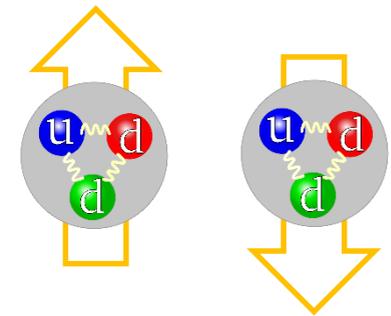


Q: NASA



Entartungsdruck
bei Neutronensternen

Spin = $\frac{1}{2}$



Master:
Astroteilchen

Fun with Facts: Pauli-Verbot in Sternen

■ Für welches Volumen gilt das Pauli-Ausschließungsprinzip für 2 e-?

A) über das gesamte Sternvolumen!

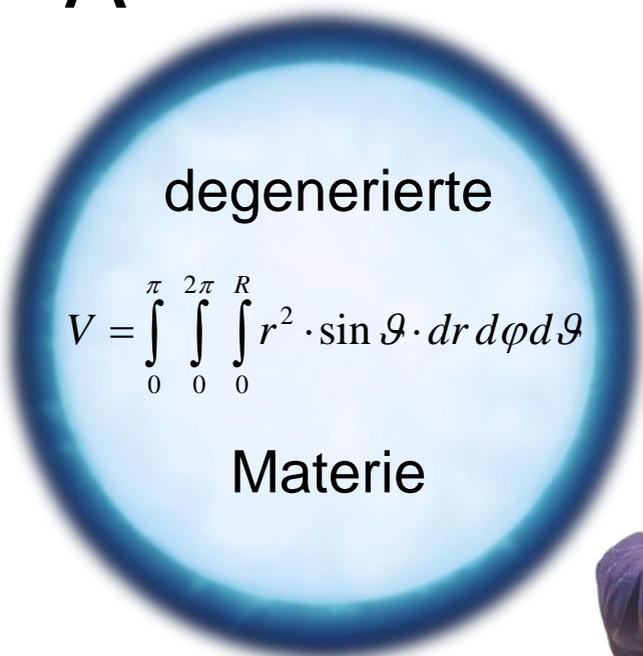
B) über $\lambda_{\text{deBroglie}}$ der beiden Elektronen!

C) über jede Phasenraumzelle mit Volumen h^3 !

SHELDON COOPER
Ch presents
FUN WITH ~~FLAGS~~ Facts



A



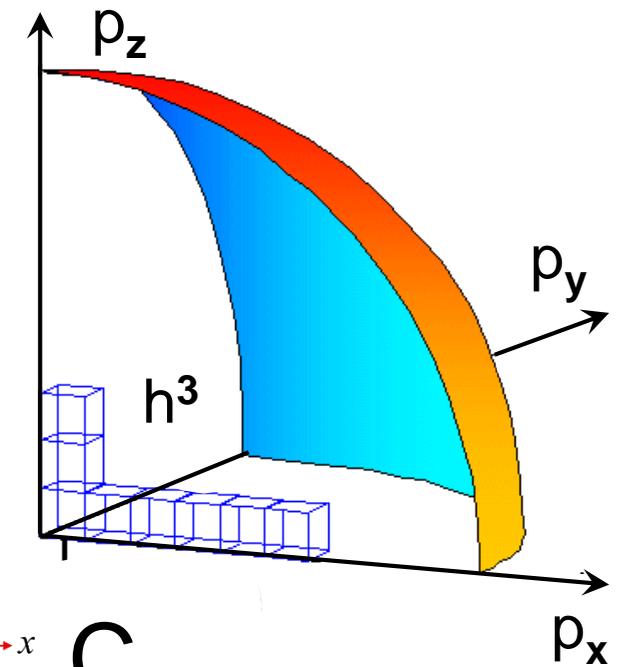
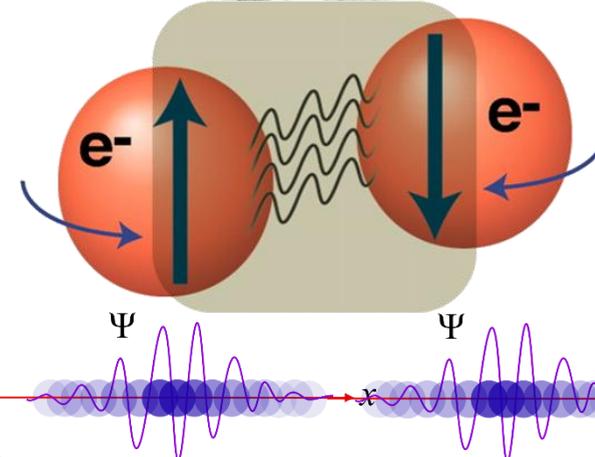
degenerierte

$$V = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \int_0^R r^2 \cdot \sin \vartheta \cdot dr d\varphi d\vartheta$$

Materie



B

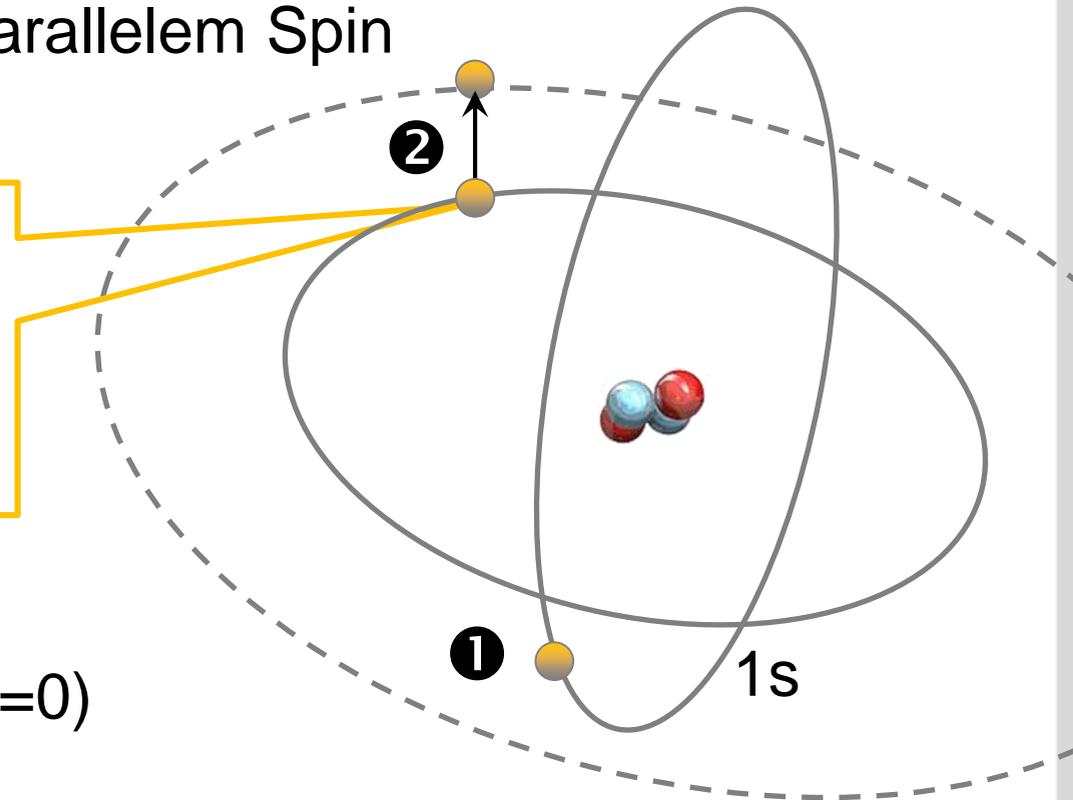
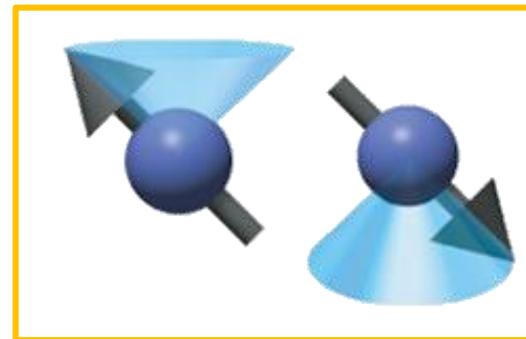
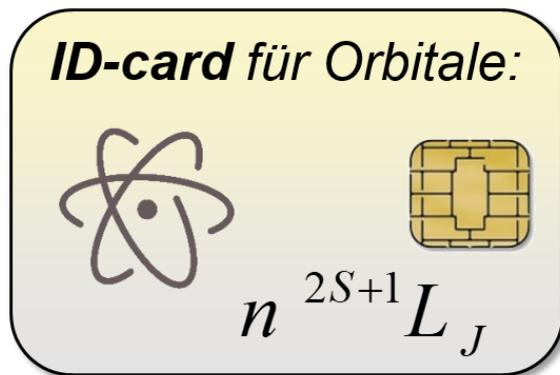


C

8.1 Helium-Atom

■ Angeregte Zustände von He: Ortho- und Parazustände

- ein Elektron (z.B. #**2**) wird in ein höheres Orbital (z.B. 2s) angeregt
⇒ Wegfall der Forderung nach antiparallelem Spin



He-4 Grundzustand:

1, 2: je 1 1S_0 ($n=1, S=0, L=0, J=0$)

genauer: $(1s^2) ^1S_0$ -

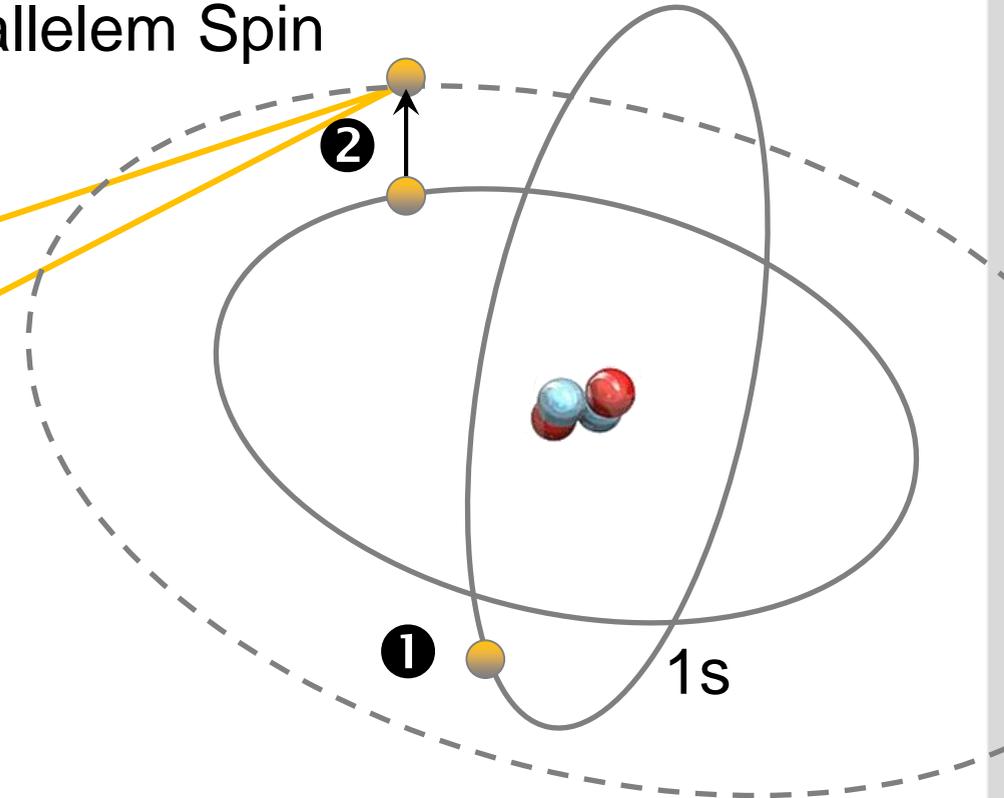
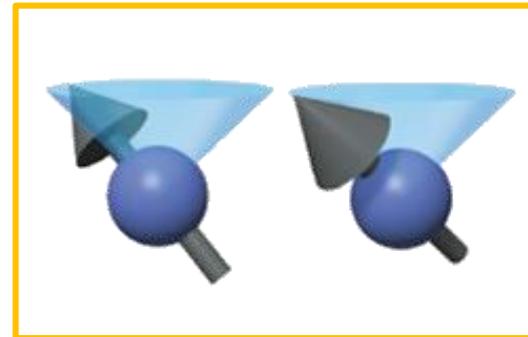
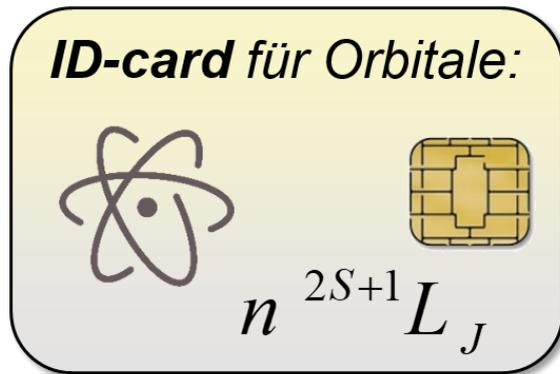
1 2 im 1s-Grundzustand sind in einem

⇒ **Para-Helium** Zustand mit $S = 0$

Orthohelium & Parahelium

■ Angeregte Zustände von He: Ortho- und Parazustände

- ein Elektron (z.B. #②) wird in ein höheres Orbital (z.B. 2s) angeregt
⇒ Wegfall der Forderung nach antiparallelem Spin



He-4 angeregter Zustand:

①, ②: 3S_1 (S=1, L=0, J=1)

genauer: (1s2s) 3S_1 -

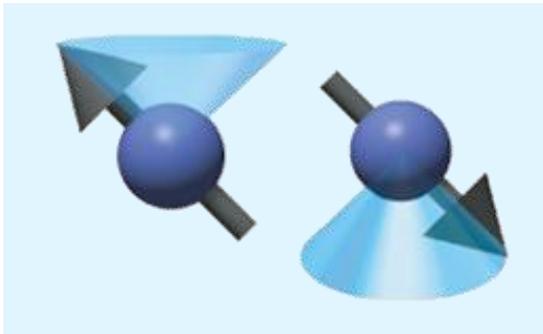
① im 1s-Grundzustand, ② im 2s-angeregten Zustand

⇒ **Ortho-Helium** Zustand mit S = 1 (Spin-Triplett)

Parahelium

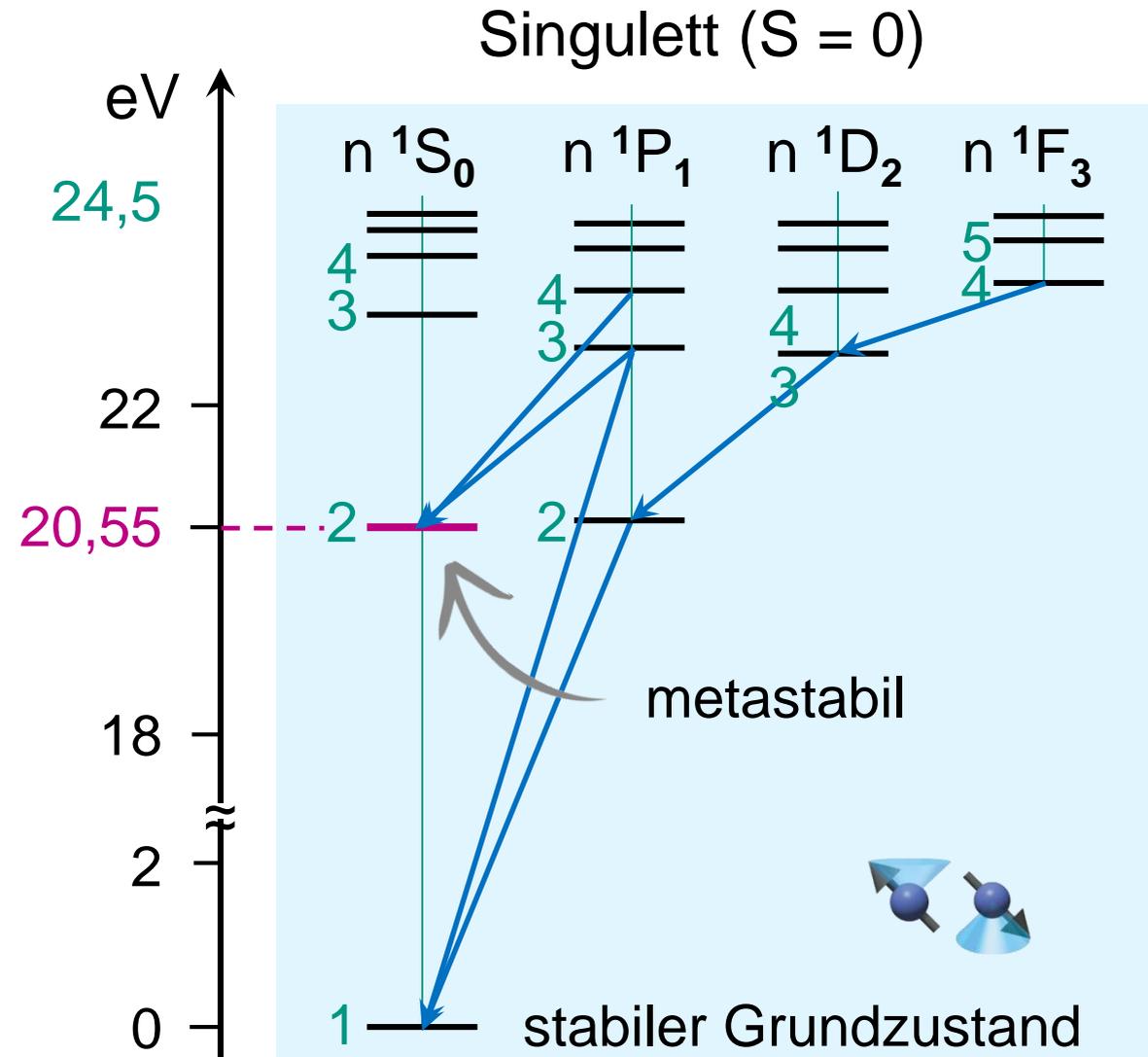
- He-Konfiguration mit **antiparallelem** Elektronspin = **Parahelium**
2s-Zustand ist metastabil

Singulett
S = 0



$$\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)$$

anti-symmetrische
Spin-Wellenfunktion

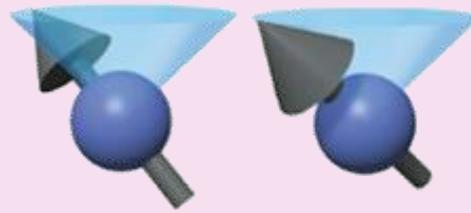


Orthohelium

- He-Konfiguration mit **parallelem** Elektronspin = **Orthohelium**

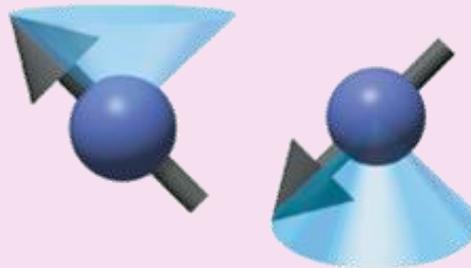
Triplett $S = 1$

$$S_z = +1$$



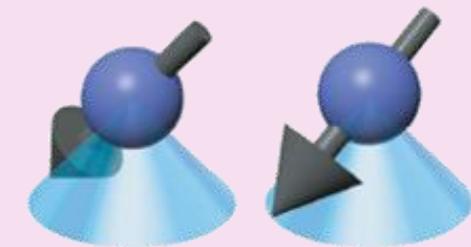
$$|\uparrow\uparrow\rangle$$

$$S_z = 0$$



$$\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle)$$

$$S_z = -1$$



$$|\downarrow\downarrow\rangle$$

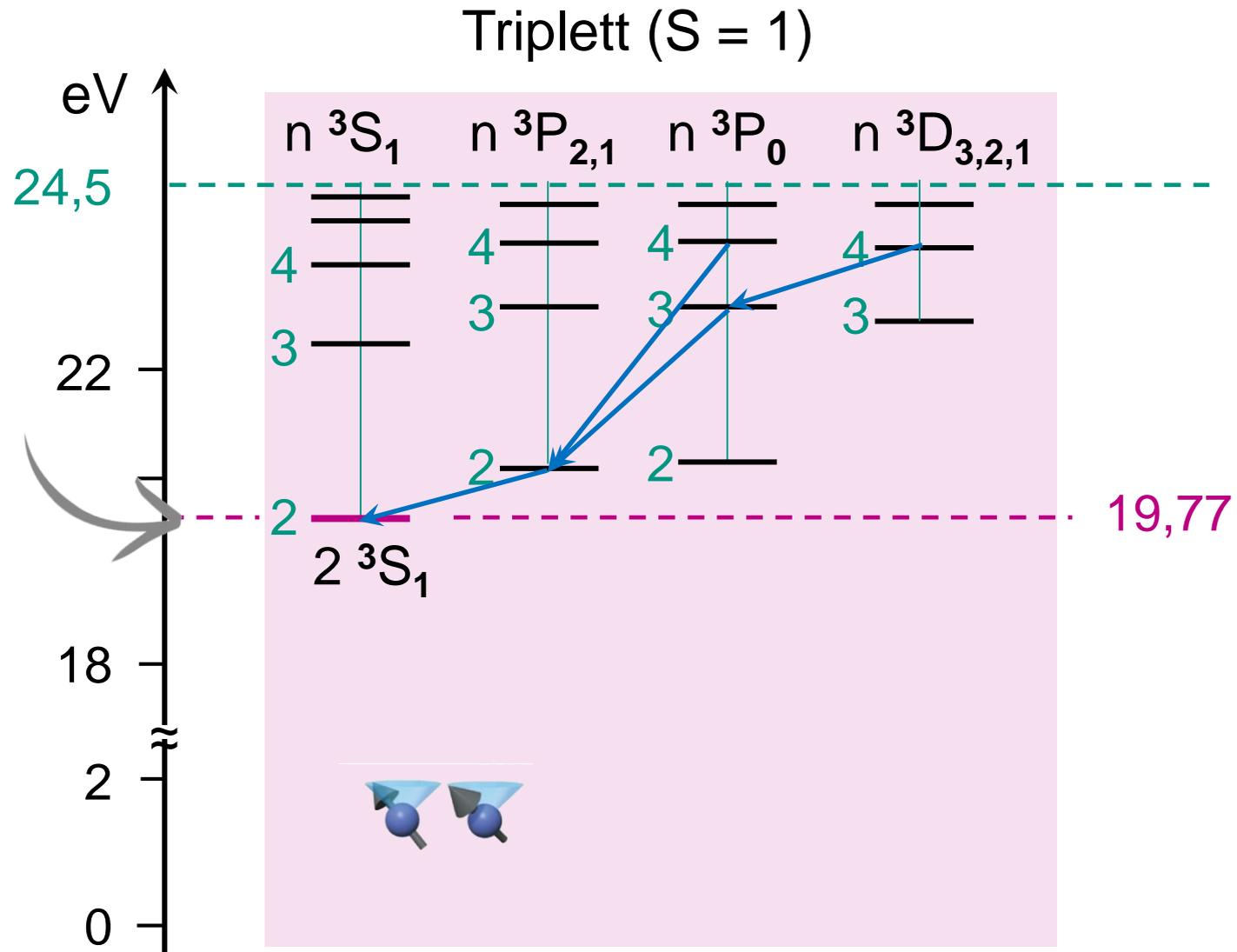
symmetrische
Spin-Wellenfunktion



Orthohelium

- He-Konfiguration mit **parallelem** Elektronspin = **Orthohelium**
 nun Spin-Bahnkopplung (Feinstruktur), 2s-Zustand ist extrem metastabil

metastabiles
 2s Niveau
 $\tau = 7870 \text{ s}$
 langlebigster
 angeregter
 Atomzustand



Orthohelium & Parahelium – $\Delta S = 0$

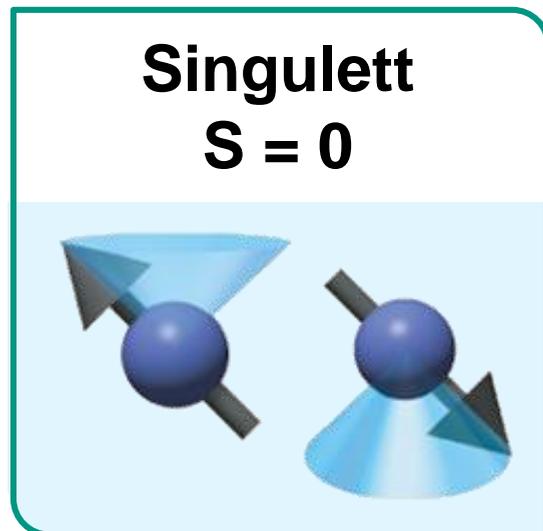
■ Interkombinationsverbot bei Atomen mit LS-Kopplung:

bei optischen Dipolübergängen in Mehrelektronensystemen leichter Atome gilt Auswahlregel für Gesamtspin S:

$$\Delta S = 0$$

- keine Spin-Umklapp-Prozesse

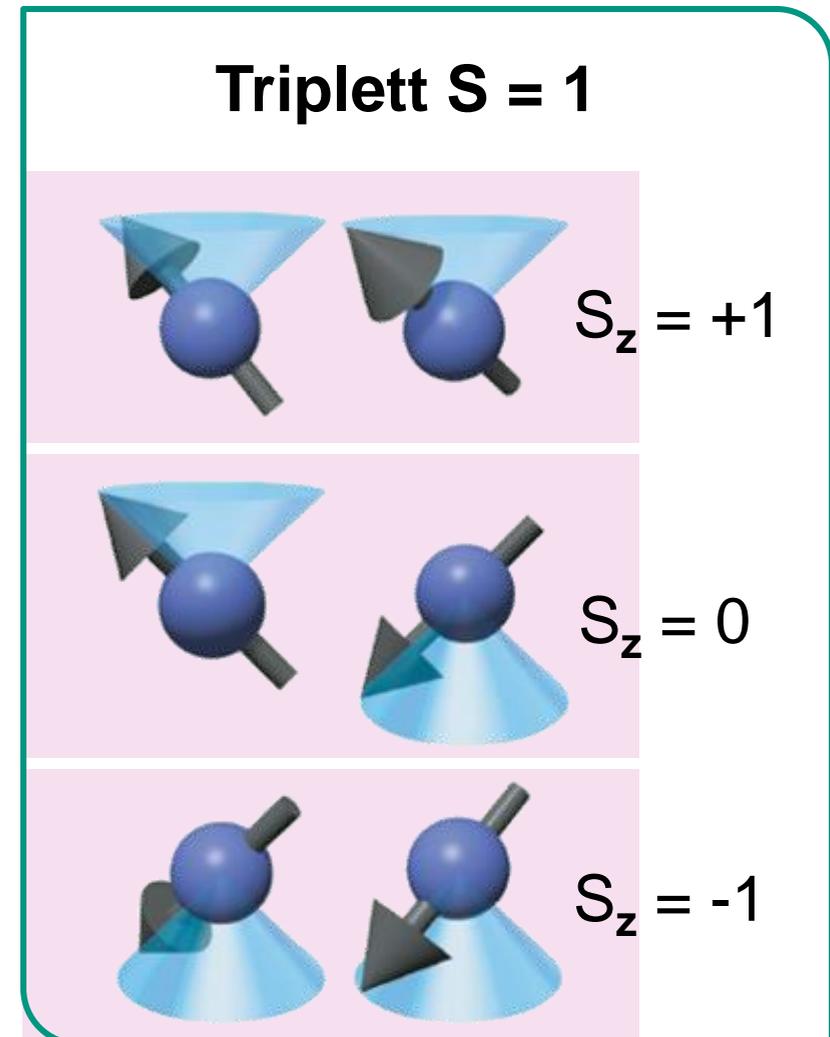
(s. Hyperfeinübergang bei H-Atom,
21 cm Linie mit $\tau = 10^7$ a)



keine
Singulett-
Triplett



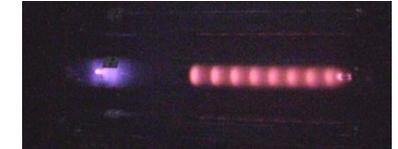
Dipol-
Übergänge



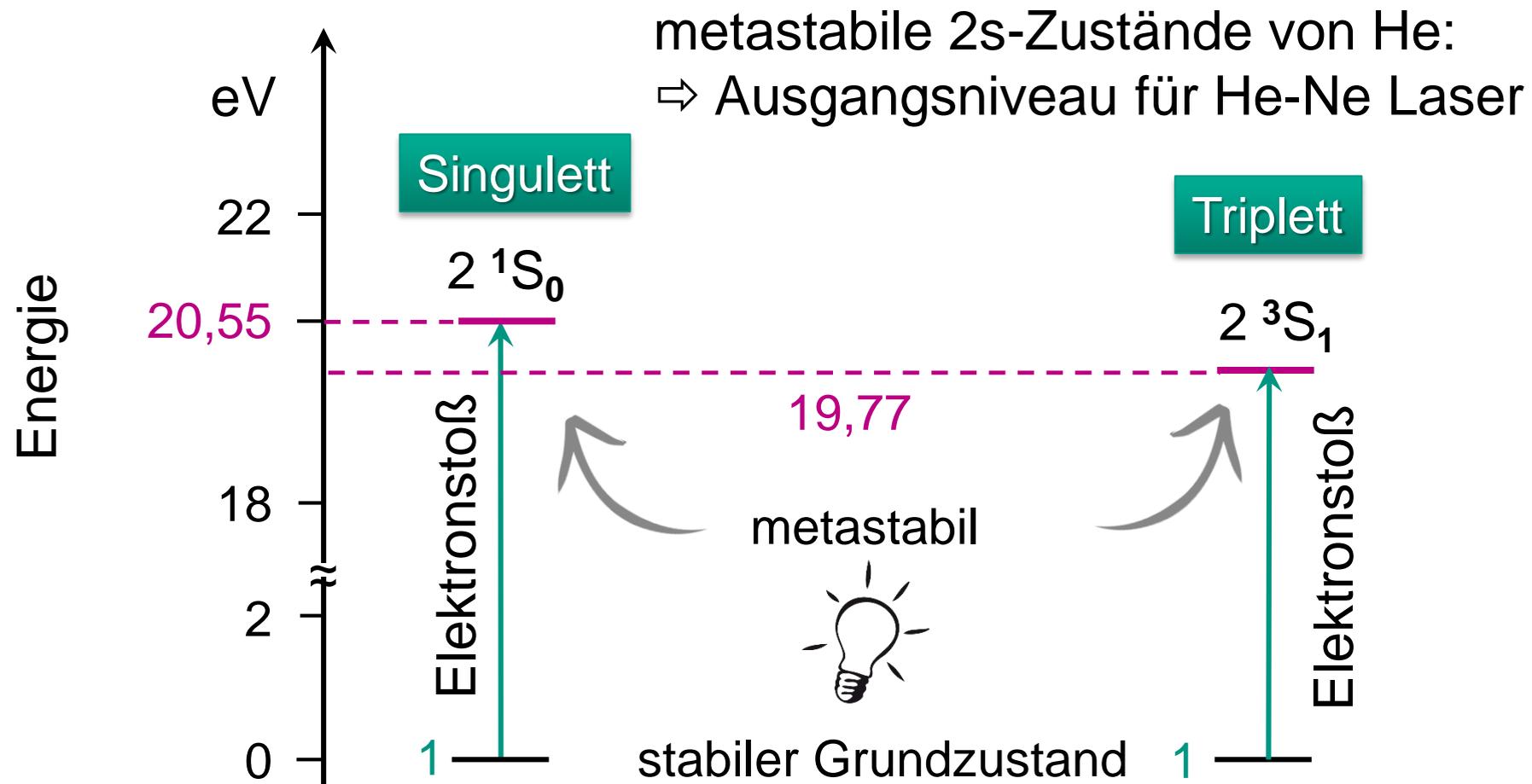
Orthohelium & Parahelium - Anwendung

■ Metastabile Zustände:

ideal für Besetzungsinversion beim **Laserprinzip!**



- Erzeugung der Zustände über **Elektronstöße** (vgl. Franck-Hertz-Versuch)



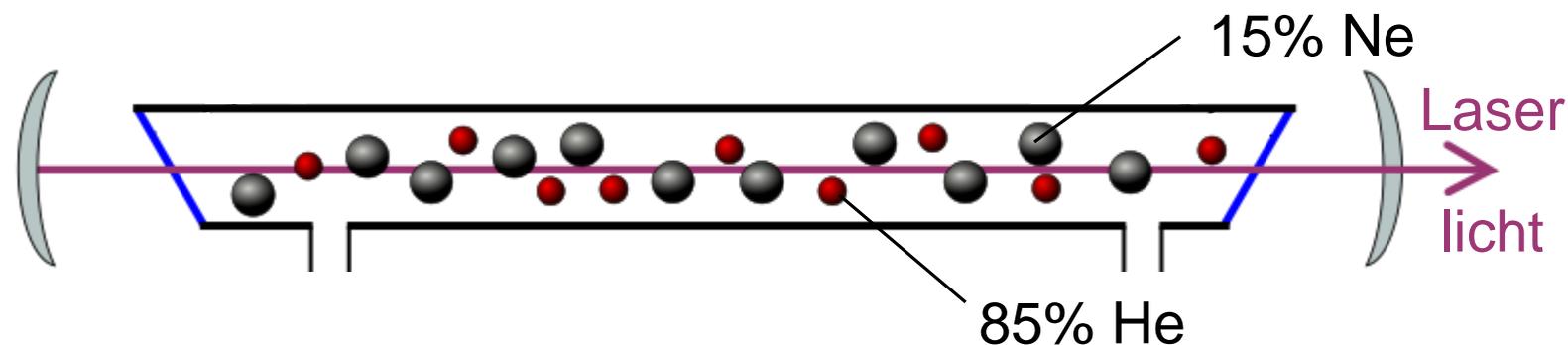
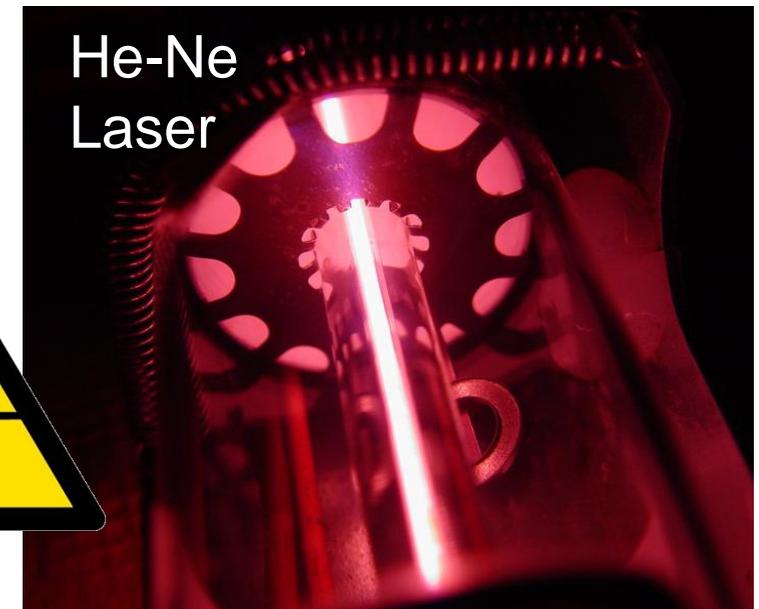
Orthohelium & Parahelium - Anwendung

■ Metastabile Zustände:

ideal für Besetzungsinversion beim **Laserprinzip!**

- Übertrag der Energie der metastabilen He-Zustände durch He-Ne Stoßprozesse auf Neon-Atome

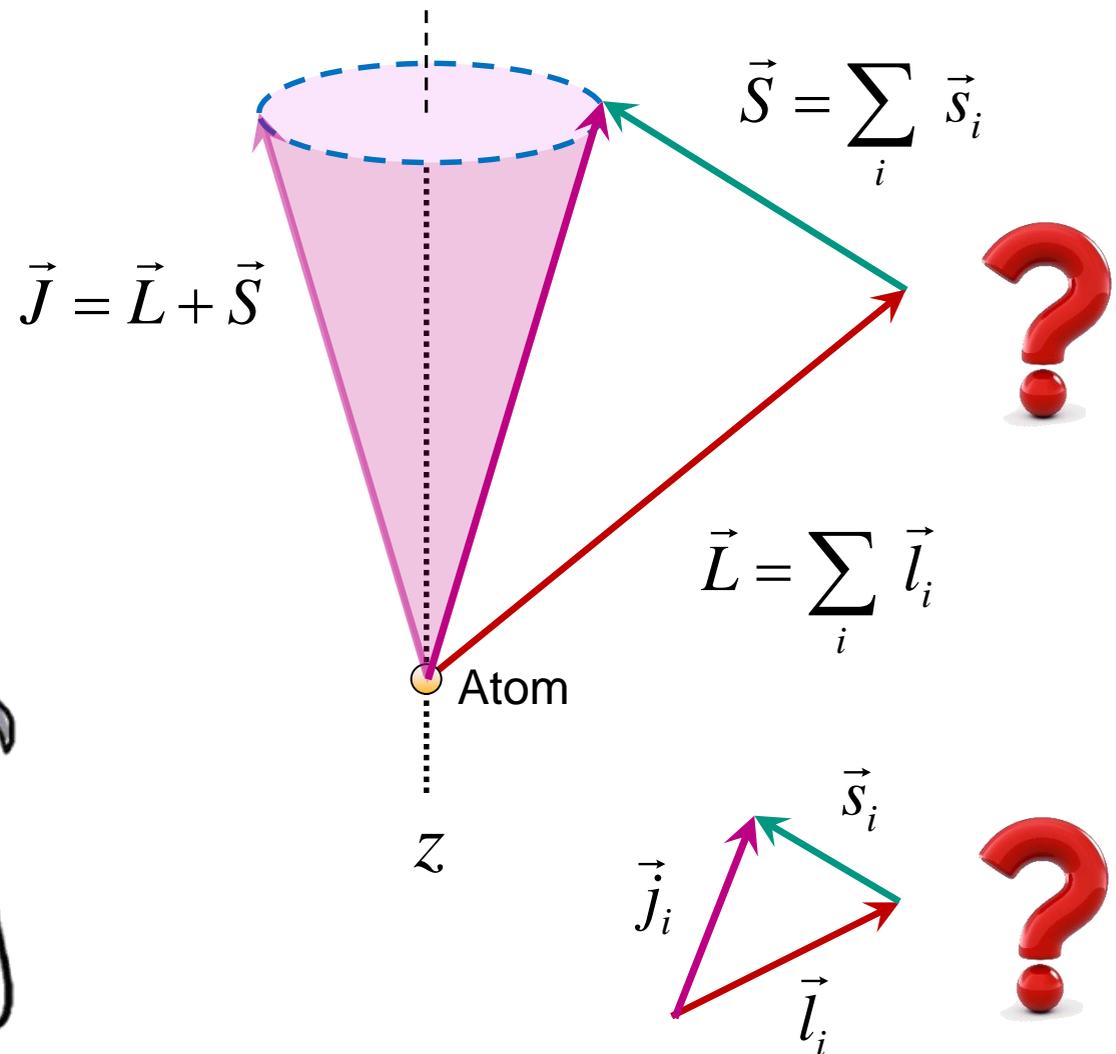
⇒ Erzeugung von angeregten Neon-Zuständen (5s und 4s)
Übergang bei $\lambda = 632,8 \text{ nm}$
(s. Kap. 9.4 Laser)



8.2 Kopplung von Drehimpulsen

■ Kopplung von Drehimpulsen in Mehrelektronen-Systemen

Hmm, wie koppeln eigentlich Drehimpulse zu J bei Atomen?



Kopplung von Drehimpulsen: LS und jj

■ Kopplung von Drehimpulsen in Mehrelektronen-Systemen



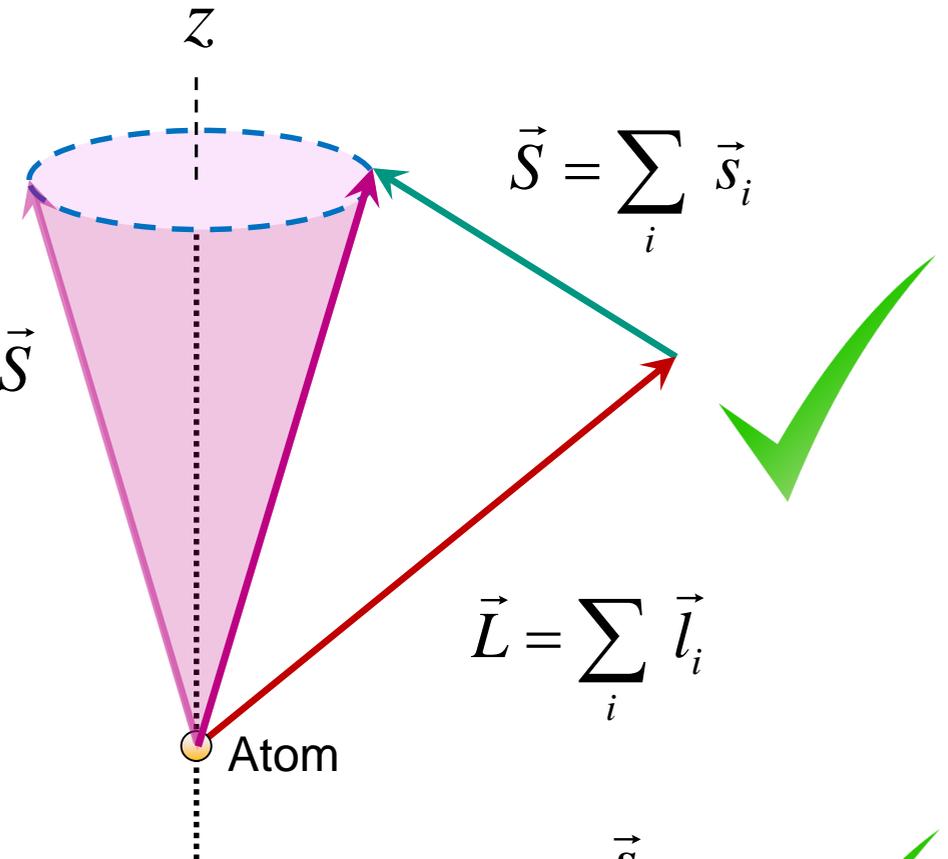
Henry Norris
Russell



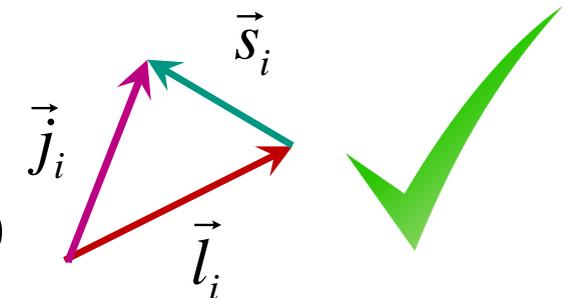
Frederick
Saunders

bei leichten
Atomen $Z < 50$

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

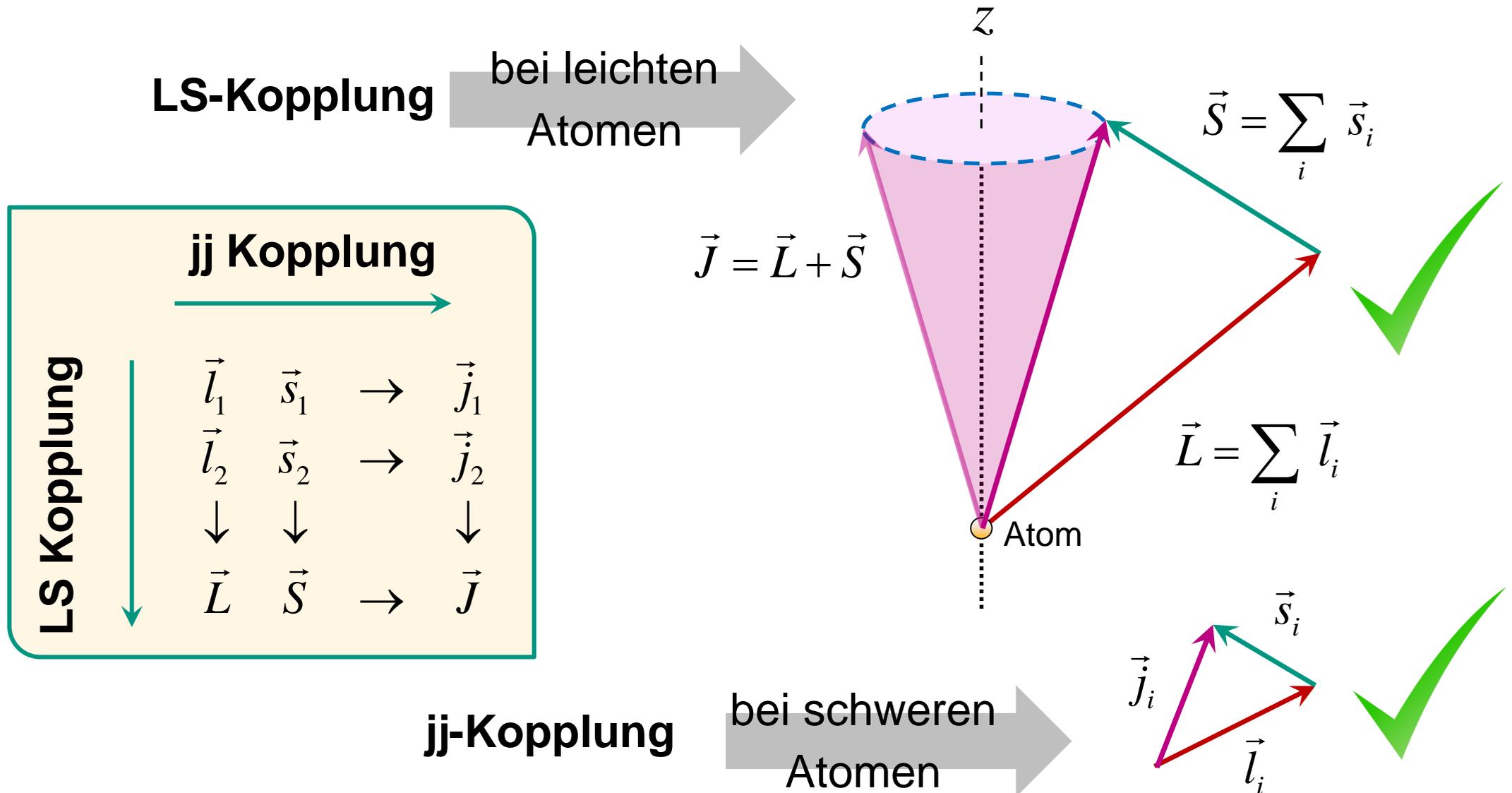


bei schweren
Atomen $Z > 50$



Kopplung von Drehimpulsen: LS und jj

■ Kopplung von Drehimpulsen in Mehrelektronen-Systemen

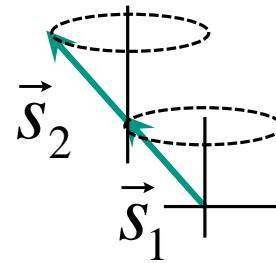


■ Russel-Saunders Kopplung in Mehrelektronen-Systemen

- **Spin-Bahn-Wechselwirkung** $\vec{s}_i \cdot \vec{l}_i$ eines einzelnen Elektrons i ist kleiner als die Kopplung der Momente $\vec{l}_i \cdot \vec{l}_j$ und $\vec{s}_i \cdot \vec{s}_j$ untereinander

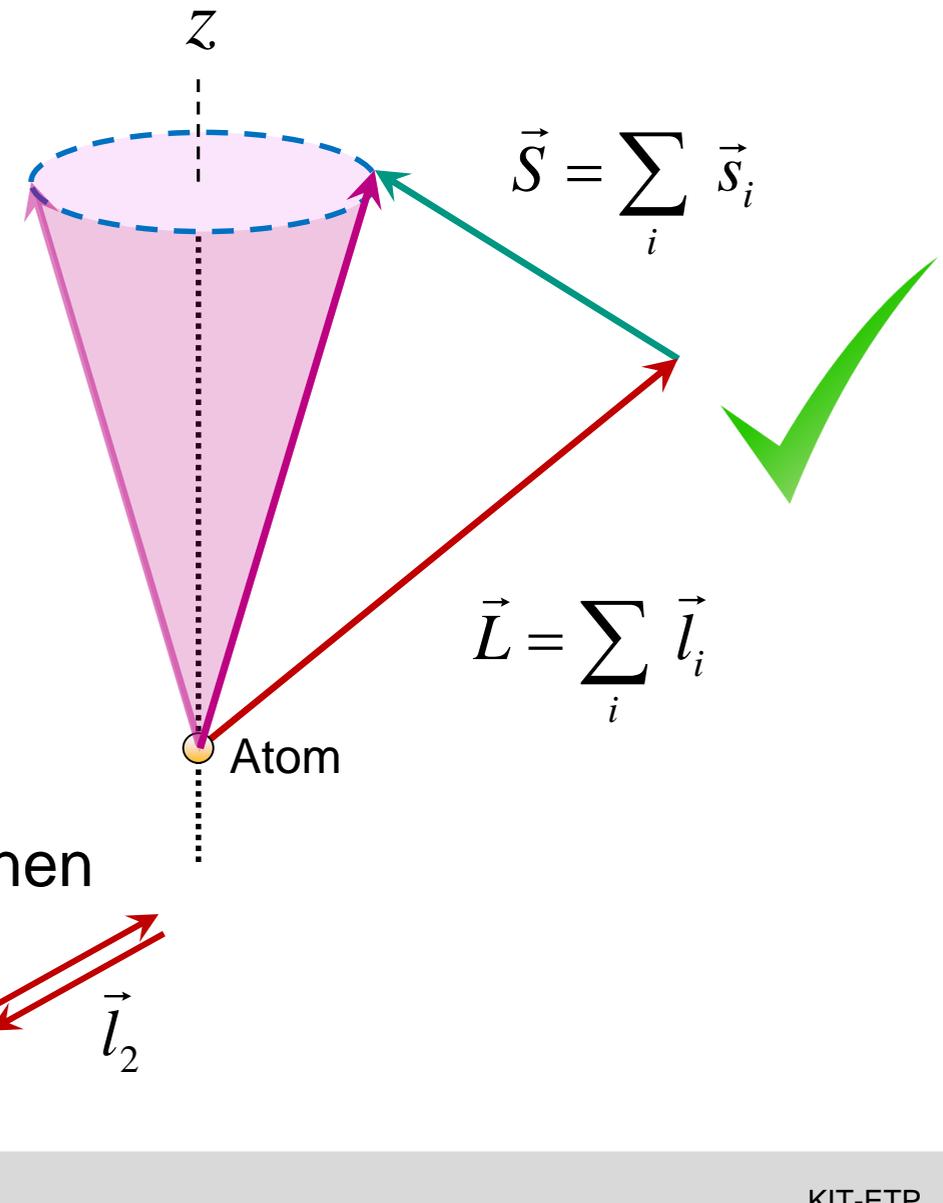
- Spins \vec{s}_i der einzelnen Elektronen koppeln zum Gesamtspin \vec{S}

$$\vec{S} = \sum_i \vec{s}_i$$



- Bahndrehimpulse \vec{l}_i der einzelnen Elektronen koppeln zum Gesamtbahndrehimpuls \vec{L}

$$\vec{L} = \sum_i \vec{l}_i$$

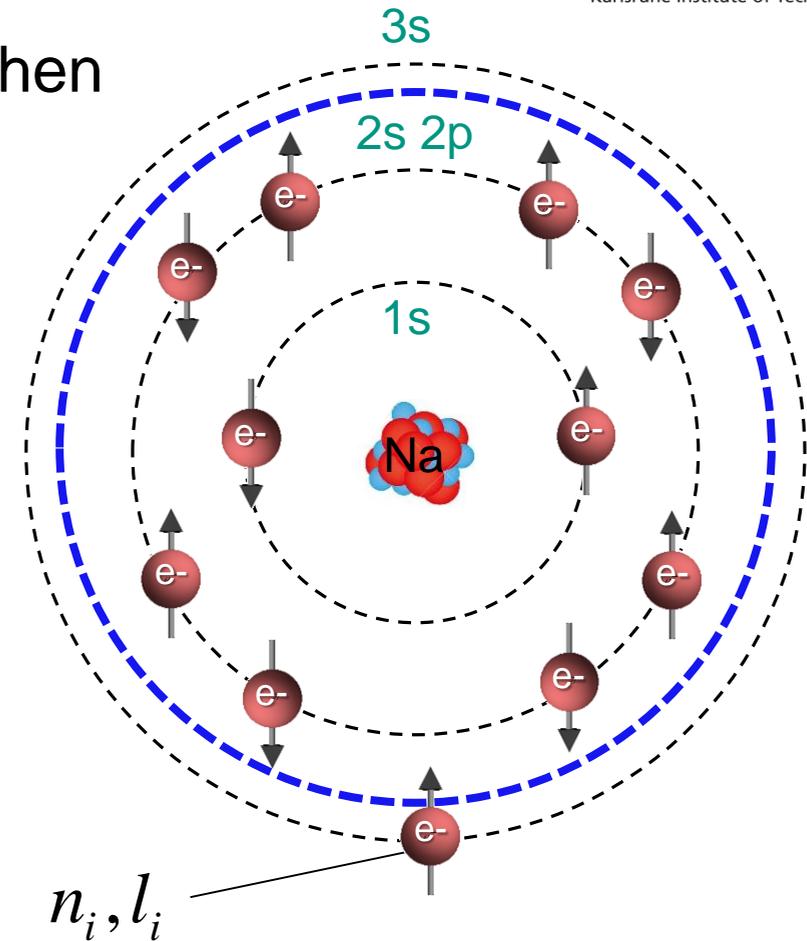


LS – Kopplung: Hundzsche Regel 1

- Bei LS-Kopplung lässt sich aus den Hundschen Regeln die Drehimpulskonfiguration des Grundzustands ableiten

1. Hundzsche Regel:

Elektronen in abgeschlossenen Schalen (1s, 2s, 2p,...) koppeln zu $J = 0$ mit $L = 0, S = 0$



Friedrich Hund



LS – Kopplung: Hundzsche Regel 2

■ LS-Kopplung: 2. Hundzsche Regel

- der **Gesamtspin S** der e- beim Auffüllen einer Schale nimmt den **maximal** möglichen Wert S_{\max} an

- die Spins der einzelnen Elektronen stehen möglichst parallel (geringere Abstoßung der e-)

- aber: Pauli-Prinzip limitiert $S_{\max} = l + \frac{1}{2}$

⇒ nachdem Schale halb gefüllt ist
($2l+1$ Werte für m_l , davon $\frac{1}{2}$) $= \frac{2l+1}{2}$
müssen Elektronen mit
anti-parallelem Spin
eingefügt werden

⇒ volle Schale koppelt zu $S = 0$



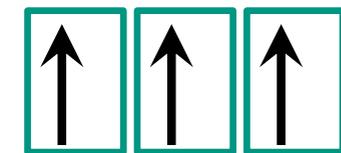
mehr Spins parallel,
da dann weniger
e-e- Abstoßung



1s



2s



2p

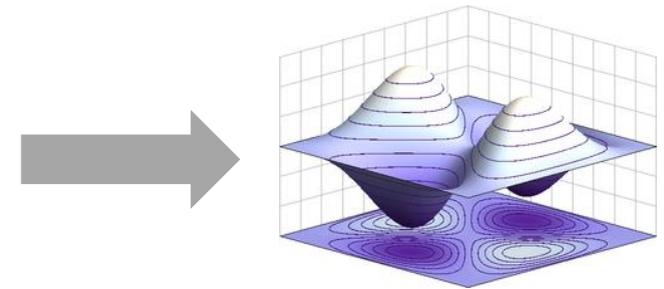
($S_{\max} = \frac{3}{2}$)

LS – Kopplung: Hundzsche Regel 2

■ LS-Kopplung: 2. Hundzsche Regel

- der **Gesamtspin S** der e- beim Auffüllen einer Schale nimmt den **maximal** möglichen Wert S_{\max} an

- Grundlage der 2. Regel:
Elektron-Wellenfunktion Ψ ist antisymmetrisch
 $\Psi = \Psi(\text{Spin } S) \cdot \Psi(\text{Bahndrehimpuls } L)$



- Elektron-Wellenfunktion Ψ eines 2p-Orbitals:
 $\Psi = \underbrace{\Psi(\text{Spin } \uparrow \uparrow \uparrow)}_{\text{symmetrisch}} \cdot \underbrace{\Psi(\text{Bahndrehimpuls } L)}_{\text{anti-symmetrisch}}$

symmetrisch

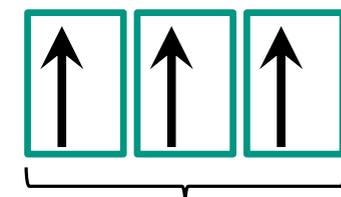
anti-symmetrisch

Elektronen
einander

↓

weit von
entfernt

kleinere Coulomb-Wechselwirkung



2p

$(S_{\max} = 3/2)$

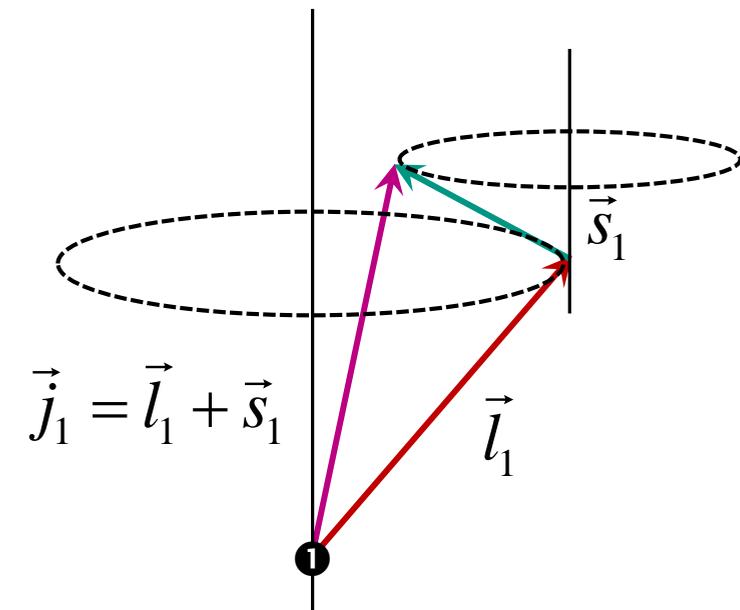
jj – Kopplung

- **jj-Kopplungsschema** realisiert bei schweren Atomen (z.B. Hg)
 - ⇒ vektorielle Addition der Gesamtdrehimpulse \vec{j}_i einzelner Elektronen zum Gesamt-Elektronendrehimpuls \vec{J}

- **Spin-Bahn-Wechselwirkung** $\vec{s}_i \cdot \vec{l}_i$
eines einzelnen Elektrons i ist
größer als die Kopplung der
Bahndrehimpuls- & Spin- Momente

$\vec{l}_i \cdot \vec{l}_j$ und $\vec{s}_i \cdot \vec{s}_j$ untereinander

- Bahndrehimpuls \vec{l}_i und Spin \vec{s}_i
eines einzelnen Elektrons i
koppeln zum Gesamtdrehimpuls \vec{j}_i



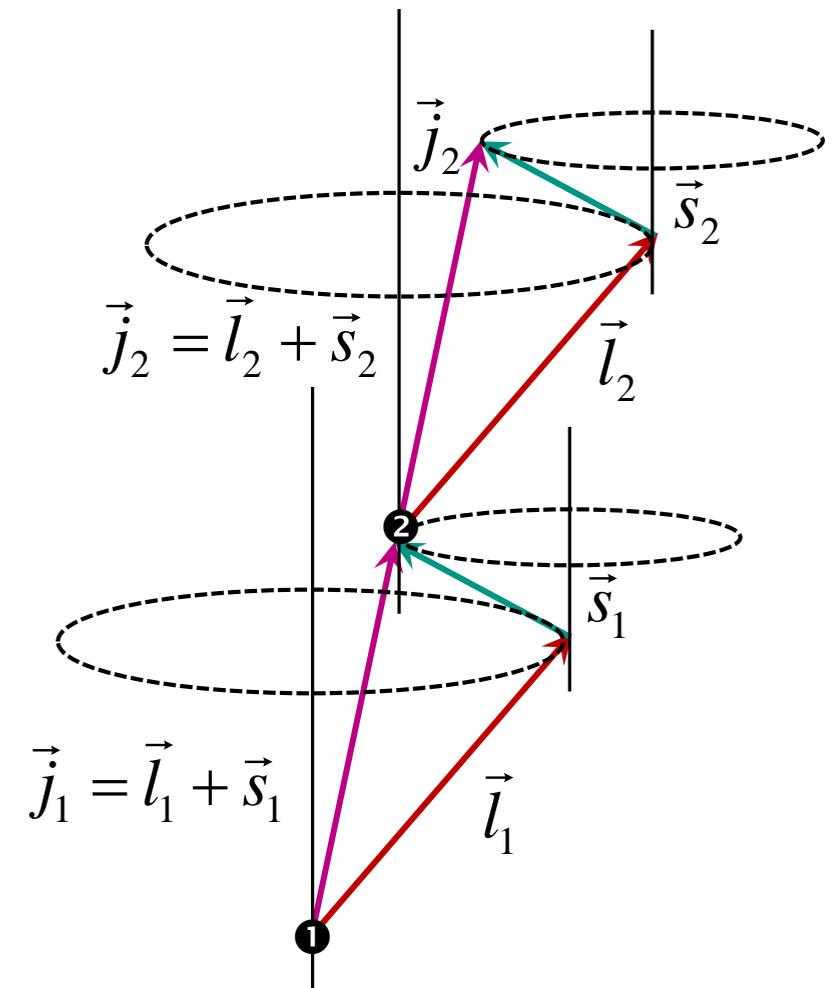
jj – Kopplung

- **jj-Kopplungsschema** realisiert bei schweren Atomen (z.B. Hg)
 - ⇒ vektorielle Addition der Gesamtdrehimpulse \vec{j}_i einzelner Elektronen zum Gesamt-Elektronendrehimpuls \vec{J}

- die Gesamtdrehimpulse \vec{j}_i der einzelnen Elektronen i koppeln zum Gesamtdrehimpuls \vec{J} der Hülle

$$\vec{J} = \sum_{i=1}^N \vec{j}_i$$

- bei mittelschweren Atomen beobachtet man Übergänge zwischen LS- und jj-Kopplung

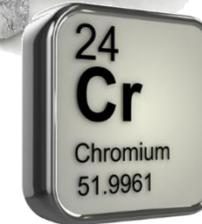
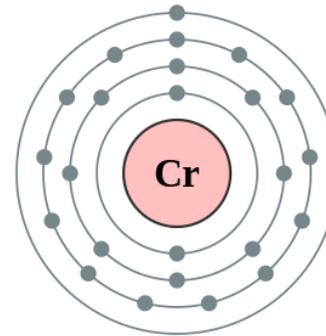


Fun with Facts – Konfiguration von Cr

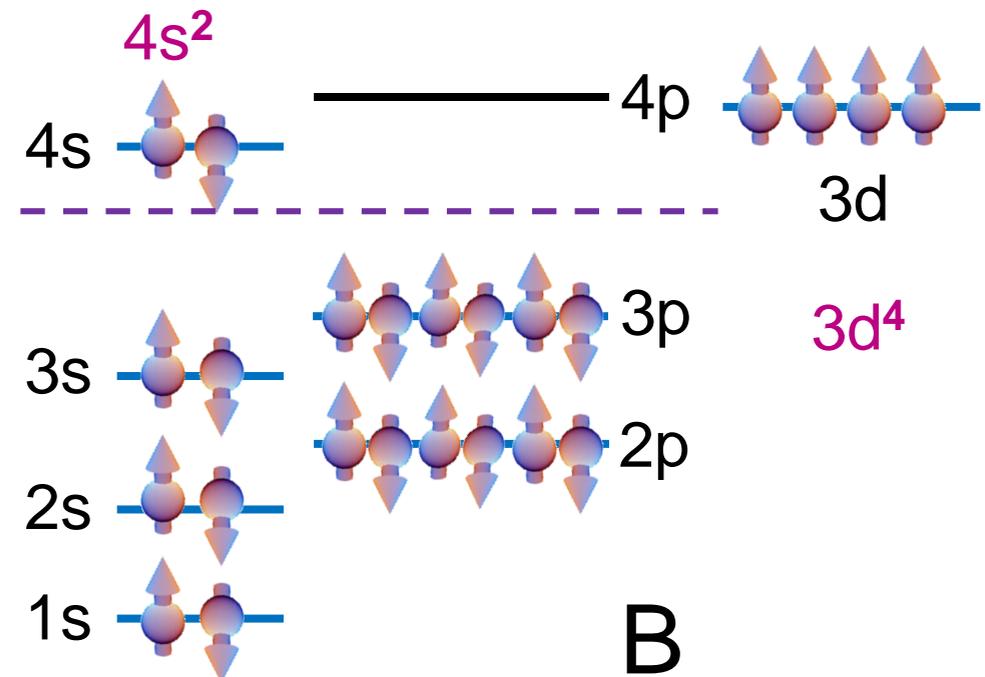
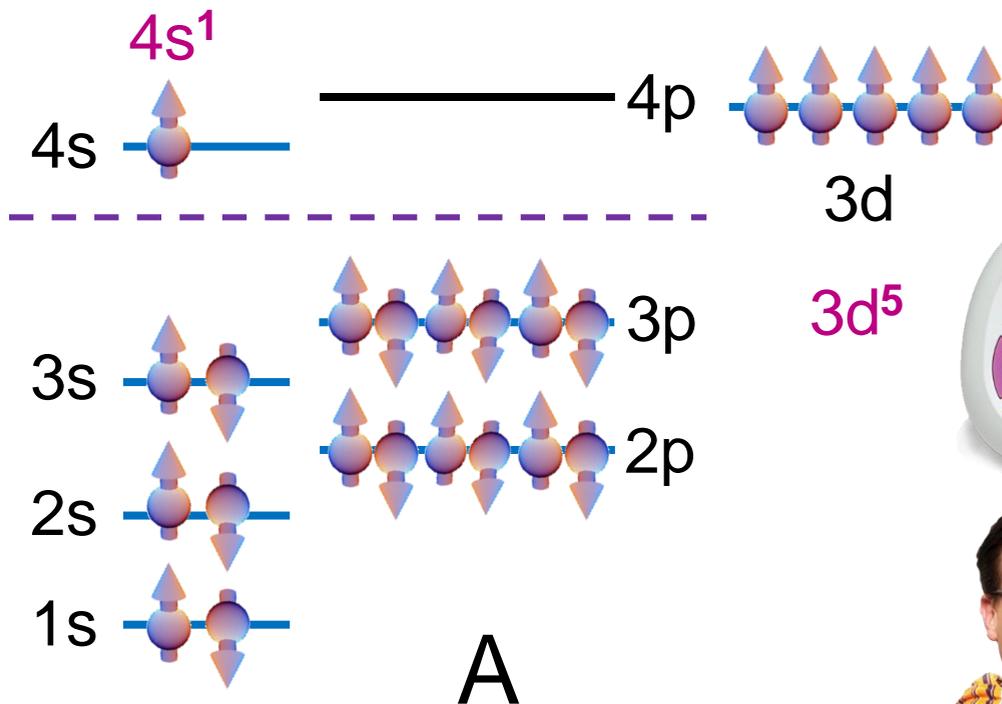
■ Welche Schalen-Konfiguration hat Chrom ?

A) die Konfiguration [Ar] $3d^5 4s^1$

B) die Konfiguration [Ar] $3d^4 4s^2$



SHELDON COOPER
Ch presents
FUN WITH ~~FACTS~~
 Facts

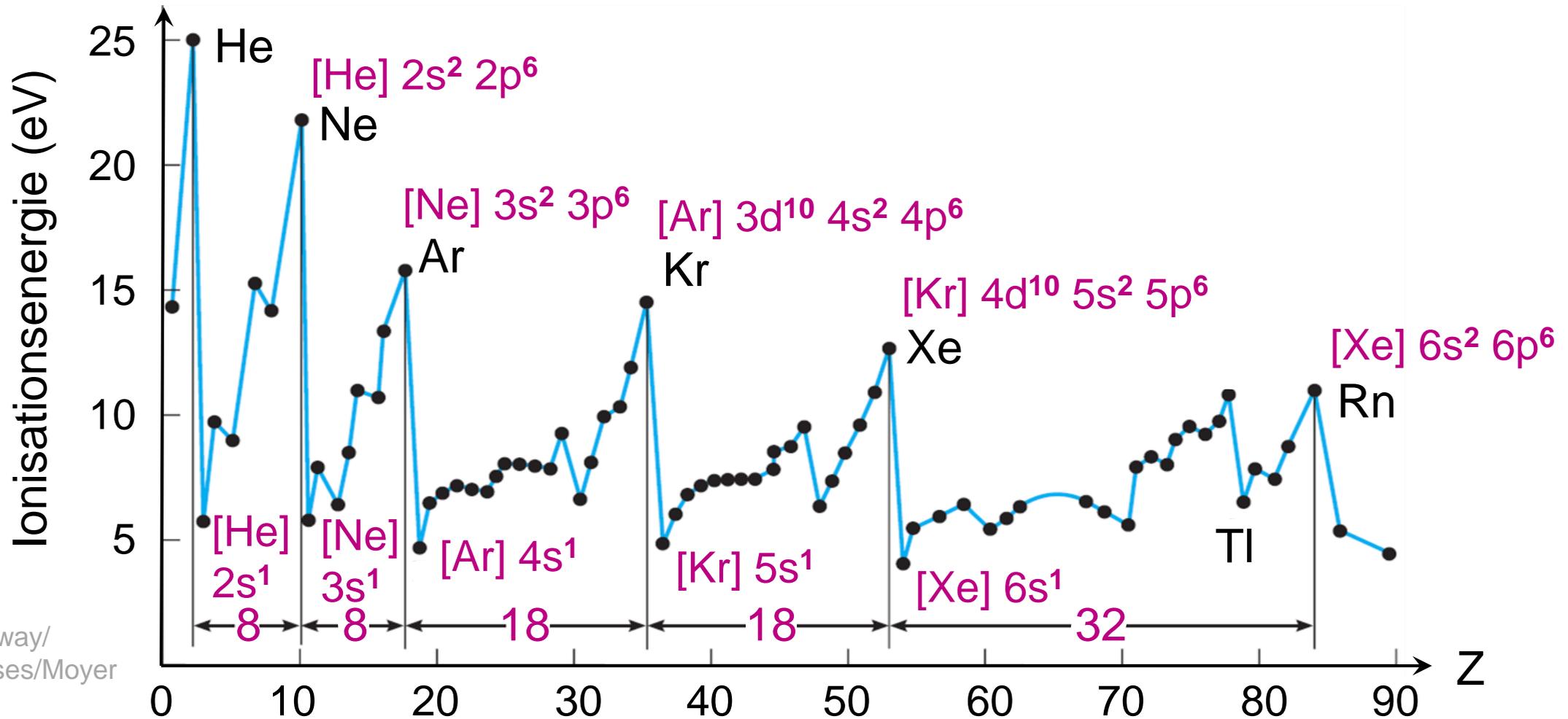


A

B

8.3 Periodensystem & Schalenstruktur

- Konzept der **Schalenstruktur der Atomhülle**
basiert auf experimentellen Daten & theoretischen Konzepten
 - Edelgase: abgeschlossene Schalen/Sub-Schalen



Q: Serway/
Moses/Moyer

Periodensystem & Schalenstruktur

■ Konzept der **Schalenstruktur der Atomhülle**

- spektroskopische Untersuchungen (s. Kap. 4.1)

- **Pauli-Prinzip für Orbital n**

- Hauptquantenzahl n :

⇒ n Werte für l

- Drehimpulsquantenzahl l

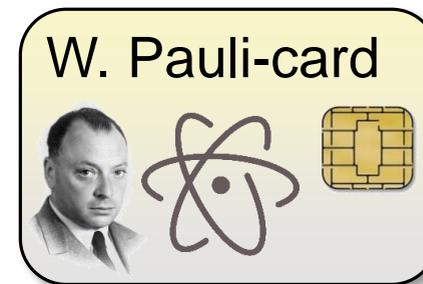
⇒ $2l+1$ Werte für magnet. Zahl m_l

- Spinquantenzahl s

⇒ **2** Werte

- **Maximalzahl an e-** in Schale n :

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



n	l	Subshell	Capacity $2(2l+1)$
1	0	1s	2
2	0	2s	2
2	1	2p	6
3	0	3s	2
3	1	3p	6
4	0	4s	2
3	2	3d	10
4	1	4p	6
5	0	5s	2
4	2	4d	10
5	1	5p	6
6	0	6s	2
4	3	4f	14
5	2	5d	10
6	1	6p	6
7	0	7s	2
5	3	5f	14
6	2	6d	10

Schalenstruktur - Elektronenkonfiguration

Atom	1s	2s	2p			Elektronenkonfiguration
Li	$\uparrow\downarrow$	\uparrow				$1s^2 2s^1$
Be	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$				$1s^2 2s^2$
B	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	\uparrow			$1s^2 2s^2 2p^1$
C	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	\uparrow	\uparrow		$1s^2 2s^2 2p^2$
N	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	\uparrow	\uparrow	\uparrow	$1s^2 2s^2 2p^3$
O	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	\uparrow	\uparrow	$1s^2 2s^2 2p^4$
F	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	\uparrow	$1s^2 2s^2 2p^5$
Ne	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$1s^2 2s^2 2p^6$



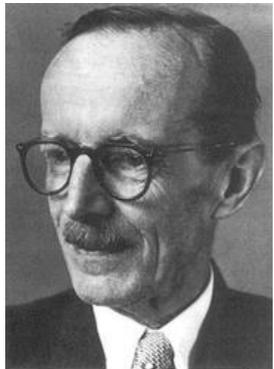
Q: Serway/
Moses/Moyer

Schalenstruktur – Madelung Schema

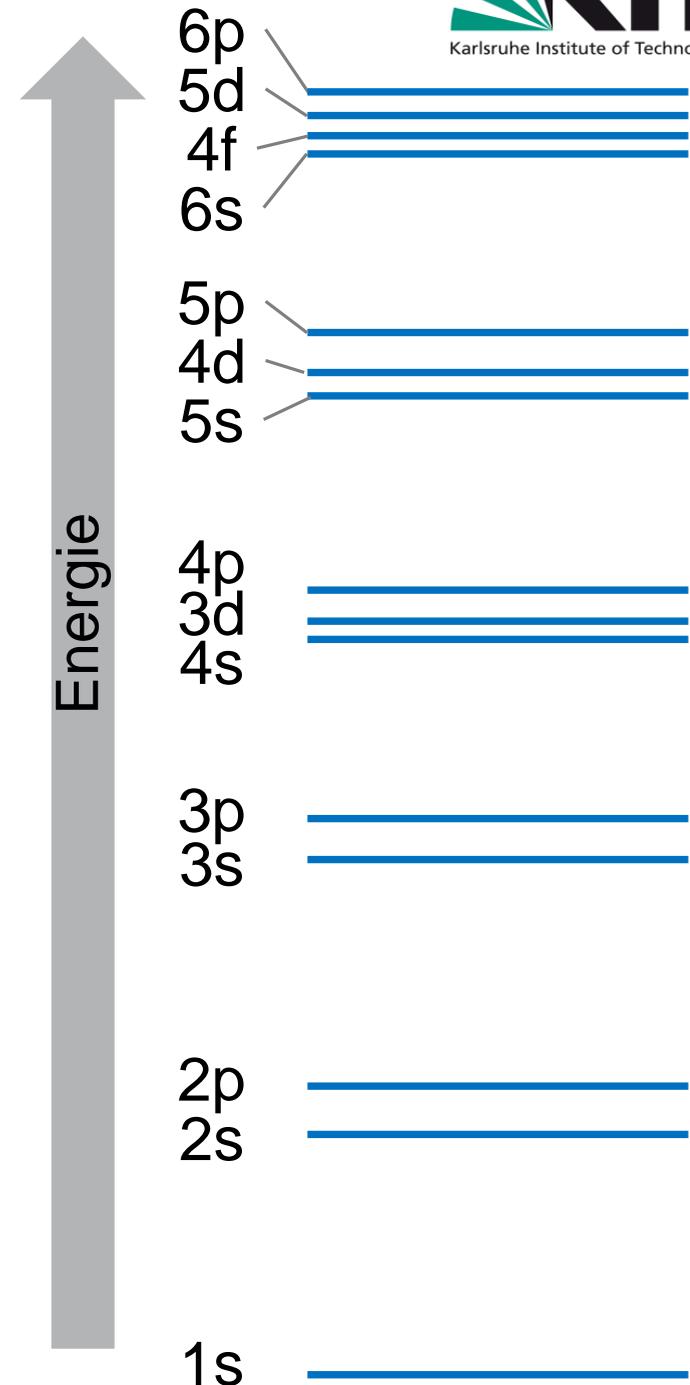
■ **Aufbauprinzip:** Auffüllung von Schalen und Unterschalen nach dem **Madelung-Energieschema**

- Orbitale mit kleinerem $(n+l)$ Wert werden vor Orbitalen mit größerem Wert gefüllt
- falls $(n+l)$ Wert identisch, zuerst **kleineres n**

$1s \Rightarrow 2s \Rightarrow 2p \Rightarrow 3s \Rightarrow$
 $3p \Rightarrow 4s \Rightarrow 3d \Rightarrow 4p \Rightarrow$
 $5s \Rightarrow 4d \Rightarrow 5p \Rightarrow 6s \Rightarrow$
 $4f \Rightarrow 5d \Rightarrow 6p \Rightarrow 7s \Rightarrow$
 $5f \Rightarrow 6d \Rightarrow 7p$



Erwin Madelung



Periodensystem

Gruppe →

Halogene ↑ 18

Edelgase ↑

Periode ↓

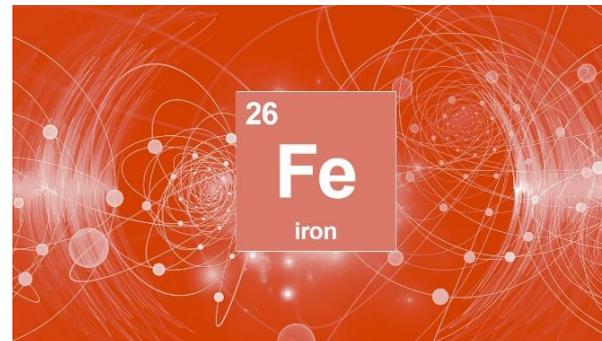
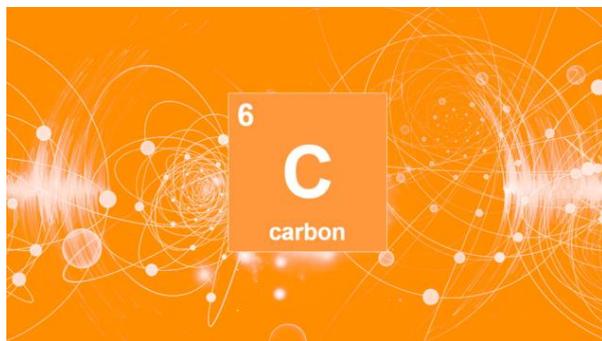
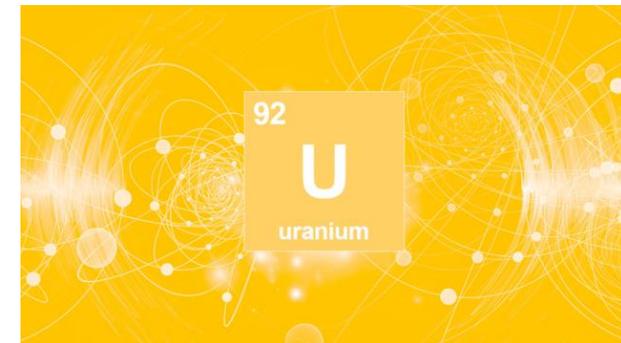
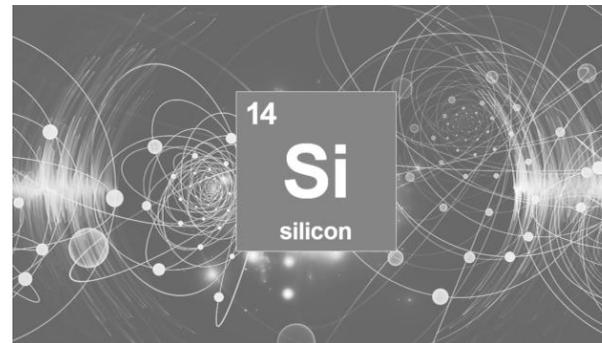
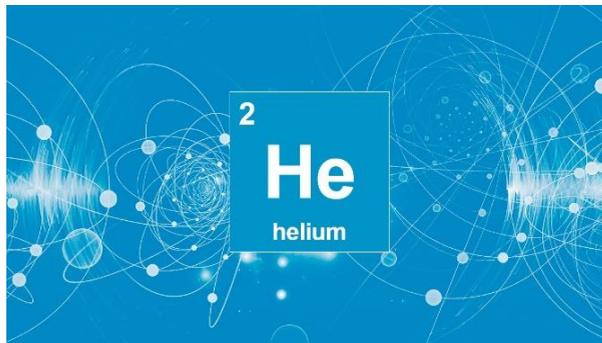
1	2											13	14	15	16	17	18
1 H Wasserstoff																	2 He Helium
2 Li Lithium	4 Be Beryllium											5 B Bor	6 C Kohlenstoff	7 N Stickstoff	8 O Sauerstoff	9 F Fluor	10 Ne Neon
3 Na Natrium	12 Mg Magnesium	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphor	16 S Schwefel	17 Cl Chlor	18 Ar Argon
4 K Kalium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titan	23 V Vanadium	24 Cr Chrom	25 Mn Mangan	26 Fe Eisen	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Kupfer	30 Zn Zink	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsen	34 Se Selen	35 Br Brom	36 Kr Krypton
5 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirkonium	41 Nb Niob	42 Mo Molybdän	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silber	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Zinn	51 Sb Antimon	52 Te Tellur	53 I Iod	54 Xe Xenon
6 Cs Caesium	56 Ba Barium	57 La [*] Lanthan	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantal	74 W Wolfram	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platin	79 Au Gold	80 Hg Quecksilber	81 Tl Thallium	82 Pb Blei	83 Bi Bismut	84 Po Polonium	85 At Astat	86 Rn Radon
7 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac ^{**} Actinium	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Uut Ununtrium	114 Fl Flerovium	115 Uup Ununpentium	116 Lv Livermorium	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium
Lanthanoide		* 58 Ce Cer	59 Pr Praseodym	60 Nd Neodym	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium	unbekannt	
Actinoide		** 90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uran	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium		

Fun with Facts – *battle of the elements*

■ Welches Element halte ich für das Wichtigste ?

- A) Helium
- B) Kohlenstoff
- C) Silizium
- D) Eisen
- E) Uran
- F) Technetium

SHELDON COOPER
presents
FUN WITH ~~FACTS~~
Facts



Q: physicsworld.com

Periodensystem der Atome 2019

