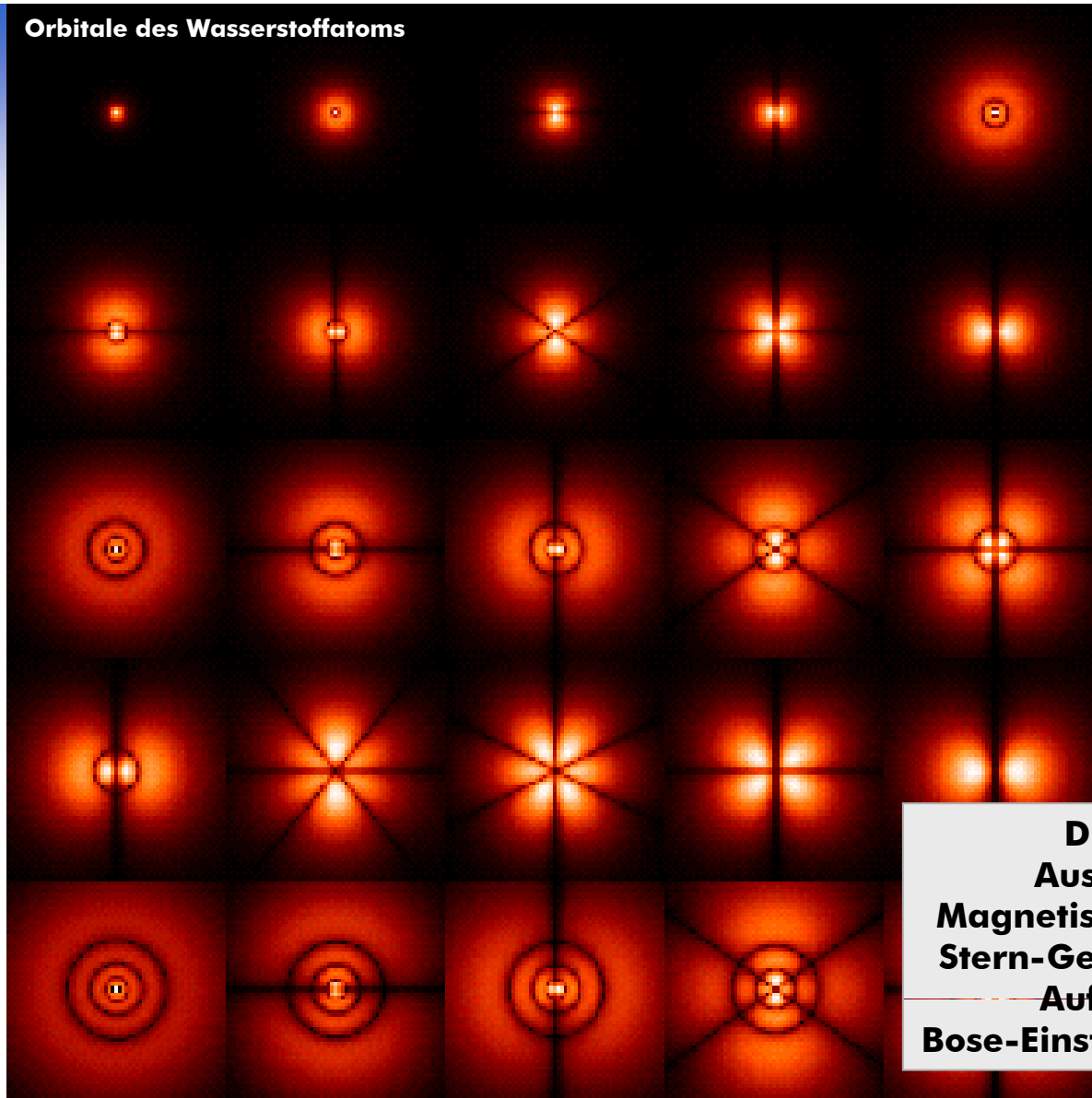


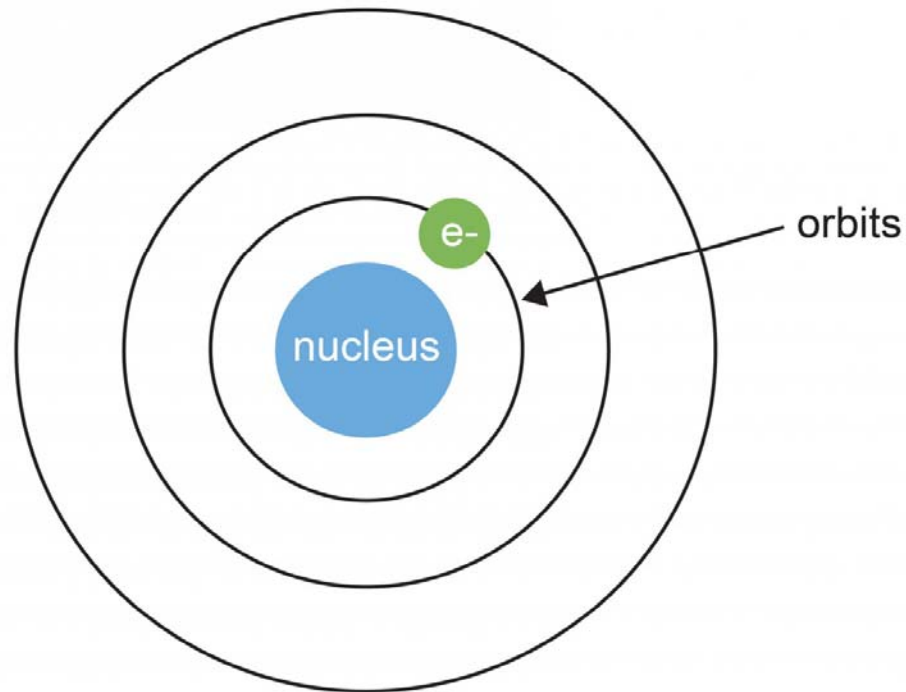
Orbitale des Wasserstoffatoms



Drehimpuls
Auswahlregeln
Magnetische Quantenzahl
Stern-Gerlach Experiment
Aufbauprinzip
Bose-Einstein Kondensation

Beyond Bohr

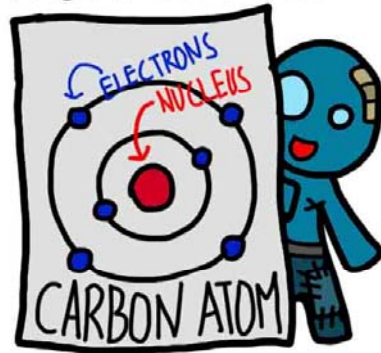
Bohrsches Atommodell FÜR und wieder



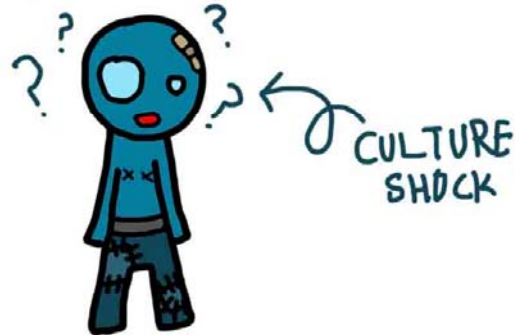
Diagnose

- **Bohrsches Atommodell bricht mit den Vorstellungen der klassischen Physik**
strahlungsfreie Beschleunigung einer Ladung
nur bestimmte Kreisbahnen sind erlaubt
- **grundsätzlich resultieren Lichtemission und Absorption durch Energieänderung eines Elektrons**
- **Herleitung des Spektrums von Wasserstoff und wasserstoffähnlicher Ionen**
- **Rydbergkonstante wird auf Naturkonstanten zurückgeführt**
- **Ionisierungsenergie lässt sich mit Modell berechnen**
- **Größenordnung des Durchmessers vom Wasserstoffatom wird richtig wiedergegeben**

DRAW AN ATOM FOR ME.



ACCORDING TO THE QUANTUM MECHANICAL
MODEL... YOU'RE WRONG.



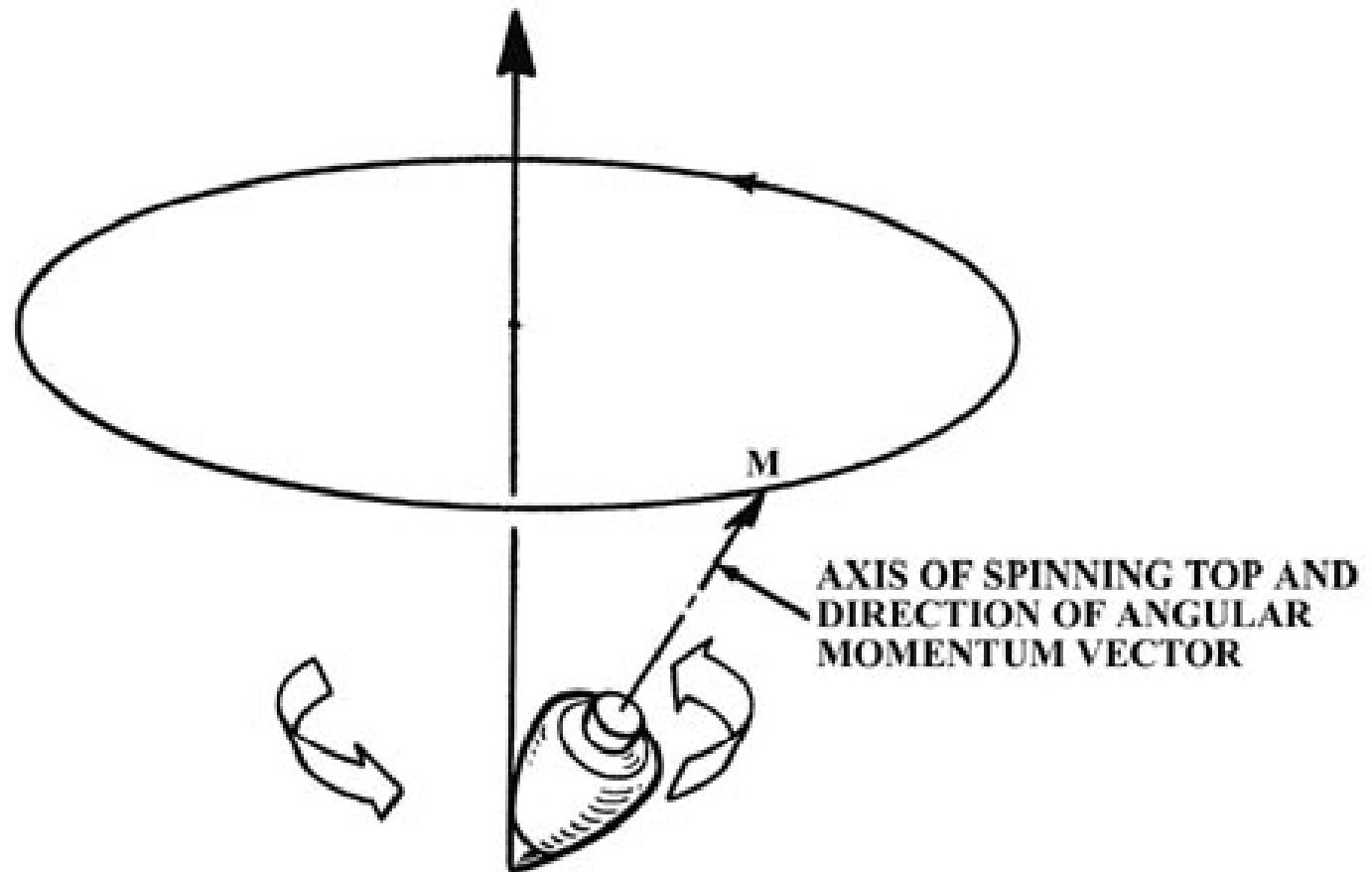
Bohrsches Atommodell für und WIEDER

Diagnose

- keine Erklärung, warum sich Elektron strahlungsfrei und nur auf bestimmten Bahnen bewegt
- Spektren von Atomen mit mehr als einem äußeren Elektron können nicht berechnet werden
- keine Vorhersage für Intensitäten der einzelnen Linien eines Spektrums
damit keine Erklärung für verschiedene Übergangswahrscheinlichkeiten
- räumliche Ausdehnung der Kreisbahnen wird nicht geklärt
Atom hätte Form einer dünnen Kreisscheibe
- Bohrs Analyse steht im Widerspruch zur Heisenbergschen Unschärferelation
*Radius, Geschwindigkeit, Lebensdauer, Energieabgabe
können nicht gleichzeitig genau bestimmt werden*

Thema Beyond Bohr

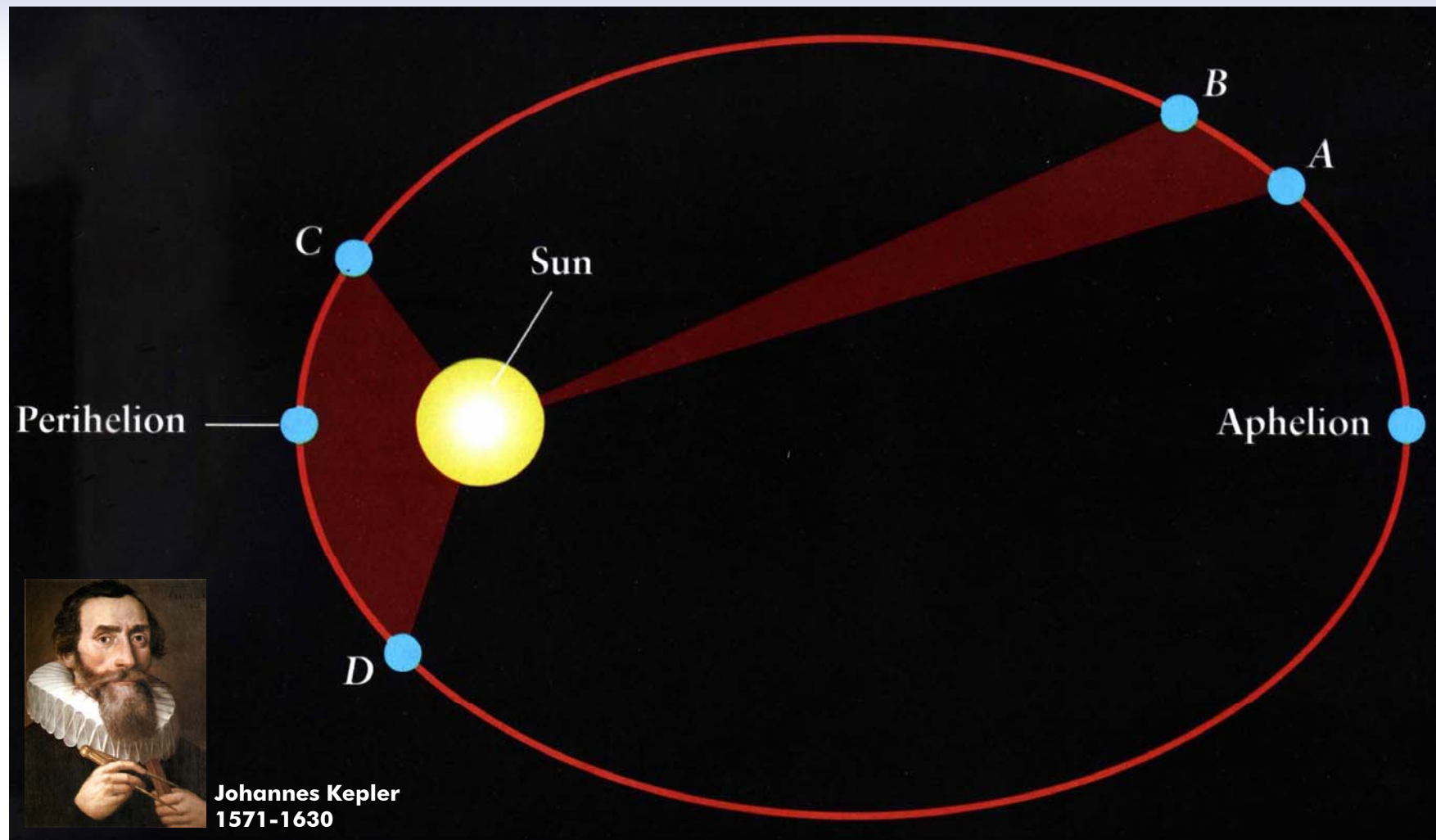
Drehimpuls-Quantisierung





Gravitation

Keplersche Gesetze



Johannes Kepler
1571-1630

Diagnose

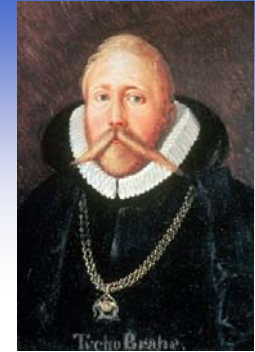
Kepler 1: Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne im Brennpunkt

Kepler 2: Verbindungslinie von Planet zu Sonne überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen

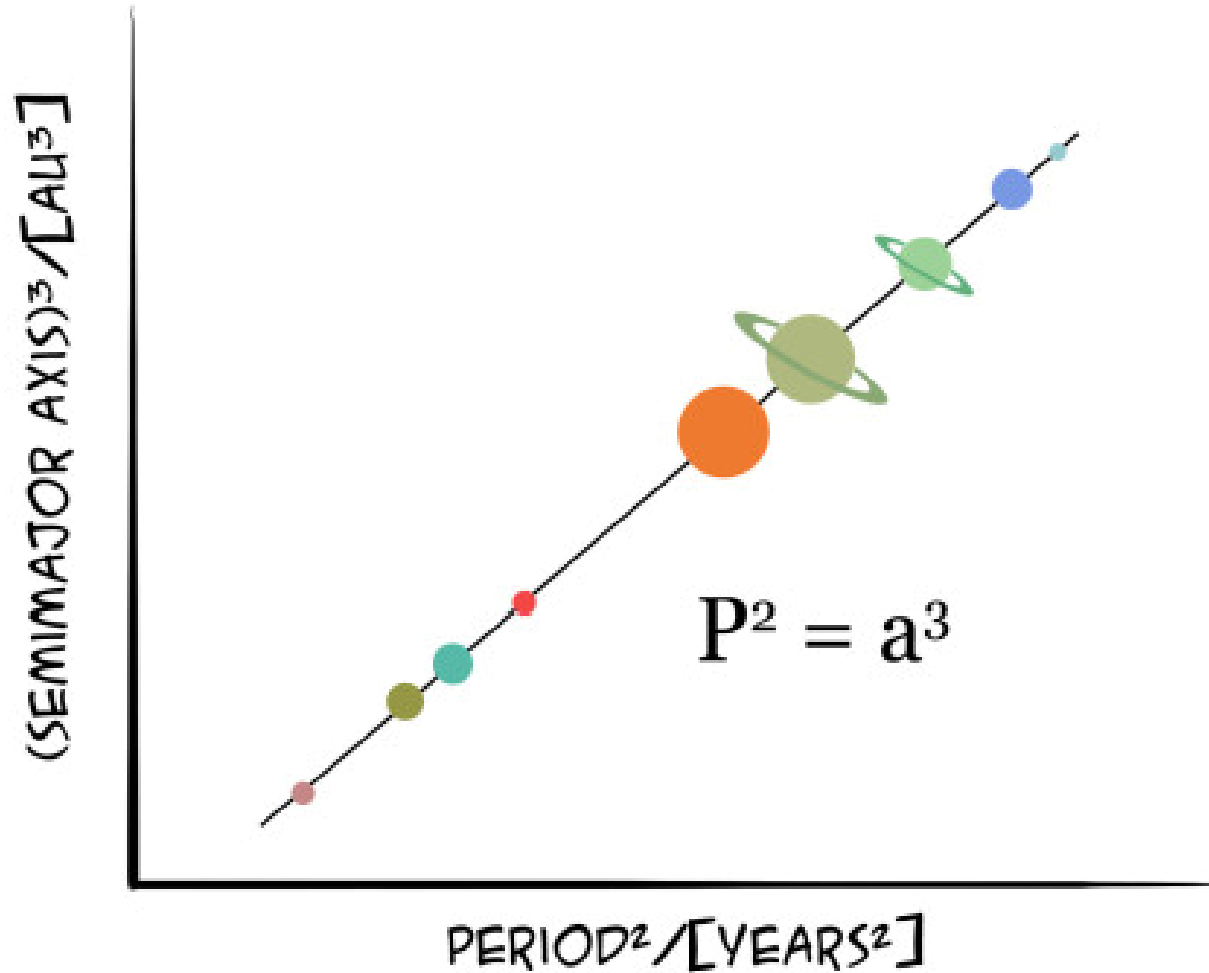


Gravitation

Keplersche Gesetze



Tycho Brahe
1546-1601
Student in Rostock



Diagnose

Quadrate der Umlaufzeiten von zwei Planeten verhalten sich wie Kuben der großen Halbachsen

Lichtobjekte

Schrödingergleichung

- ist von der Struktur her eine Differentialgleichung zur Berechnung einer Wellenfunktion
- erlaubt die Beschreibung von nicht-relativistischen Teilchen

Rückgriff auf Eigenschaften von Wellen und Teilchen

- Intensität von Licht im Wellenbild ist proportional zum Quadrat der Amplitude der Welle
- Intensität von Licht im Teilchenbild ist proportional zur Anzahl der Photonen

Licht als Teilchen	
I_λ	$\sim N_\lambda$
Intensität	Anzahl Photonen

Licht als Welle	
I_λ	$\sim E_\lambda^2$
Intensität	elektrisches Feld

Licht als Teilchen	
N_λ	$\sim E_\lambda^2$
Anzahl Photonen	elektrisches Feld

Anzahl eintreffender Photonen ist proportional
dem Quadrat der elektrischen Feldstärke des Lichtfeldes

Diagnose

FÜR EIN EINZIGES PHOTON ergibt sich: An jedem Punkt im Raum beschreibt das Quadrat des elektrischen Feldes die Wahrscheinlichkeit hier genau EIN Photon zu finden

Es gibt Unterschied im Gebrauch des Begriffes Wahrscheinlichkeit

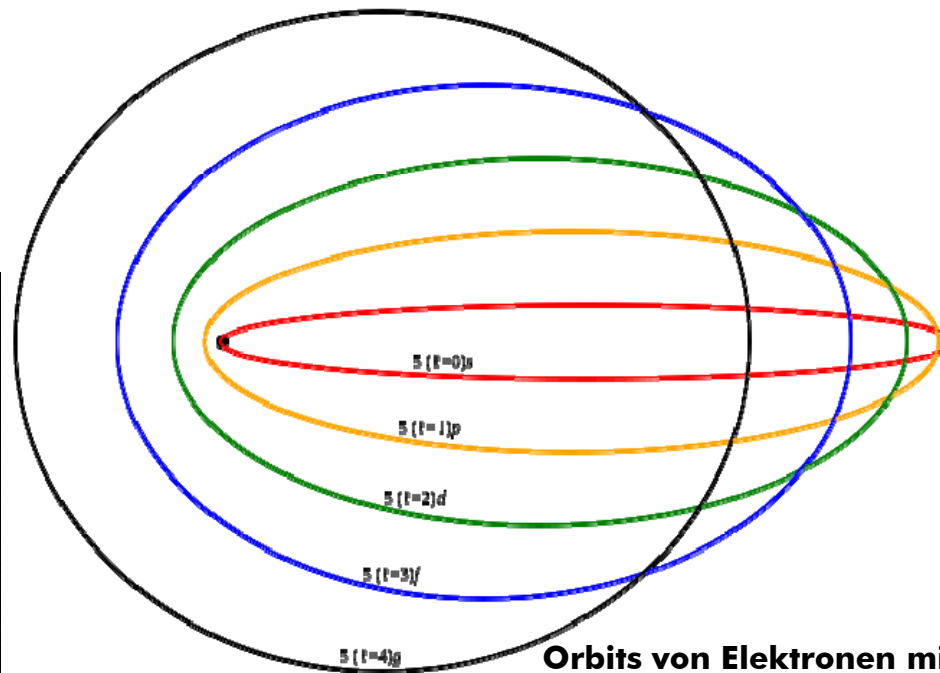
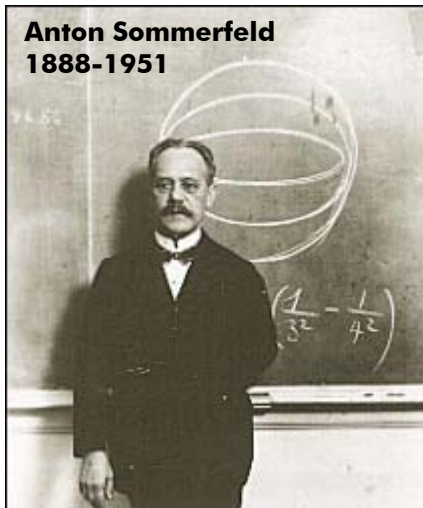
- Thermodynamik: Teilchenanzahl groß aber deterministisches Verhalten der Partikel
- Quantenmechanik: Wahrscheinlichkeit von Natur vorgegeben - nicht Unfähigkeit des Forschers

Sommerfeld & Wilson Quantisierung

Elliptische Bahnen

Symptome

- im Bohrschen Atommodell bewegen sich Elektronen auf Kreisbahnen um den Atomkern
- Erhaltungsgröße Drehimpuls wird nicht adäquat berücksichtigt



Orbits von Elektronen mit gleicher Hauptquantenzahl aber unterschiedlichem Bahndrehimpuls

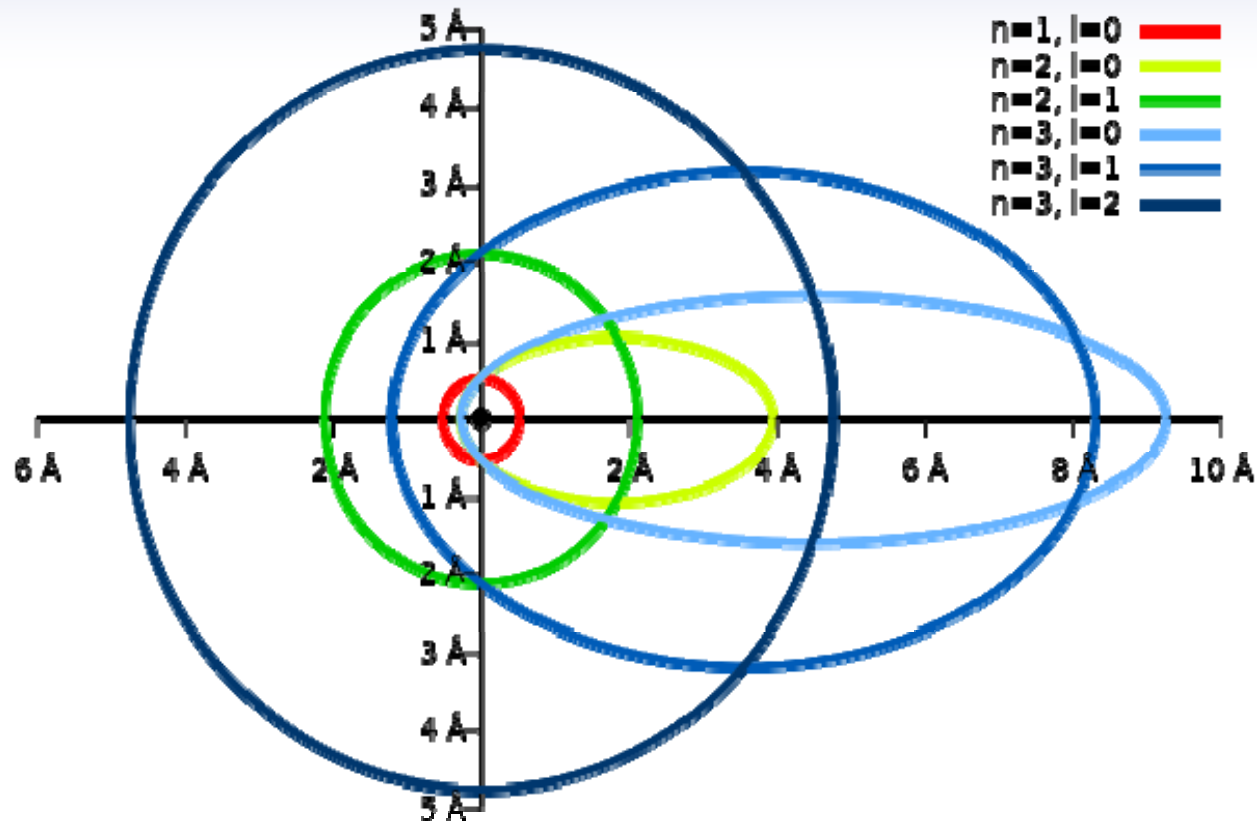
Kepler



Diagnose

- Elektronen bewegen sich **AUCH** auf elliptischen Orbits (Bohr-Sommerfeld Atommodell)
- Beschreibung erfordert **WEITERE** Quantenzahlen, die den Drehimpuls berücksichtigen
- Drehimpulsquantenzahl legt Betrag des Drehimpulses fest
- magnetische Quantenzahl charakterisiert Orientierung der Rotationsachse im Raum

Drehimpuls-Orbits



Diagnose

- Drehimpulsquantenzahl kennzeichnet Form des Orbitals in Atom
- mögliche Werte sind 0 sowie beliebige natürliche Zahlen bis maximal Hauptquantenzahl
- Drehimpulsquantenzahl (historisch begründet) wird auch Nebenquantenzahl genannt
- Vorstellung: Quantenzahl beschreibt Drehimpuls des kreisenden Elektrons

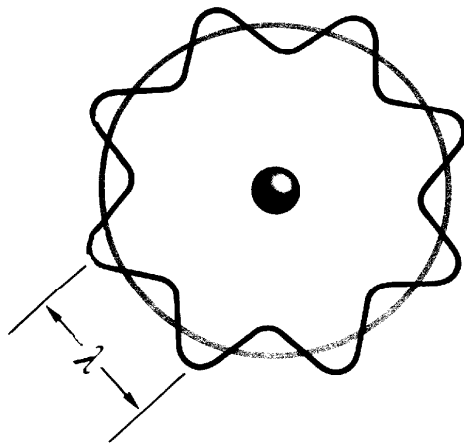
Quantisierungsstufe 2

Drehimpulserhaltung



Symptome

In einem abgeschlossenen System ist Summe der Drehimpulse konstant



de Broglie

$$2\pi r_e = n_{QM} \lambda_e = n_{QM} \frac{h}{m_e v_e}$$

Definition des Drehimpuls in klassischer Physik

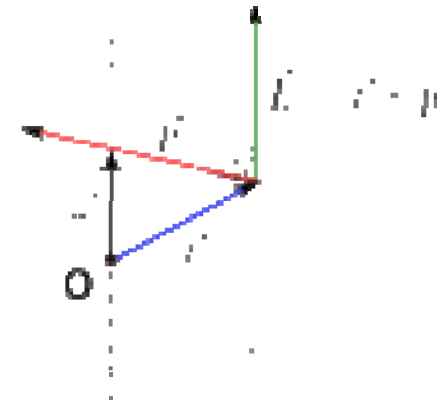
$$\vec{L}_R = \vec{r}_e \times \vec{p}_e$$

$$L_R = m_e v_e r_e$$

$$\ell_{QM} = n_{QM} \hbar \quad (n_{QM} = 0, 1, 2, \dots)$$

Drehimpuls in Quantenphysik quantisiert

$$2\pi r_e = \underset{\text{Hauptquantenzahl}}{n_{QM}} \lambda_e$$



Betrag des quantenmechanischen Drehimpulses

$$L_{QM}^2 = \ell_{QM} (\ell_{QM} + 1) \hbar^2$$

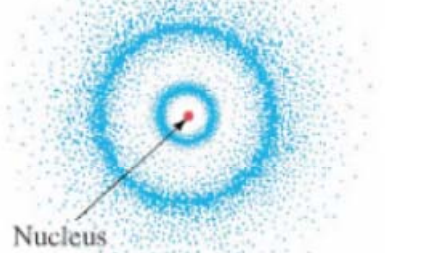
$$\underset{\text{Drehimpuls-Quantenzahl}}{\ell_{QM}} = \underset{\substack{\text{s} \\ \text{p} \\ \text{d}}}{0, 1, 2, \dots, \overset{\text{maximaler Wert}}{n_{QM} - 1}}$$

n_{QM} – Möglichkeiten für den Wert von ℓ_{QM}

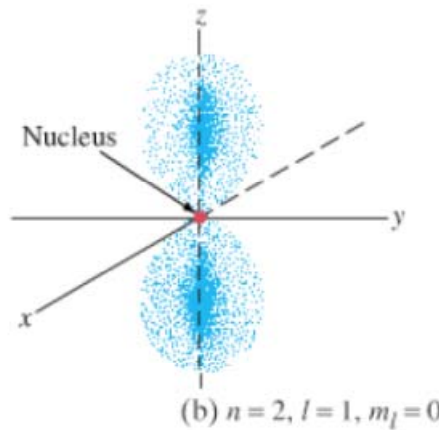
Diagnose

- im Atom ist Drehimpuls quantisiert und kann nur bestimmte Werte annehmen
- Drehimpuls NULL ist nunmehr erlaubt, im Gegensatz zur semiklassischen Bohrtheorie

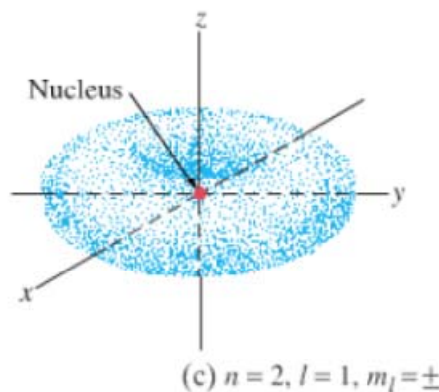
Wahrscheinlichkeitsdichten für
Elektronen in unterschiedlichen
Quantenzuständen



(a) $n = 2, l = 0, m_l = 0$



(b) $n = 2, l = 1, m_l = 0$



(c) $n = 2, l = 1, m_l = \pm 1$

Ein Photon kommt Auswahlregeln

Drehimpuls des Photons

$$\hbar$$

Symptome

- Ein Photon hat einen definierten Drehimpuls
- in Absorption und Emission muss Drehimpulserhaltung erfüllt sein

Dipol - Auswahlregel

$$\Delta \ell_{QM} = \pm 1$$

Absorption/ Emission eines Photons



solche optischen Übergänge sind erlaubt

$$\ell_{QM} = 2 \rightarrow \ell_{QM} = 1 \quad \text{OK, da } \Delta \ell_{QM} = -1$$

$$\ell_{QM} = 2 \rightarrow \ell_{QM} = 3 \quad \text{OK, da } \Delta \ell_{QM} = +1$$



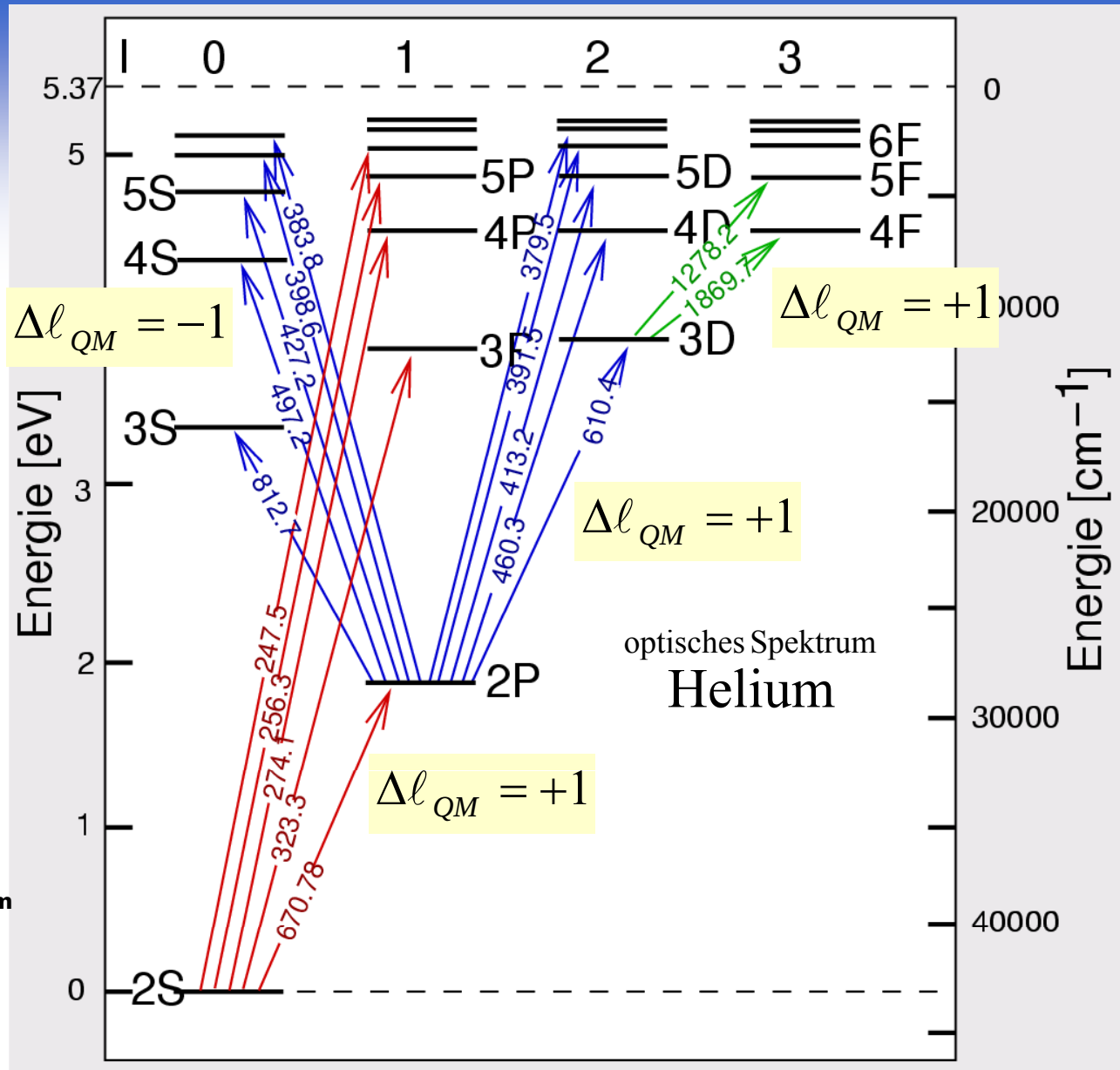
solche optischen Übergänge sind nicht erlaubt

$$\ell_{QM} = 2 \rightarrow \ell_{QM} = 2 \quad \text{NO, da } \Delta \ell_{QM} = 0$$

$$\ell_{QM} = 2 \rightarrow \ell_{QM} = 0 \quad \text{NO, da } \Delta \ell_{QM} = 2$$

Diagnose

Beim optischen Übergang ändert sich Form der Elektronenwolke



optisches Spektrum
Helium



Diagnose

Sogenanntes Termschema hier am Beispiel Helium zeigt, dass durch den Drehimpuls des Photons nur bestimmte optische Übergänge erlaubt sind



Intensität der Emissionslinien

optisches Spektrum
Helium



438,793 nm	schwach
443,755 nm	schwach
447,148 nm	stark
471,314 nm	mittel
492,193 nm	mittel
501,567 nm	stark
504,774 nm	schwach
587,562 nm	stark
667,815 nm	mittel

Diagnose

- Linienstärke hängt von der Anzahl der Atome ab, die zur Emission beitragen
- da Besetzung thermisch verursacht, ist Linienstärke auch ein Maß für Umgebungstemperatur

Extrablatt

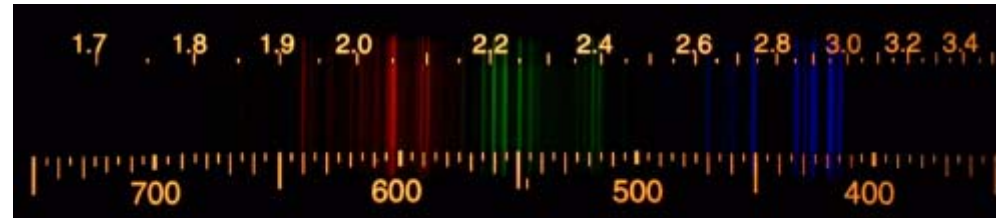
Wasserstoff



Neon



Argon



Krypton



Xenon



Quecksilber

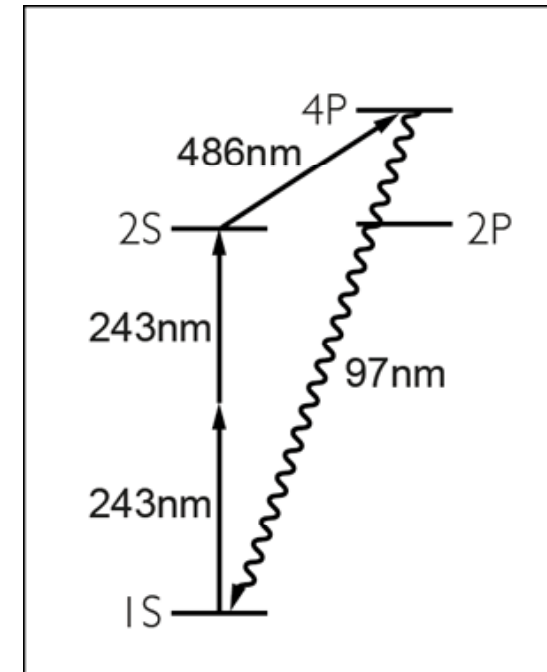
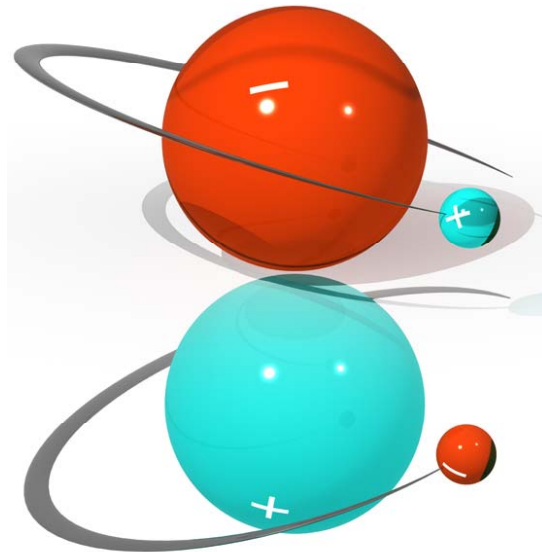




Wasserstoff auf den Kopf gestellt Antiwasserstoff

Symptome

- Antiteilchen sind Elementarteilchen, die umgekehrt elektrisch geladen sind
- bei Antiwasserstoff besteht Atomkern aus einem Antiproton und Atomhülle aus einem Positron
- Antiteilchen treten in der Natur selten auf
- denn bei Kontakt mit Teilchen wandeln sie sich in Strahlung um



Diagnose

- Ziel ist Messung des 1s-2s Übergangs mit vergleichbaren Auflösung zu normalem Wasserstoff
- Übergang ist quantenphysikalisch optisch praktisch erlaubt (Drehimpulsquantenzahl)
- extrem lange Lebensdauer bringt nach Heisenberg extrem scharfe Emissionslinie
- die sogenannte natürliche Linienbreite beträgt nur 1.3 Hz (Vergleich Lichtfrequenz 10^{15} Hz)
- damit kann das CPT-Theorem (Charge-Parity-Time) der Quantenfeldtheorie überprüft werden

Vertauschung Materie mit Antimaterie, Spiegelung des Raumes, Umkehr Zeitrichtung

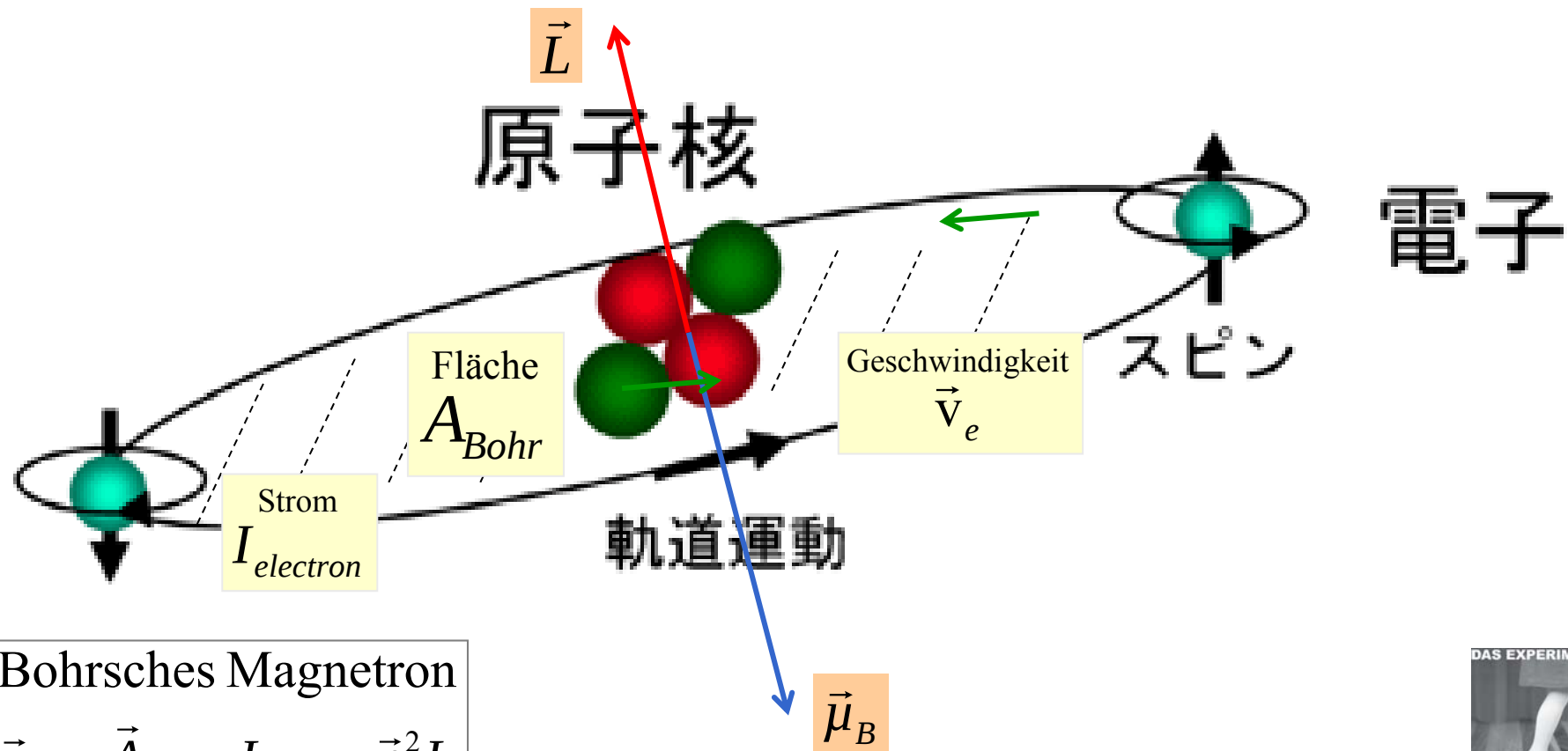


Quantisierungsstufe 3

Ausrichtung im Magnetfeld

Symptome

Kreisströme wie Elektron um Atomkern erzeugen ein magnetisches Feld (magnetischer Dipol)



Bohrsches Magnetron

$$\vec{\mu}_B = \vec{A}_{Bohr} \cdot I_e = \pi \vec{r}_e^2 I_e$$

Magnetfeld
Spule

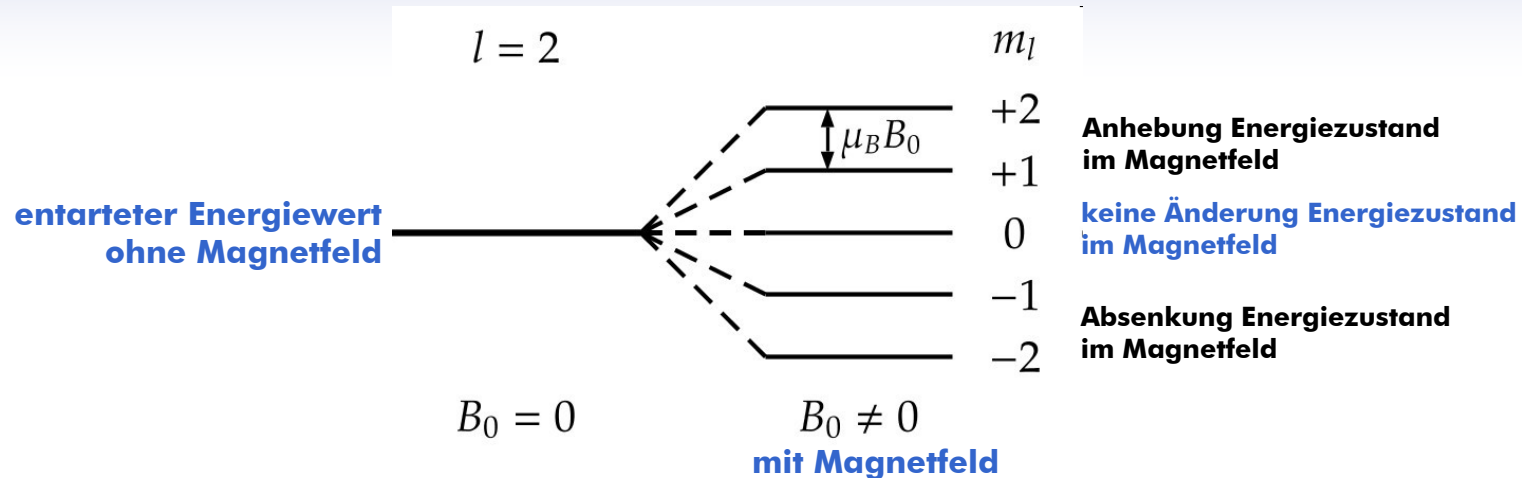


Diagnose

Im Magnetfeld richten sich magnetische Dipole aus

Quantisierungsstufe 3

Ausrichtung im Magnetfeld



Drehimpuls-Quantenzahl
in Richtung des magnetischen Feldes

$$L_z = m_\ell \hbar$$

magnetische
Quantenzahl

$$m_\ell = -\ell_{QM}, -\ell_{QM} + 1, \dots, -1, 0, 1, \dots, \ell_{QM} - 1, \ell_{QM}$$

$2\ell_{QM} + 1$ Möglichkeiten, für den Wert von m_ℓ

Diagnose

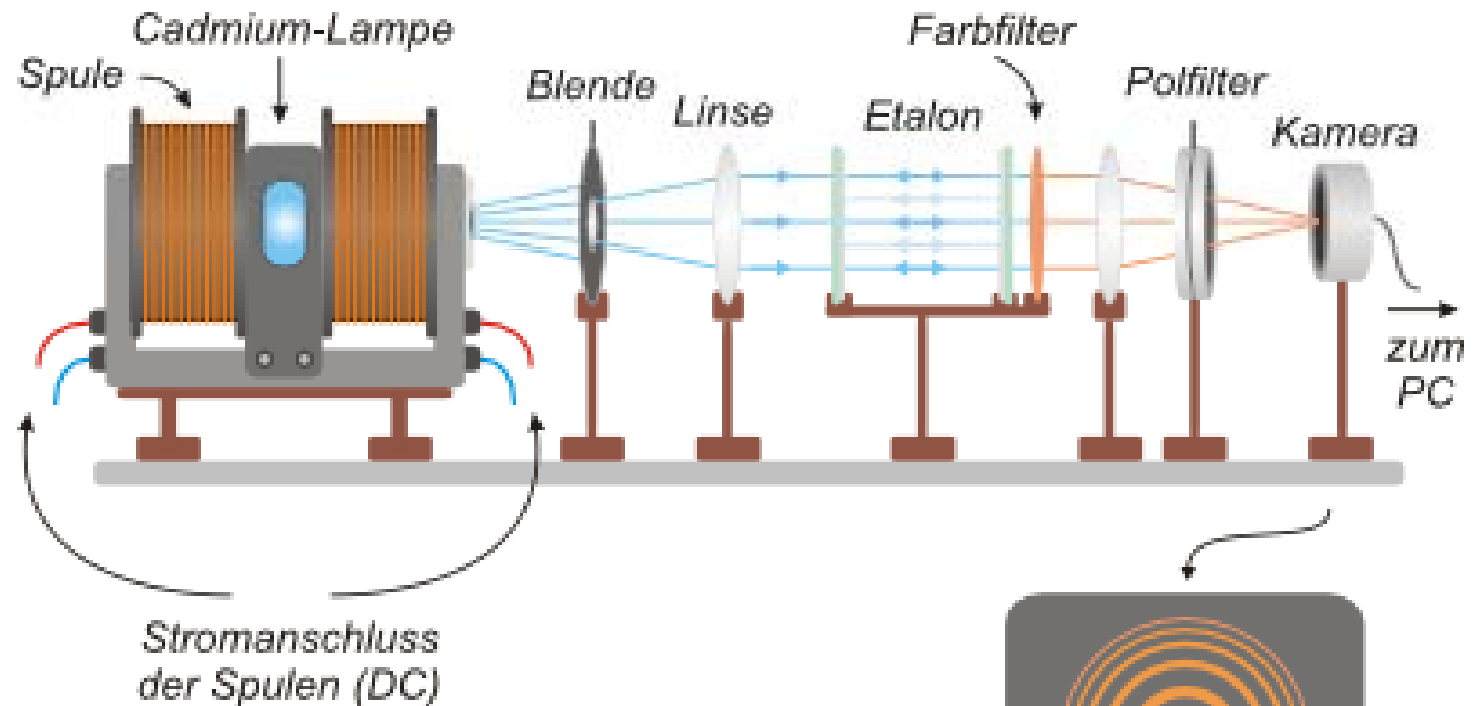
- im Magnetfeld richten sich magnetische Dipole aus
- zusätzliche potentielle Energie in Richtung des Magnetfeldes (typisch in z-Richtung)
- Energieniveaus der Elektronenzustände verschieben sich
- magnetisch induzierte Aufspaltung der Drehimpulszustände der Elektronen

Lichtemission im Magnetfeld

Zeeman-Effekt

Symptome

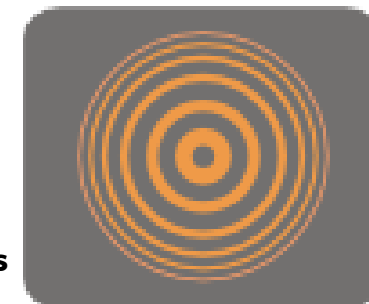
- im magnetischen Feld spalten Atomlinien in mehrere Komponenten auf
- sogenannte Entartung der Energiezustände wird aufgehoben



Pieter Zeeman
1865-1943



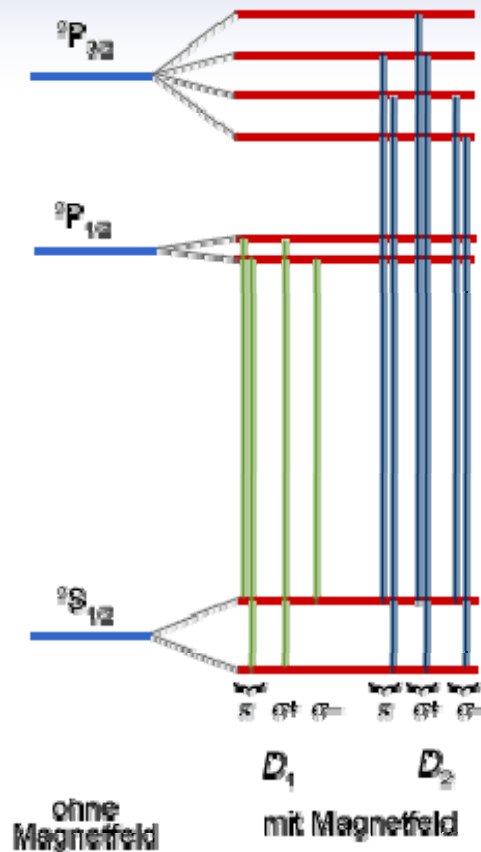
Experimenteller Aufbau zur Messung des Zeeman-Effekts



Interferenzbild

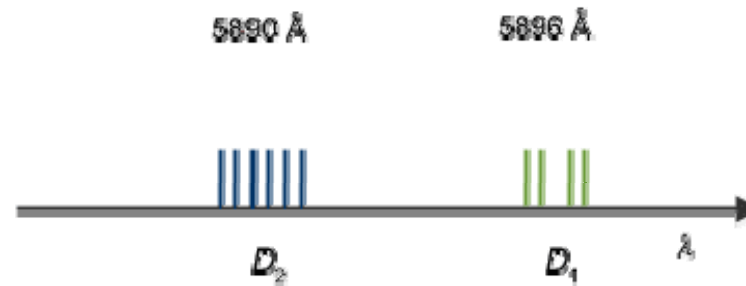
Lichtemission im Magnetfeld

Zeeman-Effekt



Zeemannaufspaltung von Spektrallinien im Magnetfeld

$$\Delta E_{\text{Zeeman}} = \mu_B B_M m_\ell$$



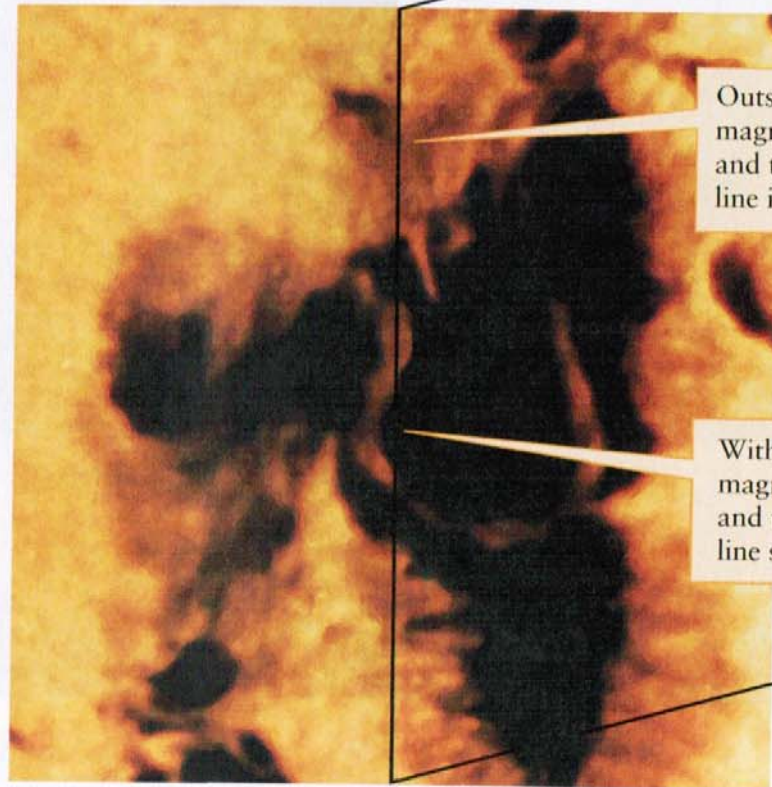
zum Vergleich
Spektraler Abstand der Na-D-Linien

$$\Delta \lambda_{\text{Na-D}} = 0.6 \text{ nm}$$

Aufspaltung der sogenannten D-Linie in Alkalien
führte zur Postulierung des Elektronenspins
durch Goudsmit und Uhlenbeck in 1925

Diagnose

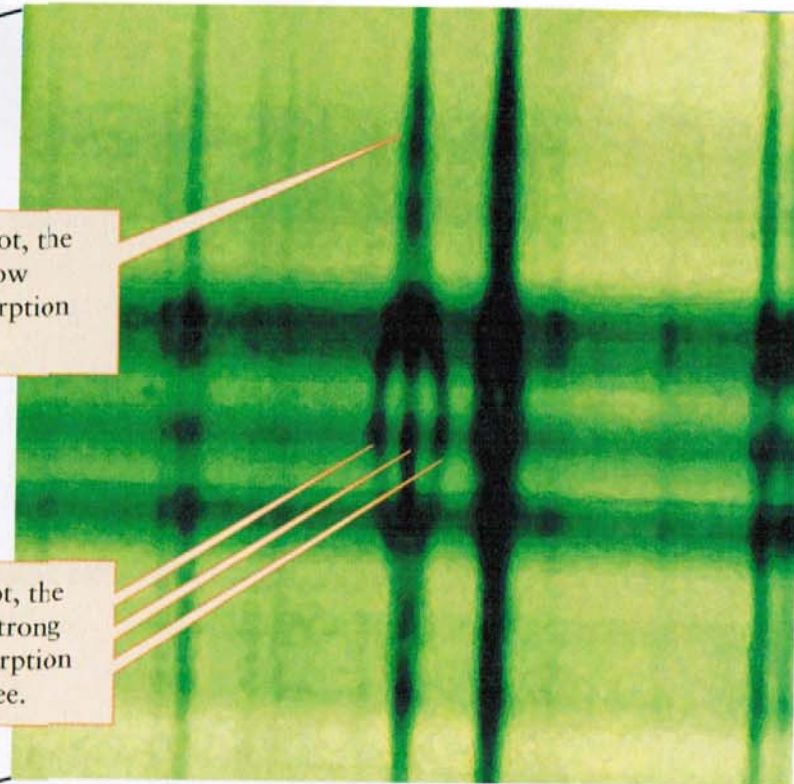
- Elektronenzustände zu gleichem (n,l) sind energetisch nicht unterscheidbar
- man spricht von Entartung
- im Magnetfeld verschieben sich diese Energiezustände
- Zeeman-Aufspaltung der Spektrallinien äußerst gering (~pm)
- Phänomen Zeeman-Effekt lässt sich nur mit hochauflösender Spektroskopie nachweisen



(a) A sunspot

Outside the sunspot, the magnetic field is low and this iron absorption line is single.

Within the sunspot, the magnetic field is strong and this iron absorption line splits into three.

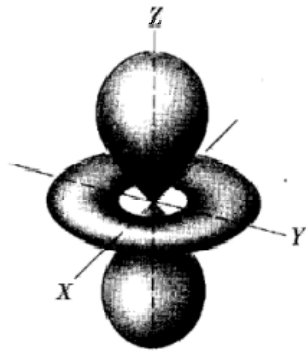


(b) The spectrum in and around the sunspot

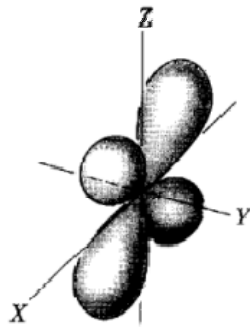
The Nobel Prize in Physics 1902 was awarded jointly to Hendrik Antoon Lorentz and Pieter Zeeman in recognition of the extraordinary service they rendered by their researches into the influence of magnetism upon radiation phenomena

Magnetische Quantenzahl

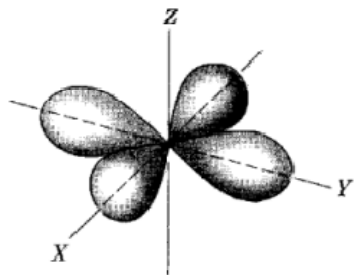
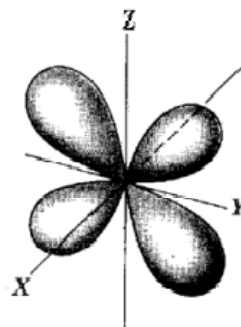
Elektronenorbitale für Drehimpulsquantenzahl $l=2$
und unterschiedliche magnetische Quantenzahlen m



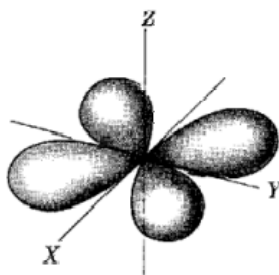
$m = 0$



$m = 1$



$m = 2$



Ballrotation bei
unterschiedlichen Achsen



magnetische
Quantenzahl

grobes mechanisches Analogon
Rotationsebene

$m = +1$

x - y im Urzeigersinn

$m = 0$

Hantel in z - Richtung

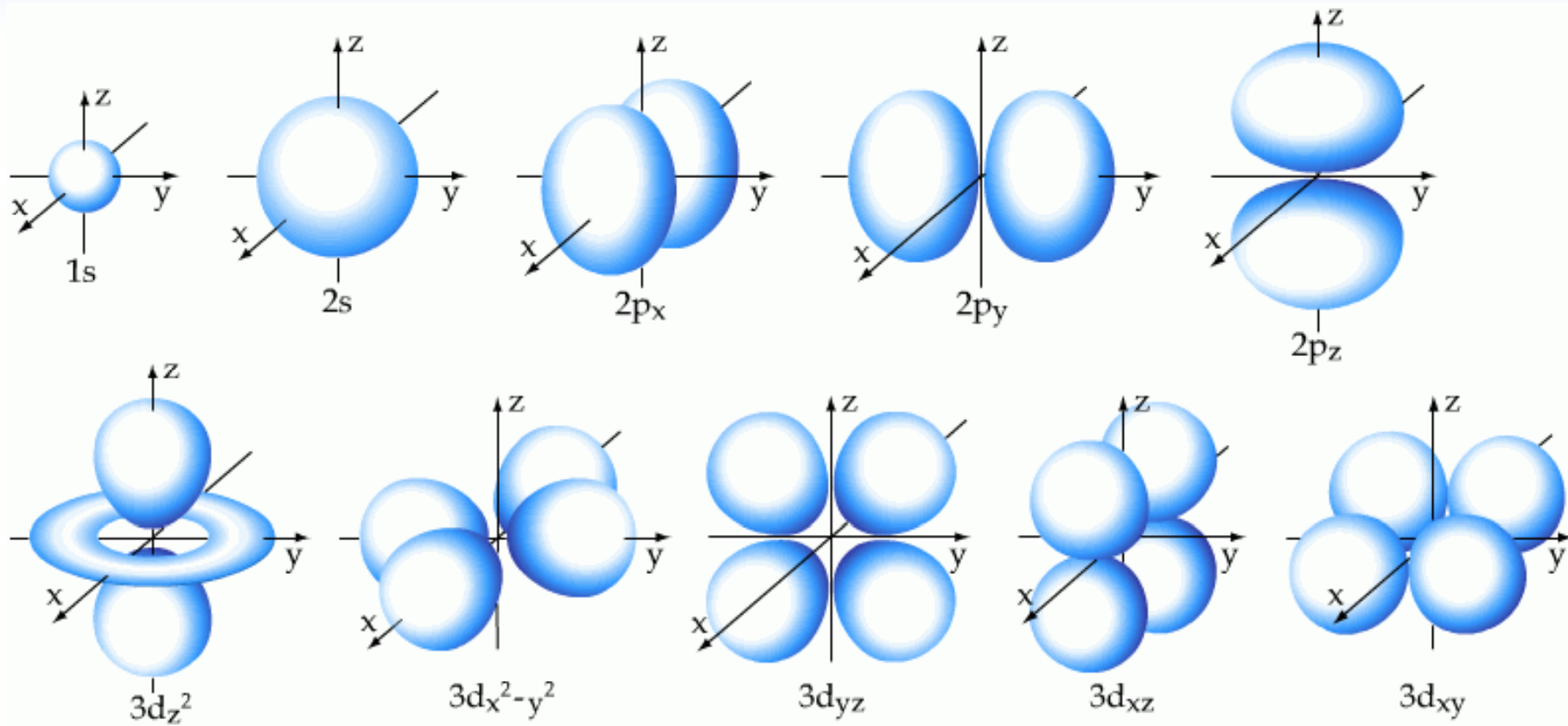
$m = -1$

x - y entgegen Urzeigersinn

Diagnose

- Für $n=1$ ergibt sich $l=0$ und $m=0$ und die Elektronenwolke ist kugelsymmetrisch
- Schrödingergleichung sagt für $n=2$ VIER entartete Energieniveau voraus
 - $l=0$ s-Zustand ist wieder kugelsymmetrisch
 - $l=1$ p-Zustand erlaubt drei mögliche Zustände für m : $m=-1$, $m=0$, $m=+1$

chemische Sichtweise Magnetische Quantenzahl



Chemie

Diagnose

- Molekülchemie verwendet andere Zustände, die ebenfalls Drehimpuls charakterisieren
- für $l=1$ ergeben sich hantelförmige Aufenthaltswahrscheinlichkeiten in x - y und z -Ebene

Quantenzustände

n	$l=0$ (s-Elektron)	$l=1$ (p-Elektron)		$l=2$ (d-Elektron)					$l=3$ (f-Elektron)					
	$m=0$	$m=0$	$m=1$ $m=-1$	$m=0$	$m=1$ $m=-1$	$m=2$ $m=-2$	$m=0$	$m=1$ $m=-1$	$m=2$ $m=-2$	$m=3$ $m=-3$				
1														
2														
3														
4														

Abb. 10-39: Übersicht über die Knotenflächen zu den verschiedenen Tripeln der Quantenzahlen n, l und m bis n = 4.

Thema Beyond Bohr

Entdeckung des Spins

Otto Stern
1888-1933

Walther Gerlach
1889-1979

1921-1922
Professor in Rostock





Atome im Magnetfeld

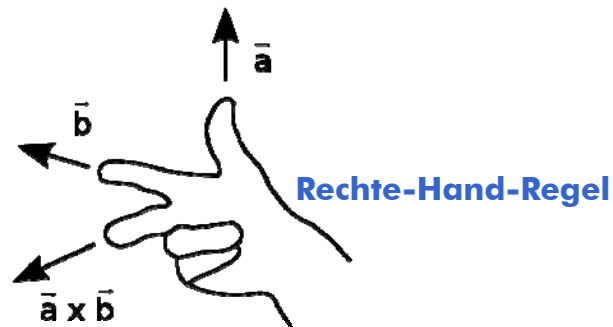
Symptome

Auf stromdurchflossenen Leiter wirkt im HOMOGENEN Magnetfeld KEINE effektive Kraft

Lorentzkraft

$$\vec{F}_M = q_e \vec{v}_q \times \vec{B}_M$$

$$[\vec{F}_M] = \left[\text{C} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{T} \right]$$

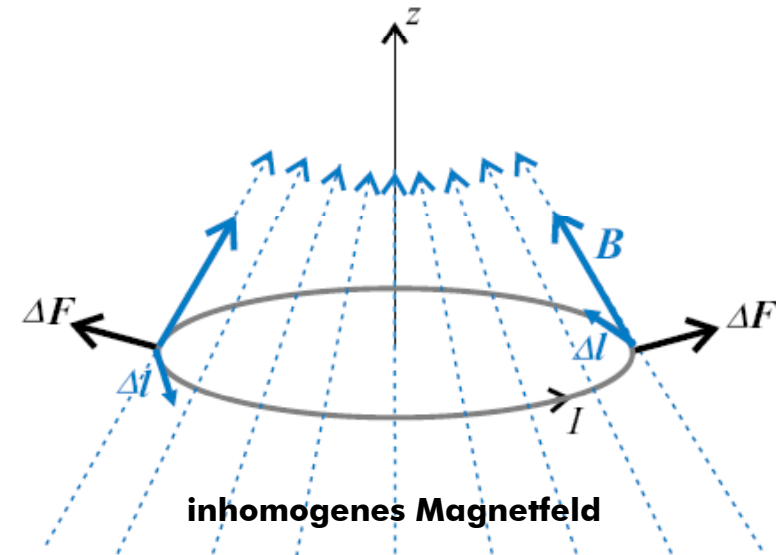
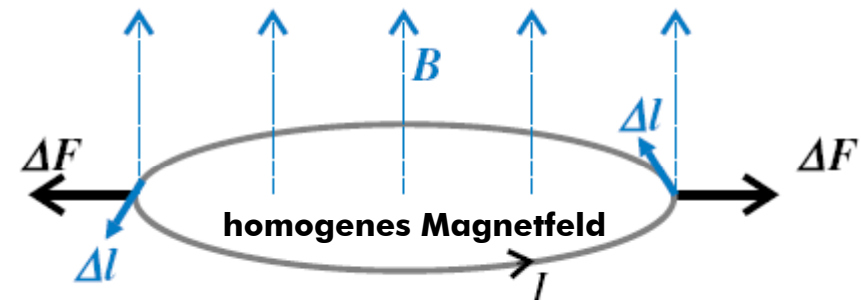


Kraft auf stromdurchflossenen Leiter

$$\sum (\Delta \vec{F}_M) = \sum I_e (\Delta \vec{\ell}) \times \vec{B}_M$$

$$[\vec{F}_M] = [\text{A} \cdot \text{m} \cdot \text{T}] = \left[\frac{\text{C}}{\text{s}} \cdot \text{m} \cdot \text{T} \right]$$

$$[\vec{F}_M] = [\text{A} \cdot \text{m} \cdot \text{T}] = \left[\text{A} \cdot \text{m} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{A} \cdot \text{s}^2} \right] = \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right] = [\text{N}]$$



Diagnose

- auf stromdurchflossenen Leiter wirkt im INHOMOGENEN Magnetfeld eine effektive Kraft
- Elektron im inhomogenen Magnetfeld sollte eine Kraft spüren



Atome im inhomogenen Magnetfeld

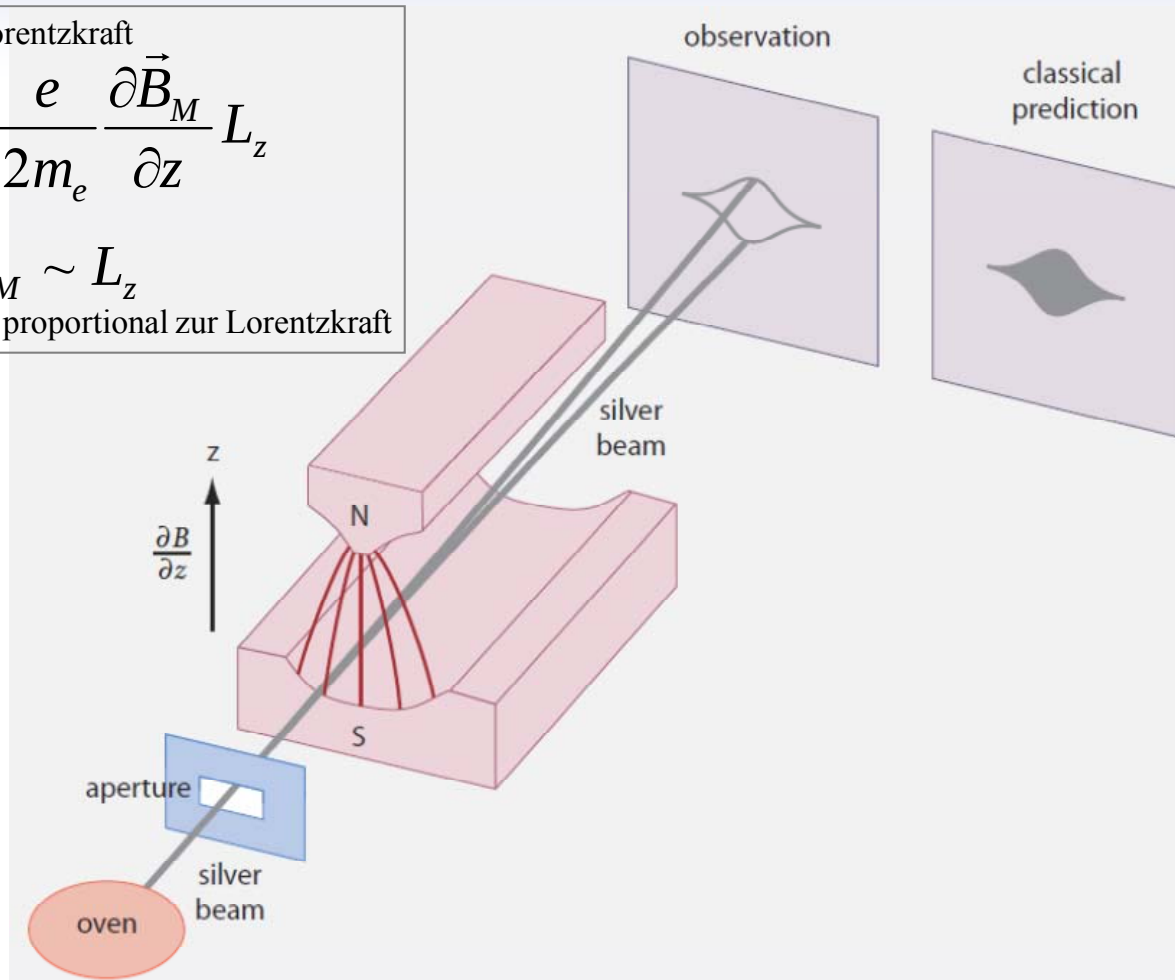
Stern-Gerlach Experiment

Lorentzkraft

$$\vec{F}_M = -\frac{e}{2m_e} \frac{\partial \vec{B}_M}{\partial z} L_z$$

$$\vec{F}_M \sim L_z$$

Kraft auf Teilchen ist proportional zur Lorentzkraft



Diagnose

- klassisch kann Drehimpuls **BELIEBIGE** Werte zwischen $+L_z$ und $-L_z$ annehmen
- **Aufspaltung des Atomstrahl** und verschmiertes Signal auf Detektor



Atome im inhomogenen Magnetfeld

Stern-Gerlach Experiment

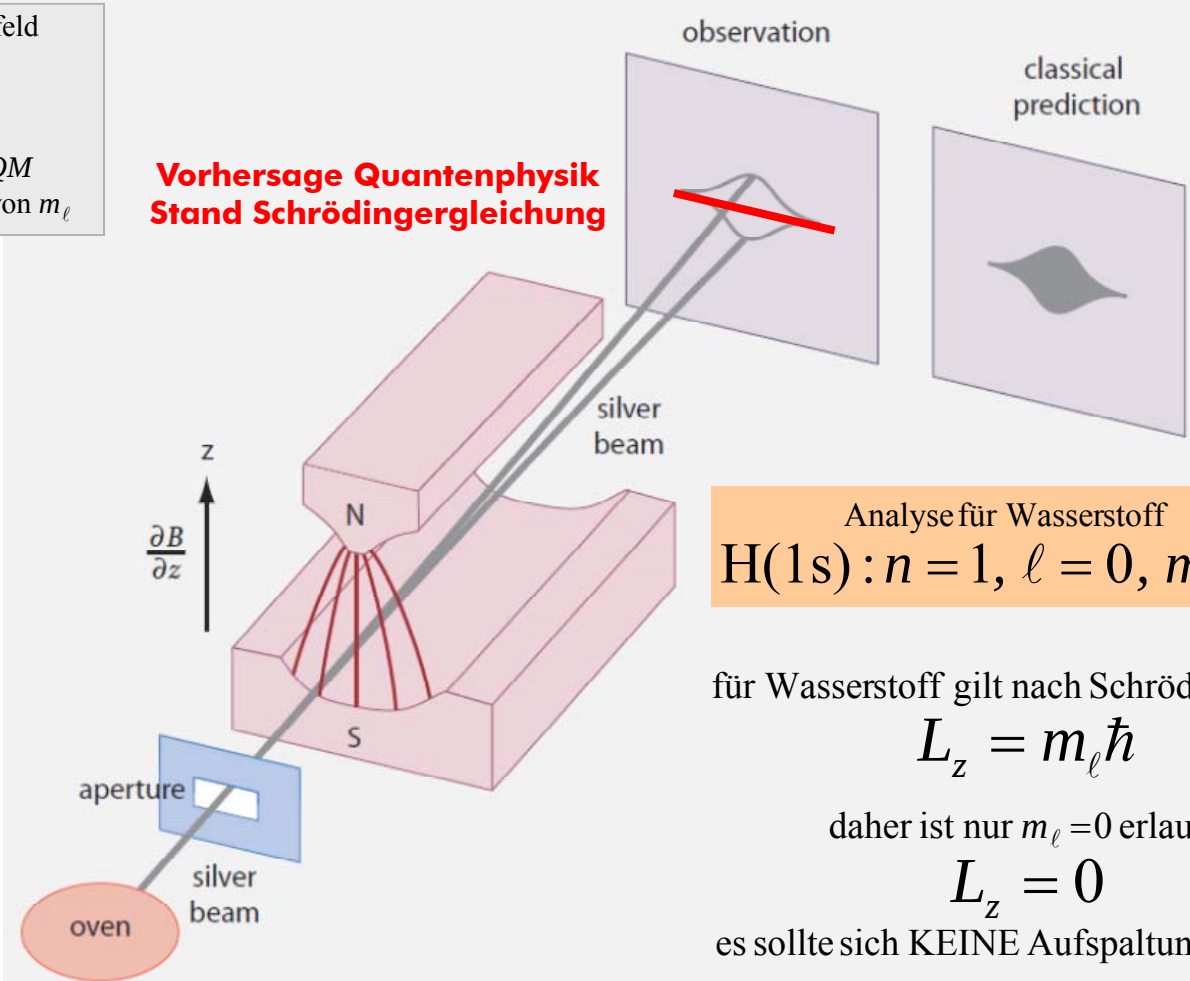
Drehimpulsquantenzahl im Magnetfeld

$$L_z = m_\ell \hbar$$

$$m_\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell_{QM}$$

$2\ell_{QM} + 1$ Möglichkeiten, für den Wert von m_ℓ

**Vorhersage Quantenphysik
Stand Schrödingergleichung**



Analyse für Wasserstoff

$$H(1s) : n = 1, \ell = 0, m = 0$$

für Wasserstoff gilt nach Schrödinger $\ell = 0$

$$L_z = m_\ell \hbar$$

daher ist nur $m_\ell = 0$ erlaubt

$$L_z = 0$$

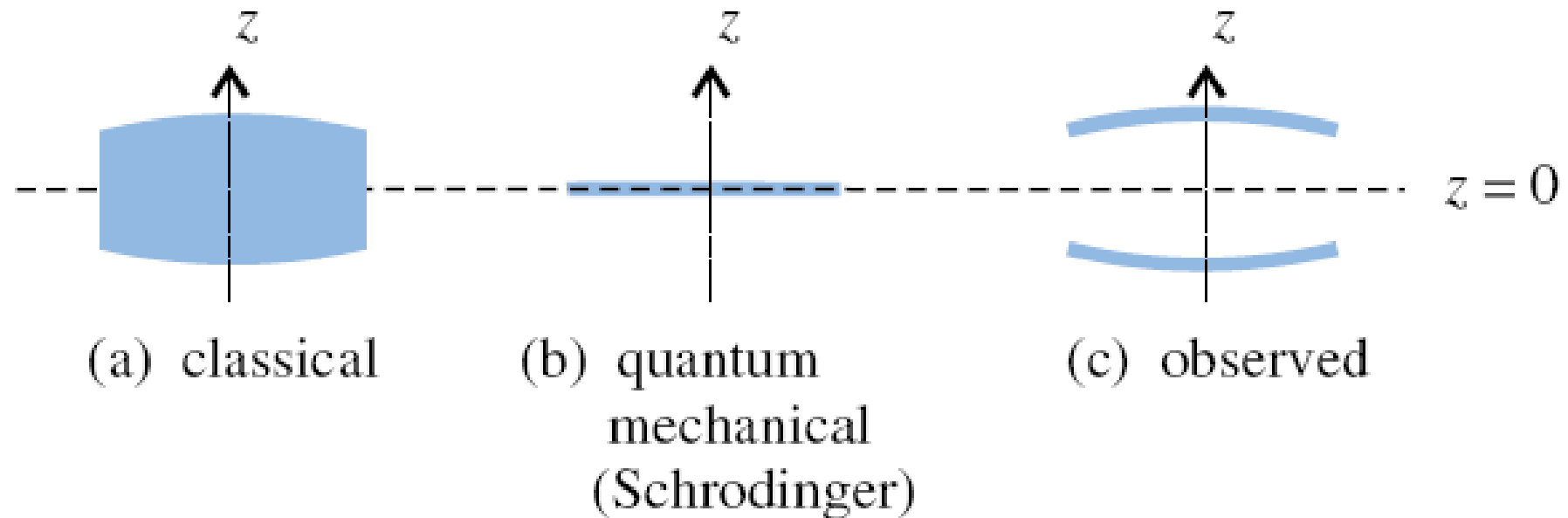
es sollte sich KEINE Aufspaltung ergeben

Diagnose

- quantenmechanisch ergibt sich nach Schrödinger wegen $m=0$ KEINE Ablenkung für H
- experimentell erwartet man keinen Einfluss des Magnetfeldes auf die Bahn der Atome

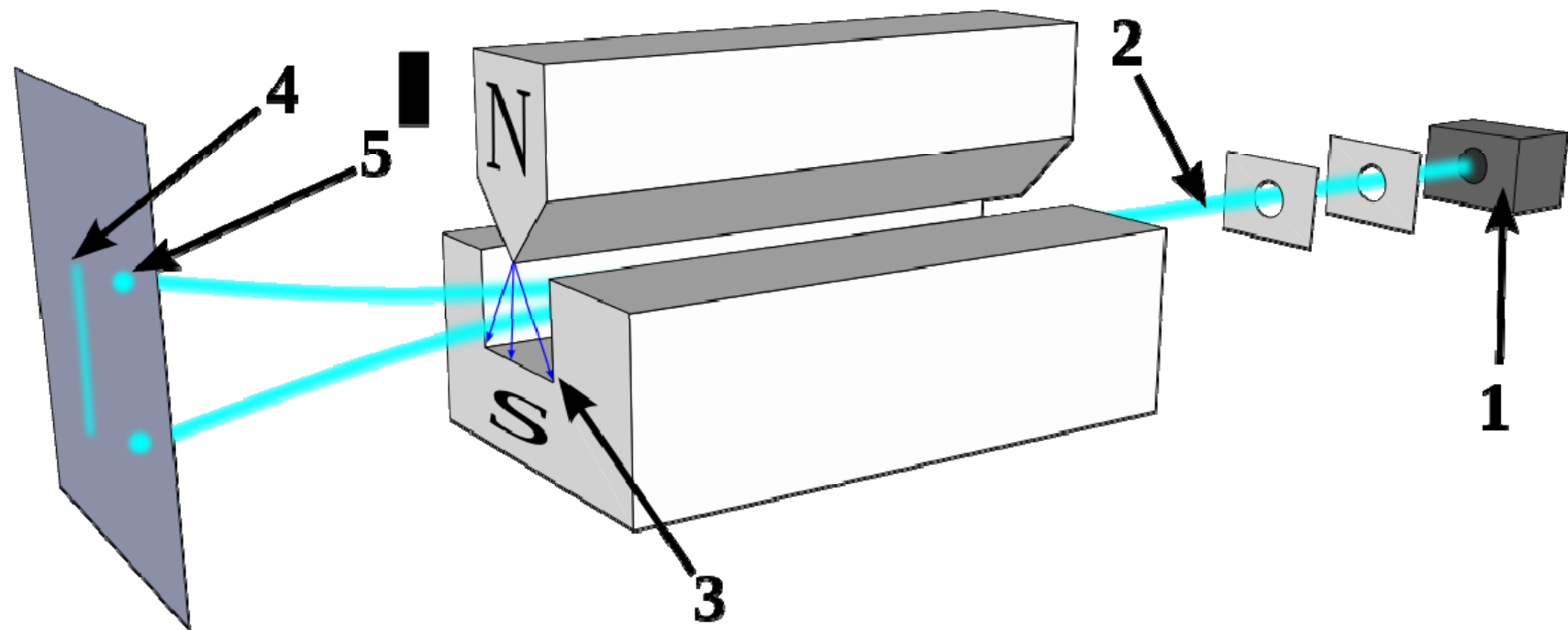
Atome im inhomogenen Magnetfeld

Stern-Gerlach Experiment



Diagnose

- im Experiment beobachtet man Aufspaltung in ZWEI Komponenten
- überraschend, da Werte der magnetischen Quantenzahl $m = (2l+1)$ stets UNGERADE (1, 3, 5, ...)
- Atome müssen charakterisiert werden durch eine ZUSÄTZLICHE Quantenzahl
- diese neue Quantenzahl nennt man den SPIN



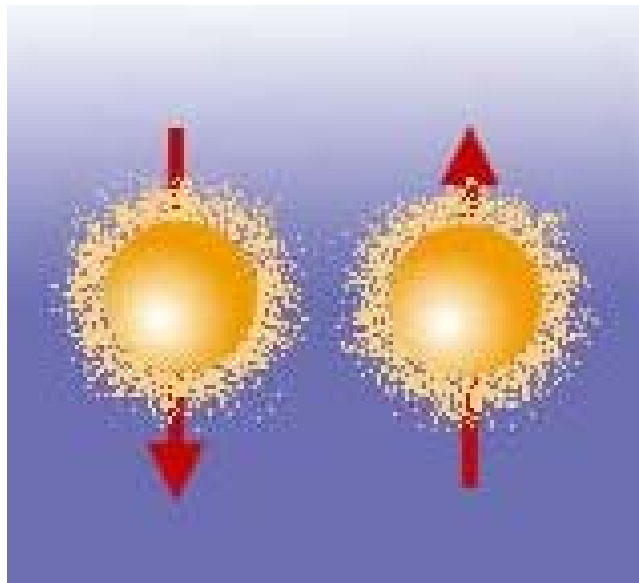
**The Nobel Prize in Physics 1943 was awarded to Otto Stern
for his contribution to the development of the molecular ray method and his
discovery of the magnetic moment of the proton**

Quantisierungsstufe 4

Eigendrehimpuls

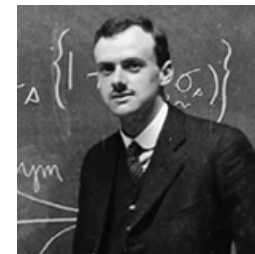
Symptome

- Teilchen haben eine Ausdehnung aufgrund Masse und sind elektrisch geladen
- klassisch resultiert daraus Drehimpuls und magnetisches Moment bei Rotation der Teilchen
- Eigenschaft ALLER subatomaren Teilchen ist intrinsischer Drehimpuls von $s=1/2$ (FERMIONEN)
- man nennt diese Eigenschaft den SPIN
- Spins richten sich im Magnetfeld aus und besetzen ZWEI quantisierte Zustände



$$m_s = -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$$

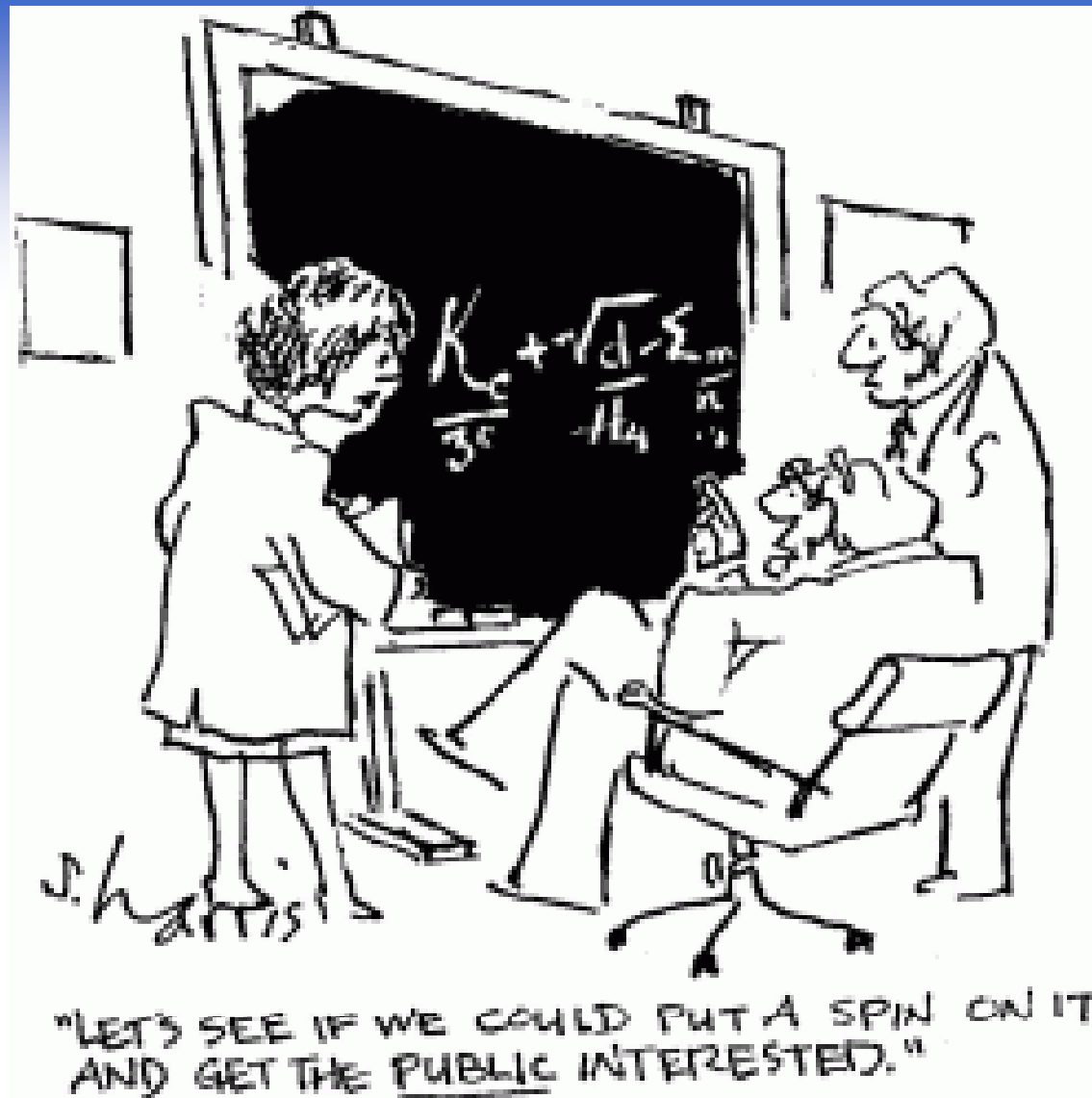
ZWEI Möglichkeiten für den Wert des Spins im Magnetfeld



Paul Dirac
1902-1984

Diagnose

Phänomen Spin konnte erst mit Hilfe der relativistischen Dirac-Gleichung erklärt werden



**The Nobel Prize in Physics 1933 was awarded jointly to
Erwin Schrödinger and Paul Adrien Maurice Dirac
for the discovery of new productive forms of atomic theory**

Quantisierungsstufe 4

Eigendrehimpuls

Spin elementarer Teilchen

Elektron $m_s = \pm 1/2$

Proton $m_s = \pm 1/2$

Neutron $m_s = \pm 1/2$

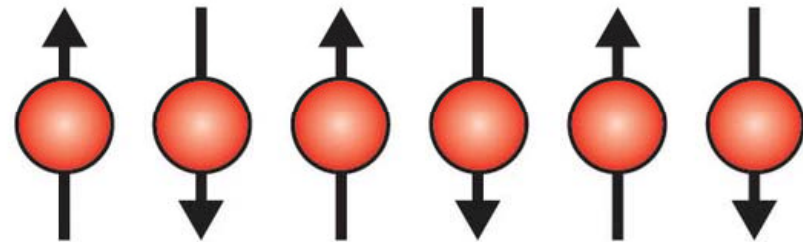
Austauschteilchen
der Kernkraft

Pion $m_s = 0$

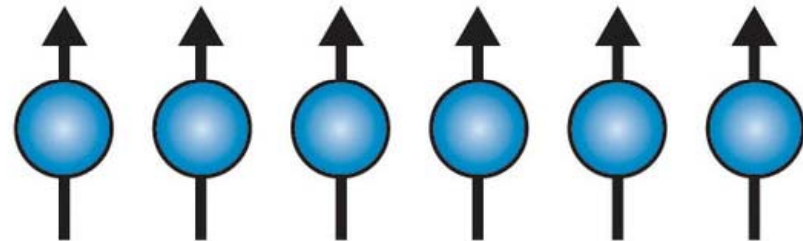
Austauschteilchen
der elektrischen Wechselwirkung

Photon $m_s = 0$

Fermions



Bosons



Diagnose

- Teilchen mit Spin 1/2 nennt man Fermionen
- Teilchen mit Spin 1 nennt man Bosonen
- tatsächlich muss man für ein z.B. Atom ALLE Spin-Beiträge zusammenzählen
- dieser Wert entscheidet darüber, ob das Teilchen ein Fermion oder ein Boson darstellt
- für Fermionen gelten andere Regeln als für Bosonen



Wenn man ganz genau hinschaut Feinste Nuancen



Diagnose

- es gibt noch eine zusätzliche Kopplung zwischen Bahndrehimpuls und Spin
- Wechselwirkung führt zu charakteristischer Verschiebung der Energiezustände

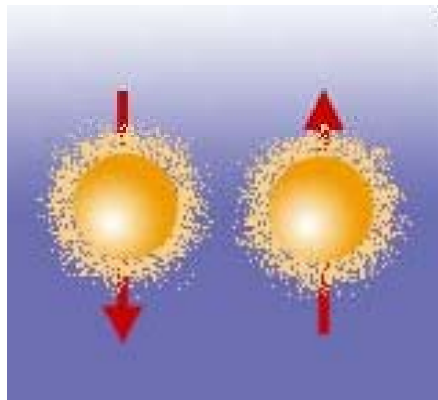
Quantisierungsstufe 4

Eigendrehimpuls

Stern-Gerlach Experiment impliziert

$$m_S = -\frac{e}{m_e} S_{QM}$$

Elektron hat intrinsisches magnetische Dipolmoment



Elektronenspin

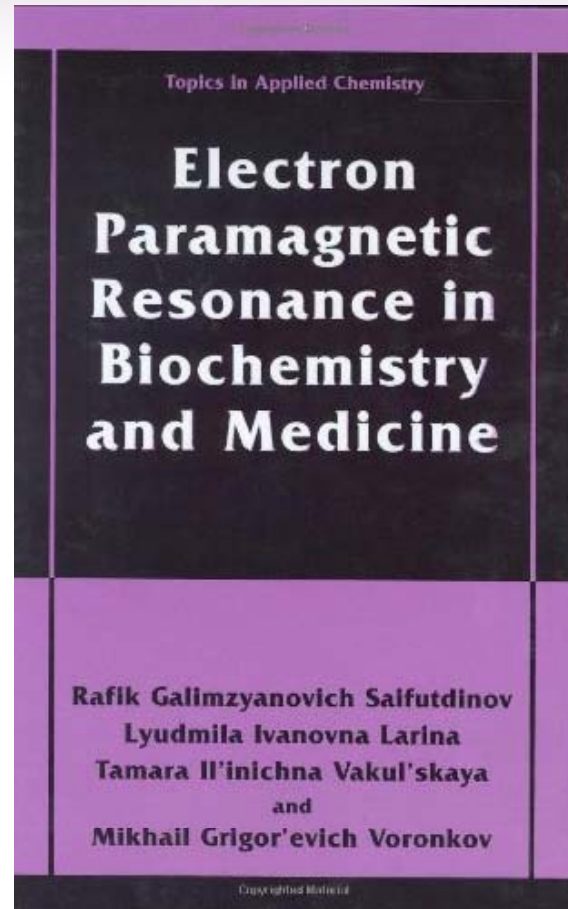
Betrag definiert analog zur Drehimpulsquantenzahl

$$S_{QM}^2 = s_{QM}(s_{QM} + 1)\hbar^2$$

$$S_z = m_S \hbar$$

Extrablatt

Elektronenspin Medizinische Anwendung



INFOBOX

Electron Paramagnetic Resonance (EPR)

Abfrage Spin der Elektronen der Atomhülle

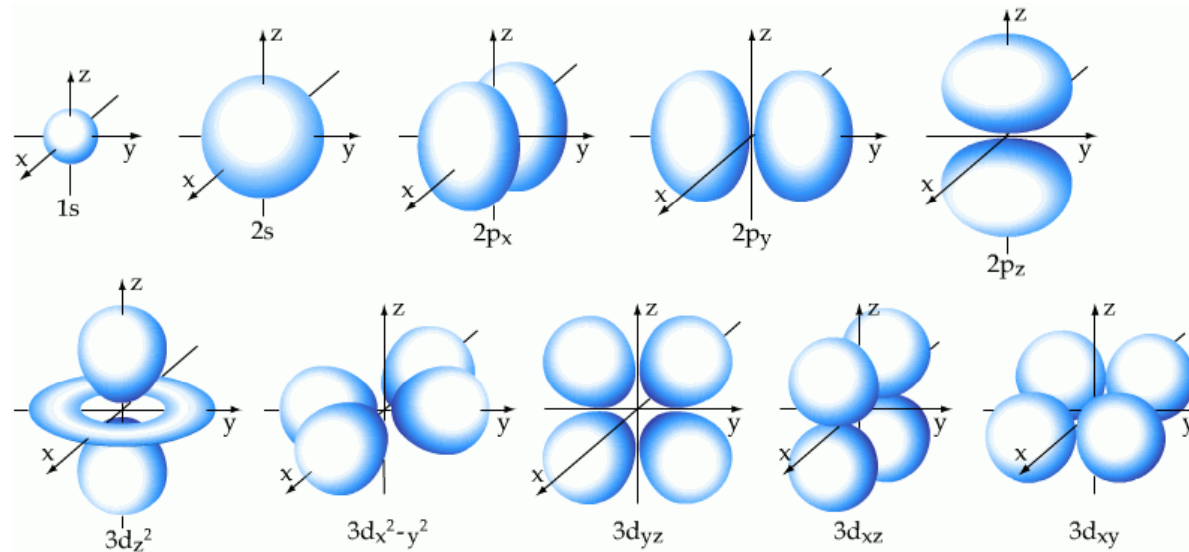
Nuclear Magnetic Resonance (NMR) und Magnetic Resonance Tomography (MRT)

Abfrage Spin des Atomkerns

Zusammenfassung

Atomare Quantenzahlen

	Symbol	erlaubte Werte
Hauptquantenzahl	n_{QM}	1, 2, 3, ...
Drehimpulsquantenzahl	ℓ_{QM}	0, 1, 2, ..., $(n_{QM} - 1)$
magnetische Quantenzahl des Drehimpulses	m_l	$0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm (\ell_{QM} - 1), \pm \ell_{QM}$
Spin	s	1/2
magnetische Quantenzahl des Spins	m_s	-1/2, +1/2

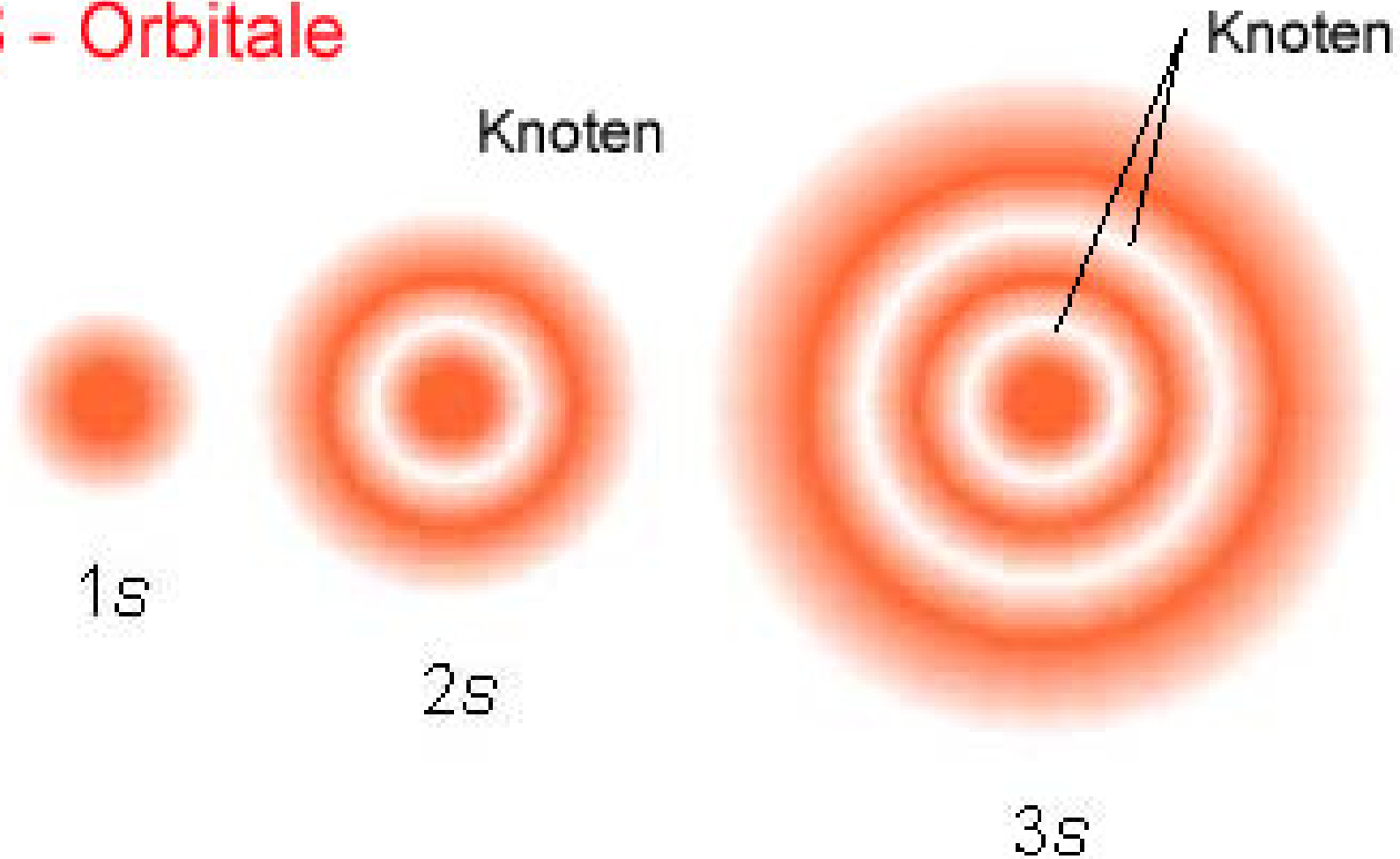


Diagnose

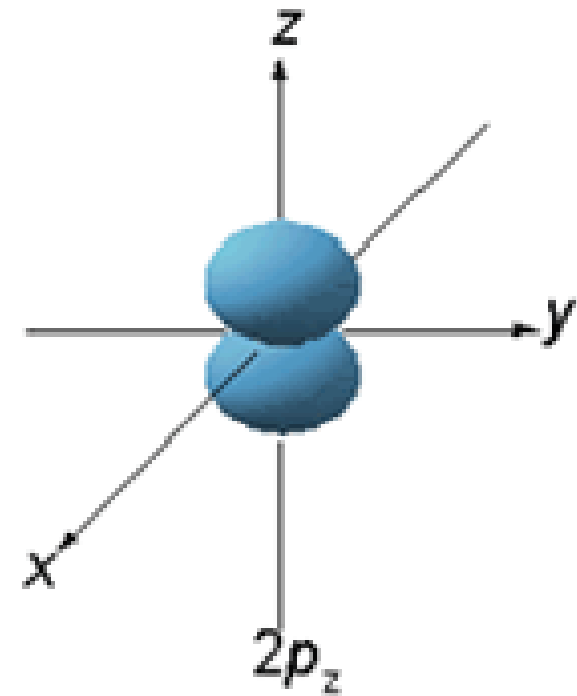
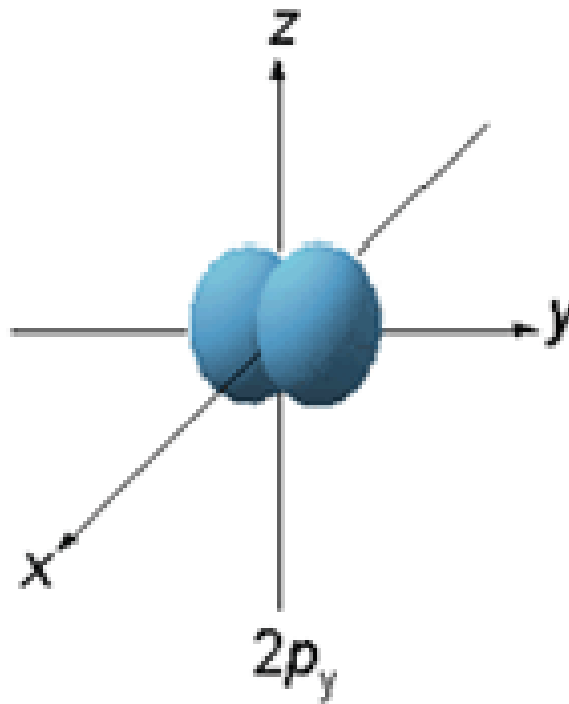
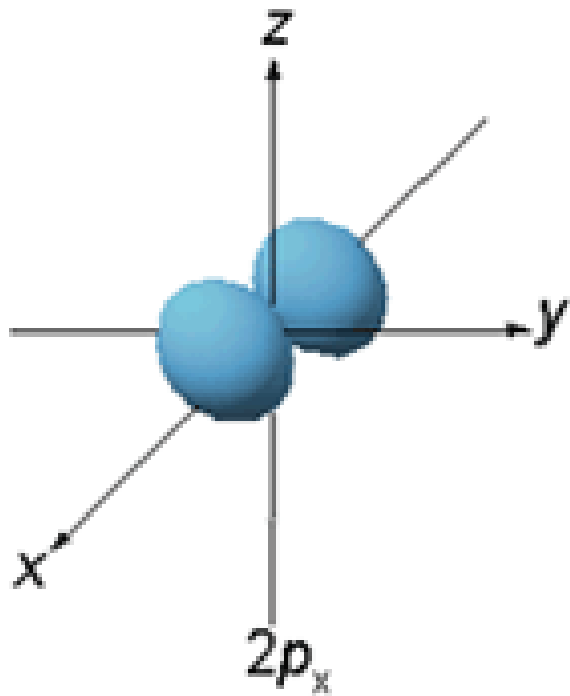
Jede Kombination der verschiedenen Quantenzahlen führt dazu, dass sich die Elektronenwolke in bestimmten Bereichen um den Atomkern lokalisiert

Elektronenwolken mit Drehimpuls $l=0$ **s-Orbitale**

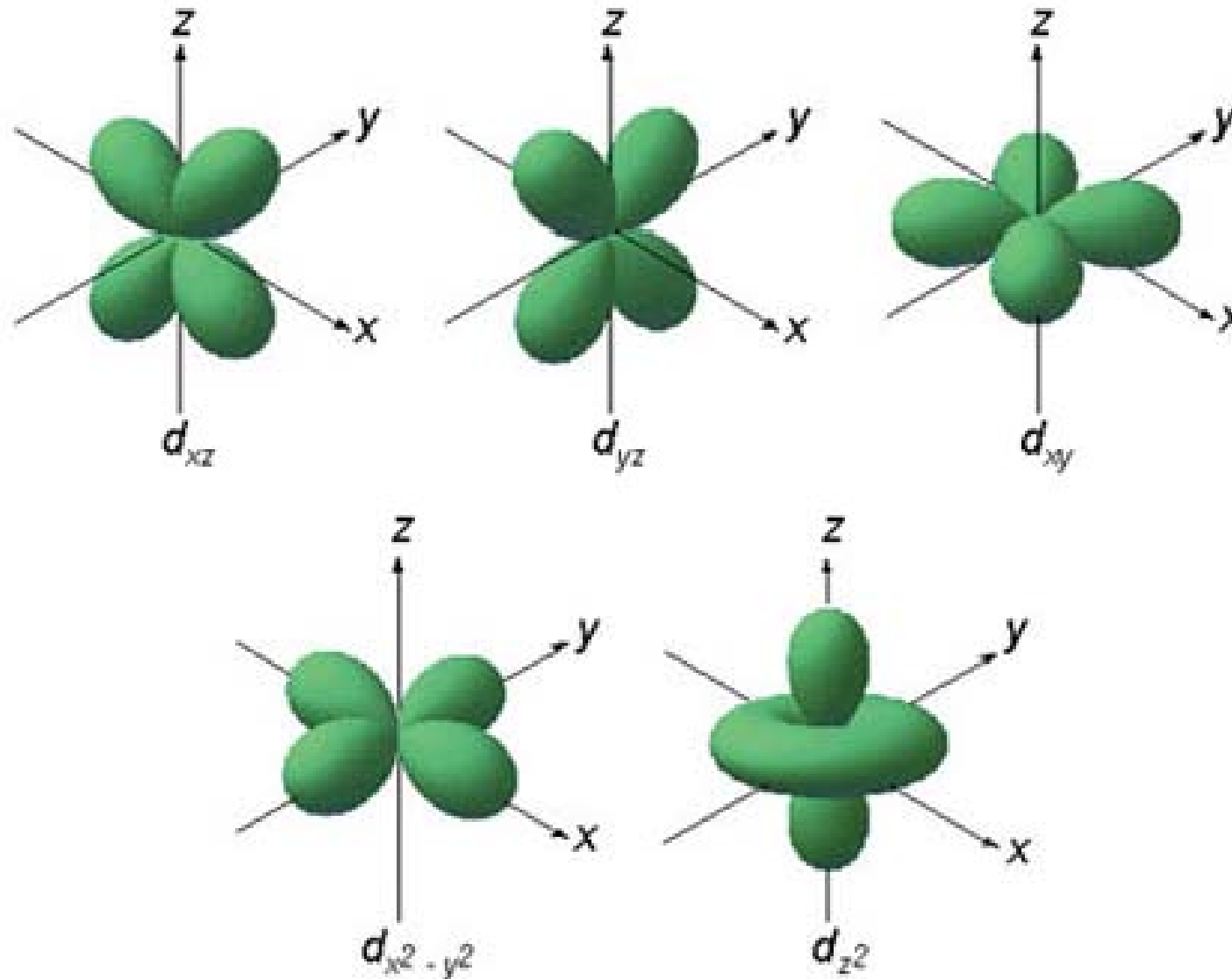
S - Orbitale



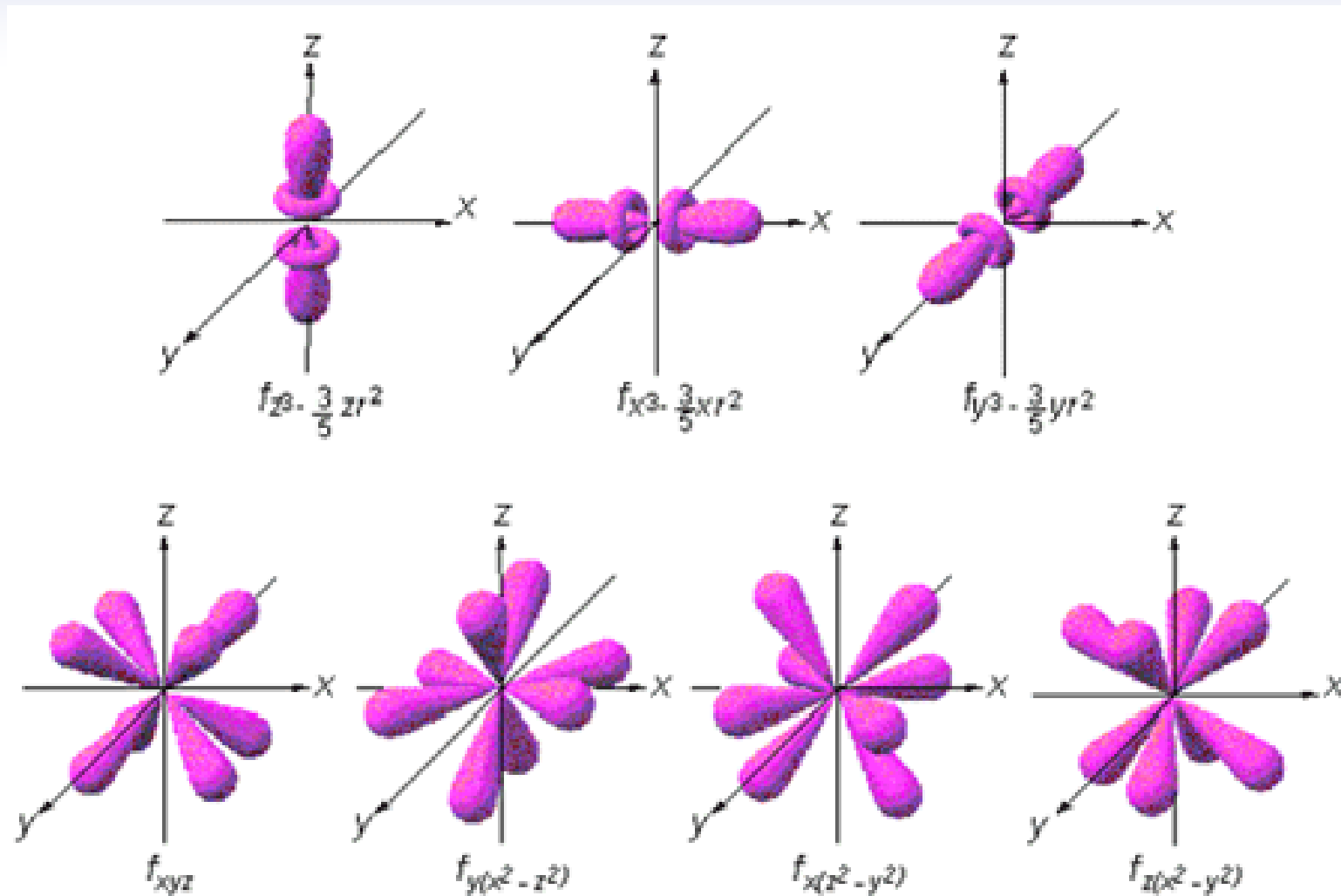
Elektronenwolken mit Drehimpuls $l=1$ **p-Orbitale**



Elektronenwolken mit Drehimpuls $l=2$ **d-Orbitale**



Elektronenwolken mit Drehimpuls $l=3$ f Orbitale



jede Jeck ist anders Elektronenwolken

	$s (l=0)$	$p (l=1)$			$d (l=2)$					$f (l=3)$						
	$m=0$	$m=0$	$m=\pm 1$		$m=0$	$m=\pm 1$		$m=\pm 2$		$m=0$	$m=\pm 1$		$m=\pm 2$		$m=\pm 3$	
	s	p_z	p_x	p_y	d_{z^2}	d_{xz}	d_{yz}	d_{xy}	$d_{x^2-y^2}$	f_{z^2}	f_{xz^2}	f_{yz^2}	f_{xyz}	$f_{z(x^2-y^2)}$	$f_{x(x^2-3y^2)}$	$f_{y(3x^2-y^2)}$
$n=1$																
$n=2$																
$n=3$																
$n=4$																
$n=5$										...	...	...	...	...	...	...
$n=6$					...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$n=7$		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

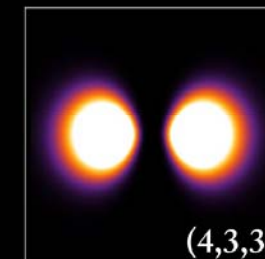
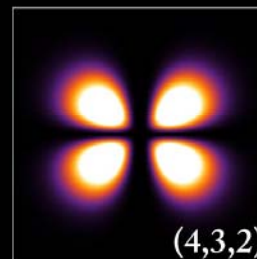
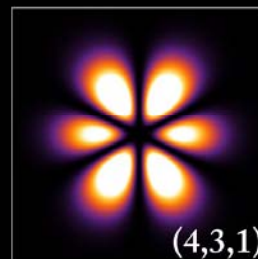
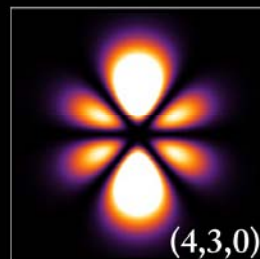
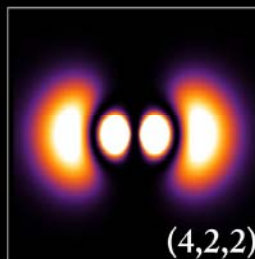
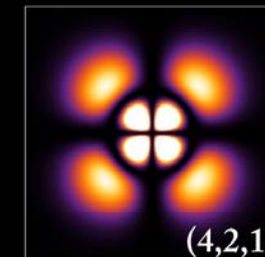
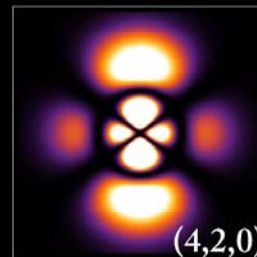
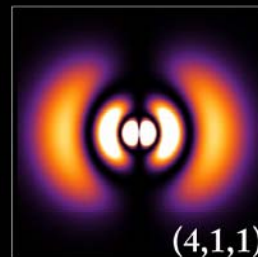
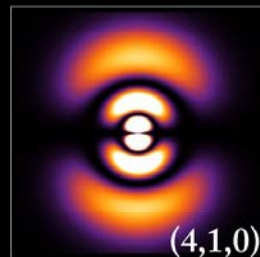
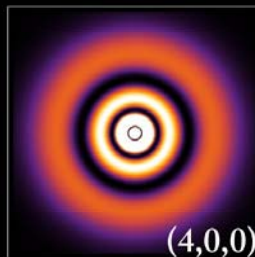
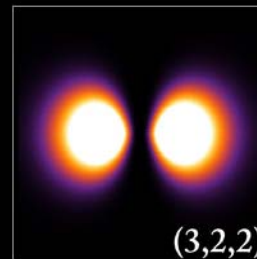
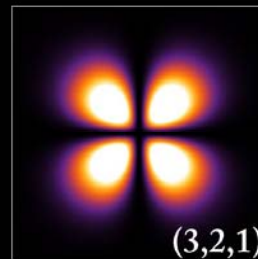
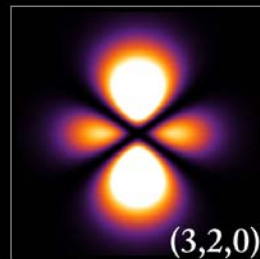
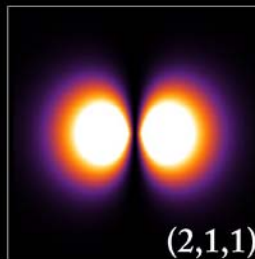
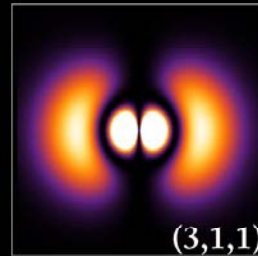
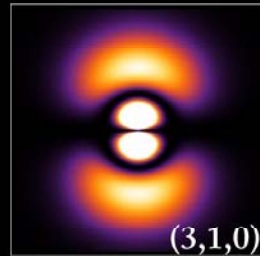
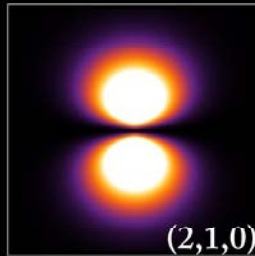
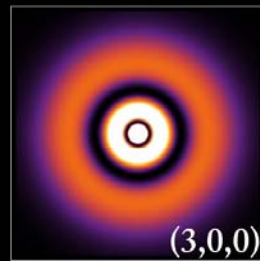
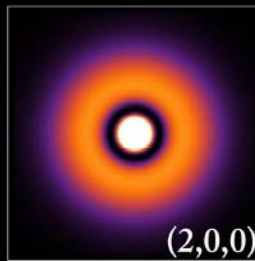
Diagnose

Werte der einzelnen Quantenzahlen bestimmen, in welchen Bereichen sich Elektronen aufhalten

Hydrogen Wave Function

Probability density plots.

$$\psi_{nlm}(r, \vartheta, \varphi) = \sqrt{\left(\frac{2}{na_0}\right)^3 \frac{(n-l-1)!}{2n[(n+l)!]}} e^{-\rho/2} \rho^l L_{n-l-1}^{2l+1}(\rho) \cdot Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$$



Thema Beyond Bohr

Aufbauprinzip



Periodensystem

Alleinstellungsmerkmal

PAULI-PRINZIP

- jedes Elektron in einem Atom befindet sich in seinem ureigenen Quantenzustand
- wenigstens eine der Quantenzahlen (Haupt-, Drehimpuls-, Spin-) ist jeweils unterschiedlich
- ein Atomorbital kann höchstens von zwei Elektronen besetzt werden,
diese unterscheiden sich NUR durch ihren Spinzustand
- Drehimpulsquantenzahlen $l=0, 1, 2, 3, 4$ werden so notiert s, p, d, f, g, ...

Notation für Elektronenschalen im Atom

Hauptquantenzahl
 $n_{QM} = 3$

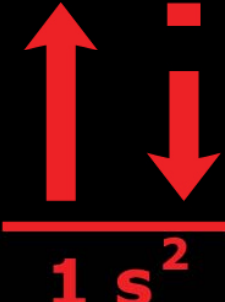
$3p^5$

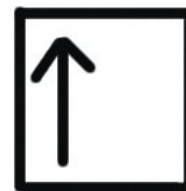
#Elektronen im Orbital

$\ell_{QM} = 1$
Drehimpuls-Quantenzahl

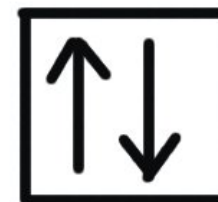
example

$$n_{QM} = 0, \ell_{QM} = 0, m_{\ell_{QM}} = 0, m_s = \pm \frac{1}{2}$$

Pau 
 $1s^2$



H



He

Extrablatt

WESTERN UNION (109)
A. N. WILLIAMS
PRESIDENT

CLASS OF SERVICE
This is a full-rate Telegram or Cablegram unless its deferred character is indicated by a suitable symbol above or preceding the address.

SYMBOLS
DL = Day Letter
NL = Night Letter
LC = Deferred Cable
NLT = Cable Night Letter
Ship Radiogram

1203

NZ252 INTL=CD STOCKHOLM VIA RCA 25 15 2020 1945 NOV 15 PM 8 12
1945 NOV 15 TIME and point of destination

PROFESSOR WOLFGANG PAULI PRINCETON UNIVERSITY=
PRINCETON NJ=

ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCE HAS AWARDED YOU THE NOBEL
PRIZE IN PHYSICS 1945 STOP LETTER FOLLOWS=
WESTGREN SECRETARY.

1945

THE COMPANY WILL APPRECIATE SUGGESTIONS FROM ITS PATRONS CONCERNING ITS SERVICE

The Nobel Prize in Physics 1945 was awarded to Wolfgang Pauli for the discovery of the Exclusion Principle, also called the Pauli Principle



Periodensystem Aufbauprinzip der Elemente

$$\text{Anzahl möglicher Zustände} \\ \text{Spin} \left(\begin{matrix} 2\ell + 1 \\ \text{magnetische Quantenzahl} \end{matrix} \right)$$

example

mögliche Quantenzahlen für
Elektronen in p -Orbital

$$n_{QM} = 1,$$

$$\ell_{QM} = 1,$$

$$m_{\ell_{QM}} = 0, \pm 1$$

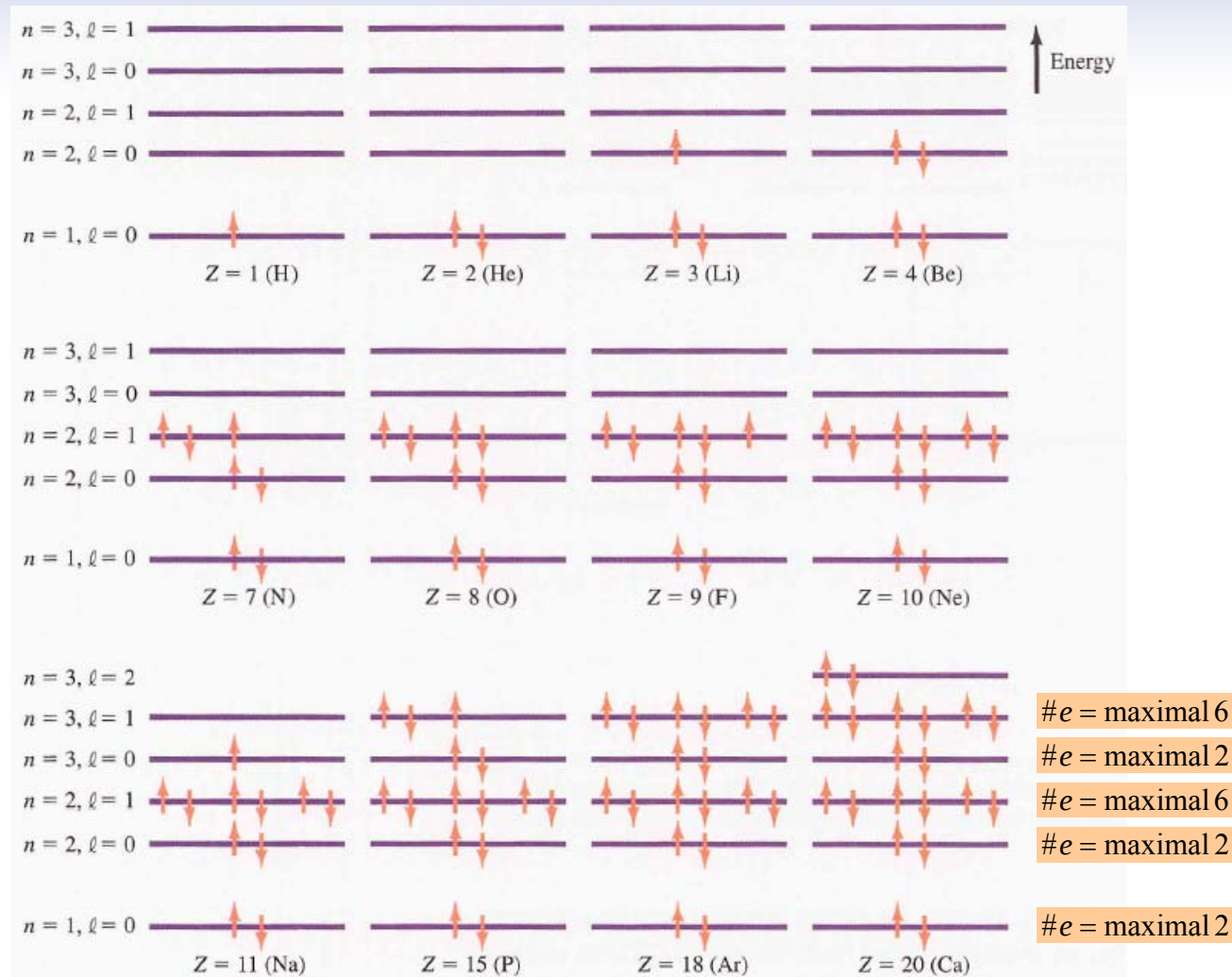
$$m_s = \pm \frac{1}{2}$$

	Anzahl Elektronen	1s	2s	2p	3s	3p	4s
H	1	1s ¹					
He	2	1s ²					
Li	3	1s ²	2s ¹				
Be	4	1s ²	2s ²				
B	5	1s ²	2s ²	2p ¹			
C	6	1s ²	2s ²	2p ²			
Ne	10	1s ²	2s ²	2p ⁶			
Na	11	1s ²	2s ²	2p ⁶	3s ¹		
Mg	12	1s ²	2s ²	2p ⁶	3s ²		
Al	13	1s ²	2s ²	2p ⁶	3s ²	3p ¹	
Ar	18	1s ²	2s ²	2p ⁶	3s ²	3p ⁶	
K	19	1s ²	2s ²	2p ⁶	3s ²	3p ⁶	4s ¹
Ca	20	1s ²	2s ²	2p ⁶	3s ²	3p ⁶	4s ²

Konvention

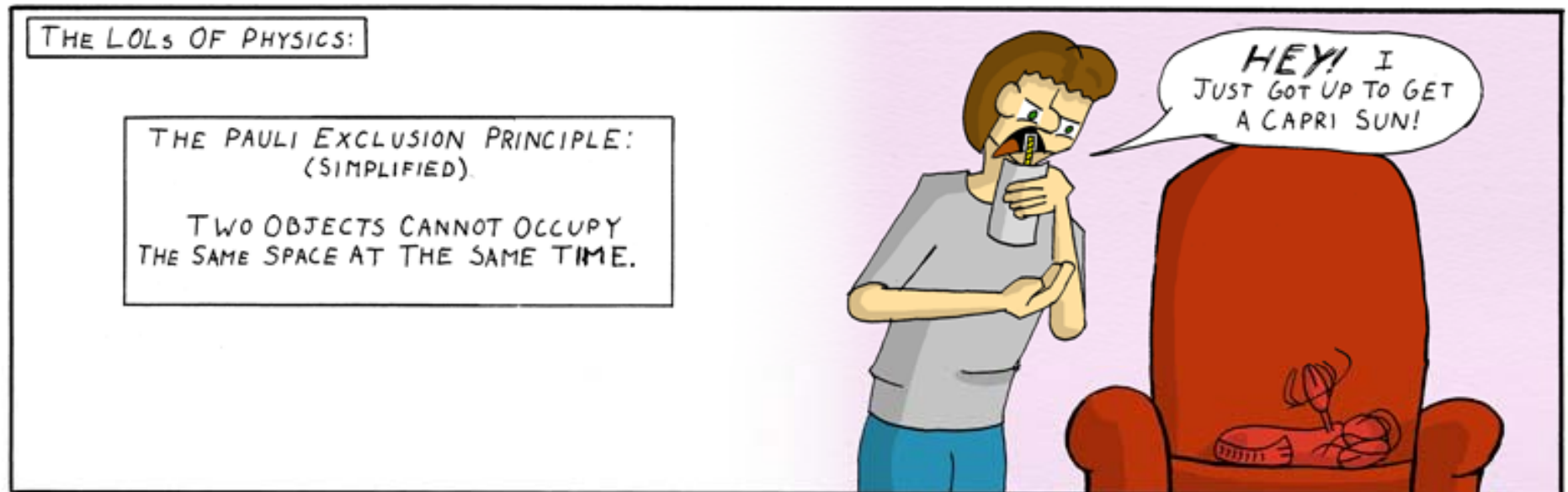
$$\ell_{QM} = \begin{cases} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & \dots \\ s & p & d & f & g & \dots \end{cases}$$

Pauli-Aufbauprinzip Periodensystem der Elemente



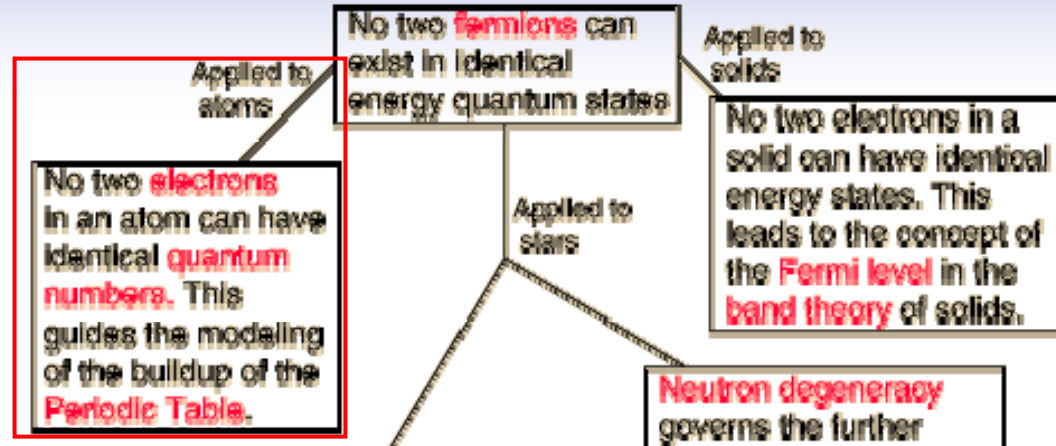
Diagnose
Quantenzahlen bestimmen,
wie und mit wieviel Elektronen die einzelnen Zustände im Atom besetzt werden können

Pauli-Prinzip



Yet Another Web Comic
22 July 2009

Auswirkung Elemente Pauli-Prinzip



PERIODIC TABLE OF Disney

1 H HIRO	2 He HADES																
3 Li LILO	4 Be BELLE	5 B BOLT	6 C CINDERELLA	7 N NALA	8 O OLAF	9 F FLOUNDER	10 Ne NEMO										
11 Na NAKOMA	12 Mg MOTHER GOOSE	13 Al ALADDIN	14 Si SILVERMIST	15 P PETER PAN	16 S STITCH	17 Cl CLEO	18 Ar ABEL										
19 K KUZZO	20 Ca CASEY JUNIOR	21 Sc SCAR	22 Ti TIANA	23 V VANELLOPE	24 Cr CHRISTOPHER ROBIN	25 Mn MULAN	26 Fe FERDINAND THE BULL	27 Co COPPER	28 Ni NIGHTMARE BEFORE CHRISTMAS	29 Cu CUBBY	30 Zn ZARINA	31 Ga GASTON	32 Ge GEPETTO	33 As ARCHIMEDES	34 Se SEBASTIAN	35 Br BERLIOZ	36 Kr KRONK
37 Rb ROBIN HOOD	38 Sr SHERE KHAN	39 Y YZMA	40 Zr ZURU	41 Nb NEVERBEAST	42 Mo MOANA	43 Tc TOKO BROWLAW TRANSFORMATION CENTER	44 Ru RUFUS	45 Rh RHINO	46 Pd PERDITA	47 Ag ABIGAIL GABLE	48 Cd CRUELLA DE VIL	49 In INDIANA JONES ADVENTURE	50 Sn SHENZI	51 Sb SLEEPING BEAUTY	52 Te TERK	53 I IAGO	54 Xe XERXES
55 Cs CALIFORNIA SCREAMIN'	56 Ba BAMBI	57-71 57-71	72 Hf HEFFALUMP	73 Ta TARZAN	74 W WALT	75 Re ROXANNE	76 Os OSWALD	77 Ir IRIDESSA	78 Pt PIGLET	79 Au AURORA	80 Hg HUGO	81 Tl TIGER LILY	82 Pb POOH BEAR	83 Bi BOB IGER	84 Po POCAHONTAS	85 At ATLANTIS	86 Rn RAPUNZEL
87 Fr FROZEN	88 Ra RABBIT	89-103 89-103	104 Rf RAFIKI	105 Db DUMBO	106 Sg SCROOGE McDUCK	107 Bh BABY HENKMAN	108 Hs HEADLESS HORSEMAN	109 Mt MITTENS	110 Ds DUCHESS	111 Rg ROGER RABBIT	112 Cn CLAYTON	113 Uut SCUTTLE	114 Fl FLYNN RIDER	115 Uup UP	116 Lv LAVERNE	117 Uus URSULA	118 Uuo STICK TO THE STATUS QUO
89 La LAUNCHPAD McQUINN	90 Ce CAPTAIN EO	91 Pr PRINCESS	92 Nd NEGADUCK	93 Pm PUMBAA	94 Sm SIMBA	95 Eu EUDORA	96 Gd GOOD DINOSAUR	97 Tb TINKER BELL	98 Dy DAIST DUCK	99 Ho CAPTAIN HOOK	100 Er ERIC	101 Tm TIHON	102 Yb YACHT CLUB	103 Lu LUCIFER			
90 Ac ARISTOCATS	91 Th THUMPER	92 Pa PASCAL	93 U UNCLE WALT	94 Np NANI PELICKAI	95 Pu PLUTO	96 Am AMERICA SINGS	97 Cm CAST MEMBERS	98 Bk BAKER	99 Cf CHI-FU	100 Es ESMERALDA	101 Fm FIGMENT	102 Md MELINDA	103 No NAPOLSEAN THE BLOODHOUND	104 Lr LUMIERE			

OH MY
DISNEY

The Elements

The Elements

This image is a periodic table of elements, where each element's cell contains a representative image. The elements are arranged in rows and columns, with their symbols and names visible. The title "The Elements" is prominently displayed at the top center.

The periodic table includes elements from Hydrogen (H) to Oganesson (Og). Each element's cell typically shows a small image of the element, its symbol, and its name. The elements are color-coded by groups: alkali metals (blue), alkaline earth metals (orange), transition metals (various shades of blue and green), metalloids (purple), nonmetals (yellow and red), and noble gases (pink).

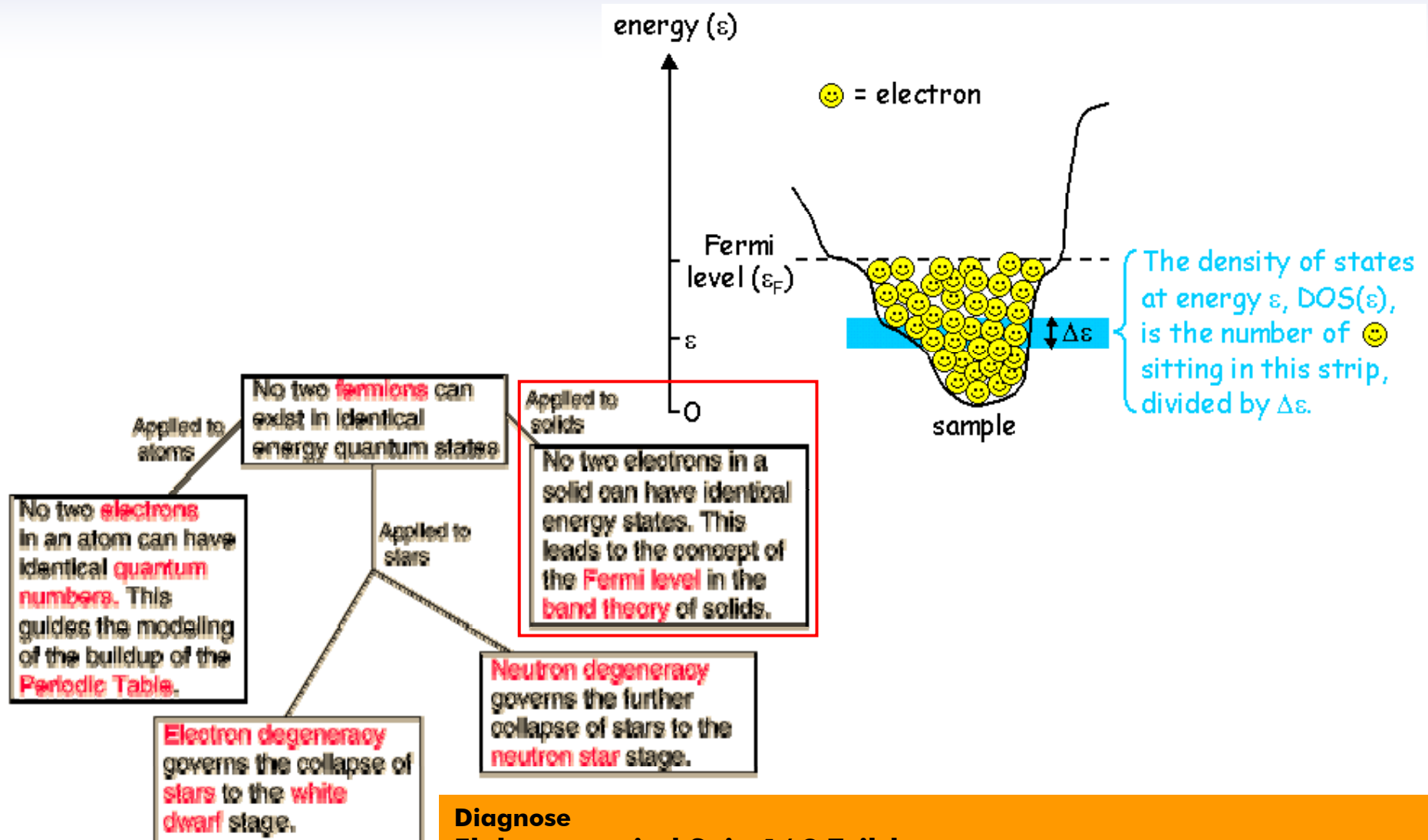
Key features of the periodic table include:

- Groups:** Elements are organized into vertical columns, each representing a group with similar chemical properties.
- Periods:** Elements are organized into horizontal rows, each representing a period.
- Metals and Nonmetals:** The table is divided into metals (left side) and nonmetals (right side), with metalloids in between.
- Noble Gases:** The last column of the periodic table, consisting of elements with full outer shells, is highlighted in pink.
- Radioactive Elements:** Elements with atomic numbers greater than 82 (Lead) are marked with a radiation symbol, indicating they are radioactive.

The periodic table is a fundamental tool in chemistry, used to understand the properties and relationships of the elements.

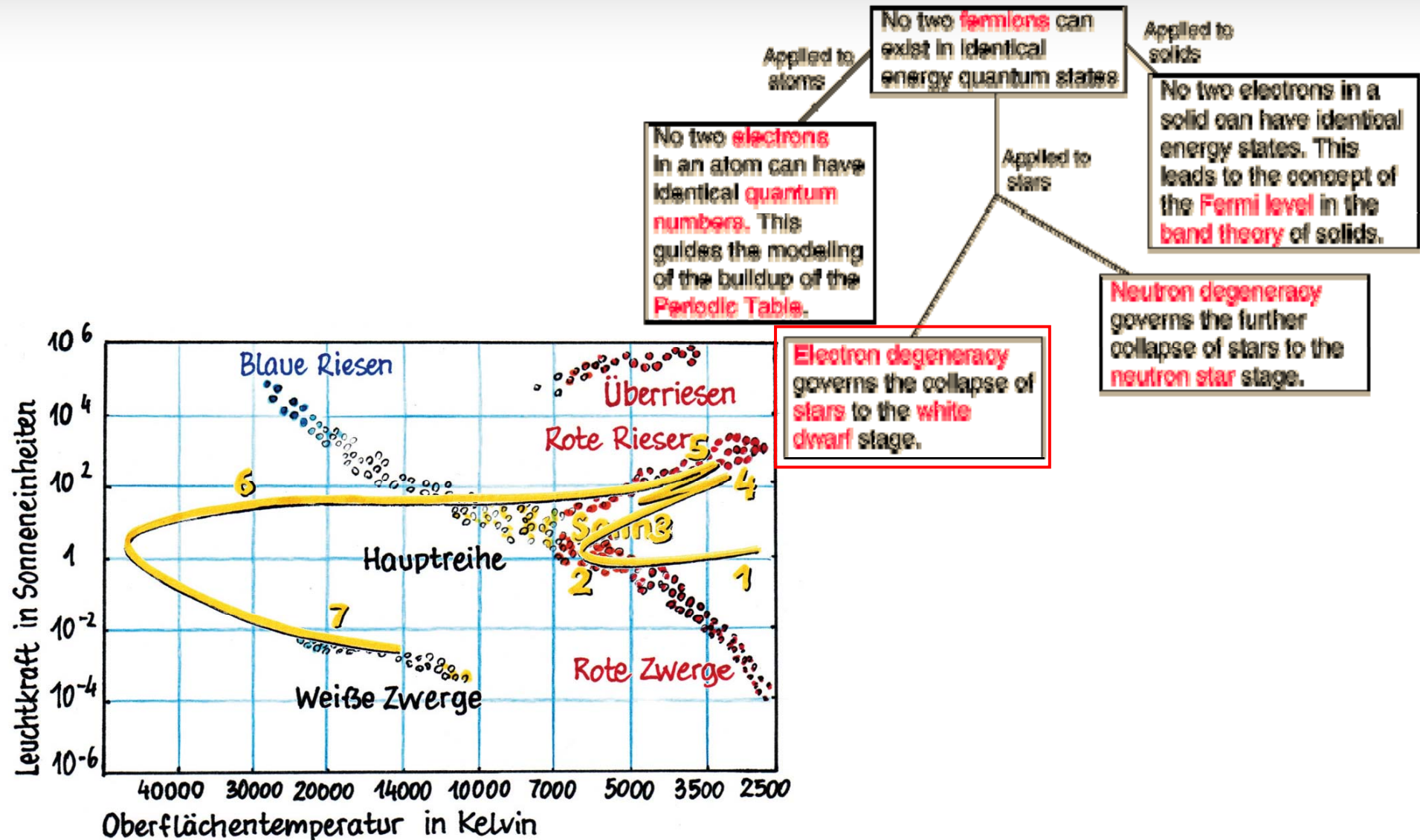
Auswirkung Festkörperphysik

Pauli-Prinzip



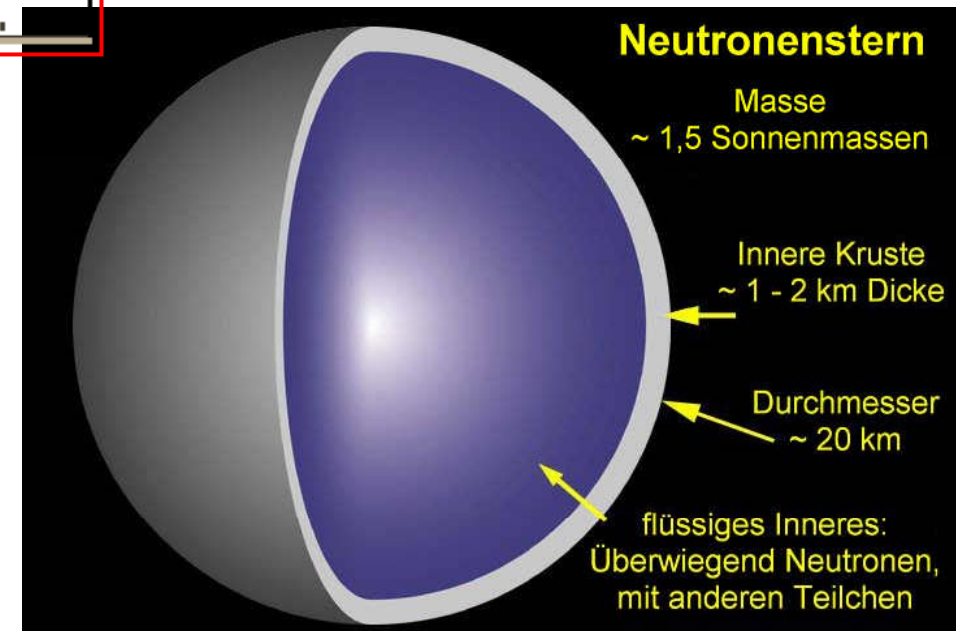
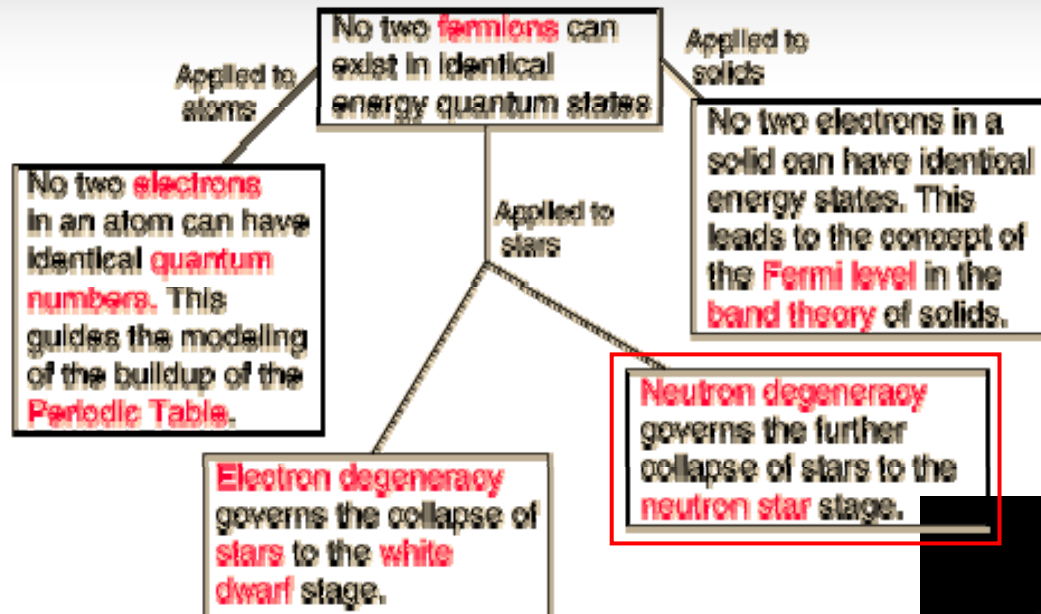
Auswirkung Weißer Zwerg

Pauli-Prinzip



Auswirkung Neutronenstern

Pauli-Prinzip

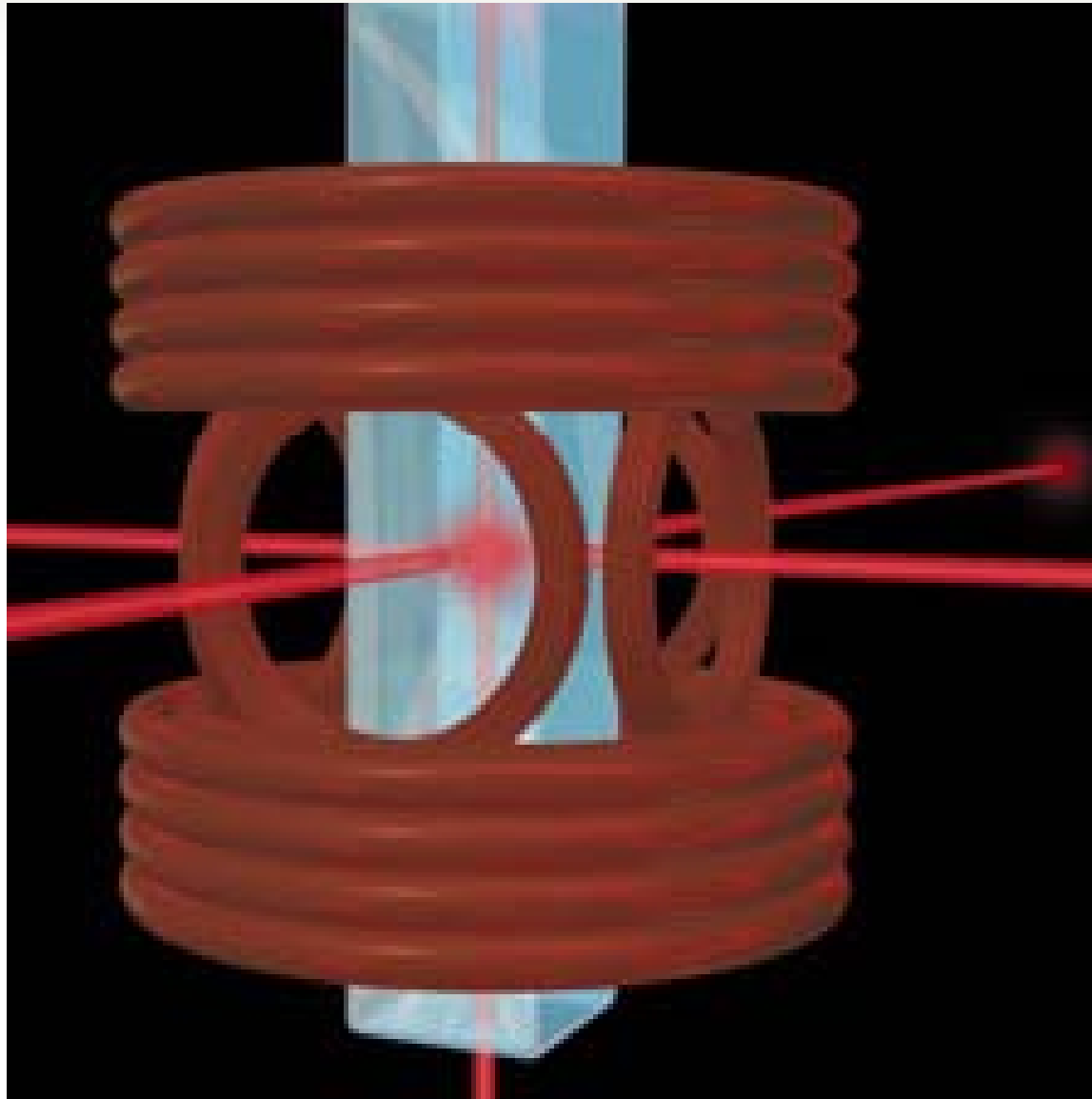


Diagnose
Neutronen sind Spin 1/2 Teilchen

Thema Beyond Bohr

Bose-Einstein Kondensation

Ausflug in die aktuelle Forschung

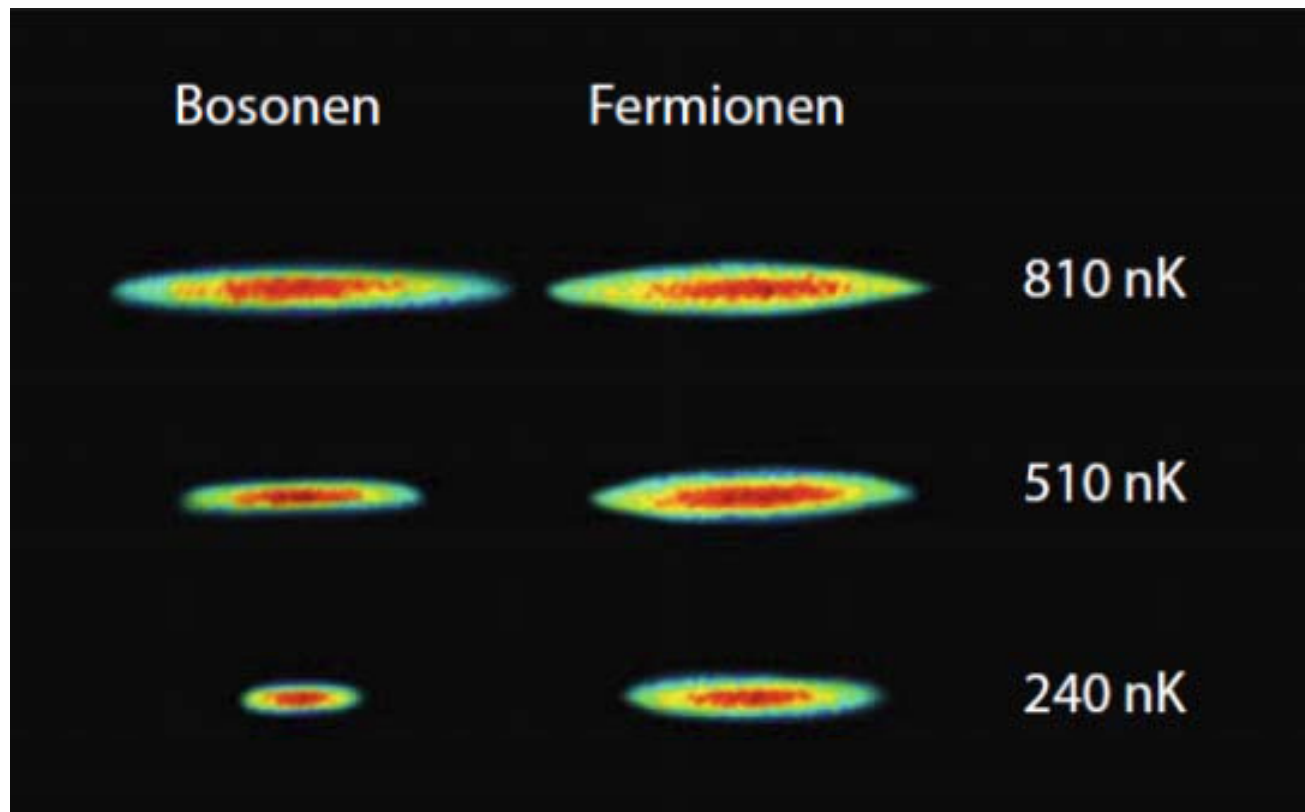


Pauli-Prinzip

Bosonen vs Fermionen

Symptome

- Fermionen sind Teilchen mit halbzahligem Spin (Elektronen, Protonen, Neutronen, Quarks)
- Bosonen sind Teilchen mit ganzzahligem Spin
Photon, ^2H (gerade Nukleonenzahl), ^4He (Suprafluidität), Cooper-Paare (Supraleitung)



Diagnose

- Wolken aus Bosonen und Fermionen verhalten sich bei Abkühlung unterschiedlich
- Fermionen halten aufgrund des Pauli-Prinzips größere Abstände ein

Bose-Einstein Kondensation (BEC)

1924

- Bose liefert Interpretation des Planckschen Strahlungsgesetzes für Photonengas
- Gas identischer Partikel in der statt Teilchen die Quantenzustände statistisch verteilt sind

1924

- Einstein verallgemeinert Theorie zur *Quantentheorie des idealen einatomigen Gases*
- **Kondensation Bose-Gas in tiefsten Grundzustand, wenn unterhalb kritischer Temperatur T_{BEC}**

1938

- Kapitza, Allan, Misener entdecken Superfluidität von flüssigem Helium
- London identifiziert Superfluidität als Manifestation von BEC

1941

- Landau beschreibt elementare Anregungen für stark wechselwirkendes Bose-Gas ^4He

1947

- Bogoliubov stellt mikroskopische Theorie für wechselwirkendes Bose-Gas vor

1961

- Gross-Pitaevskii Gleichung zur Beschreibung schwach wechselwirkendes Bose-Gas

1995

- Cornell und Wieman kühlen ^{87}Rb Atomwolke auf 170 nK ab
- Bradley beobachtet erstes BEC an ^7Li
- Ketterle beobachtet BEC an ^{23}Na

1997

- Nobelpreis an Chu, Cohen-Tannoudji und Phillips für die Entwicklung der Laserkühlung

2001

- Nobelpreis an Cornell, Wieman und Ketterle für experimentellen Nachweis von BEC



Steven Chou war US-Energieminister von 2009 bis 2013

The Nobel Prize in Physics 1997 was awarded jointly to Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji and William D. Phillips for development of methods to cool and trap atoms with laser light



Ein Kühltank für Bosonen

deBroglie vs Temperatur

Analyse 1

Wie hängt deBroglie Wellenlänge von gewählter Temperatur des Bose-Gases ab

deBroglie Materiewelle

$$\lambda_{\text{deBroglie}} = \frac{h}{m_{\text{atom}} v_{\text{atom}}}$$

$$v_{\text{atom}}^2 = \frac{h^2}{m_{\text{atom}}^2 \lambda_{\text{de Broglie}}^2}$$



Kinetische Energie im idealen Gas

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_{\text{atom}} v_{\text{atom}}^2 = \frac{3}{2} k_B T_K$$

$$v_{\text{atom}}^2 = \frac{3k_B T_K}{m_{\text{atom}}}$$

Wellenlänge · Temperatur entscheidend

$$\lambda_{\text{de Broglie}} T_K = \frac{h^2}{3k_B m_{\text{atom}}}$$

Diagnose

- Produkt aus deBroglie Wellenlänge und Temperatur ergibt sich Produkt aus Naturkonstanten
- hier versteckt sich möglicherweise eine fundamentale Eigenschaft der Materie



Ideales Gas

Analyse 2

Welcher Teilchenabstand ergibt sich bei gewählter Temperatur?

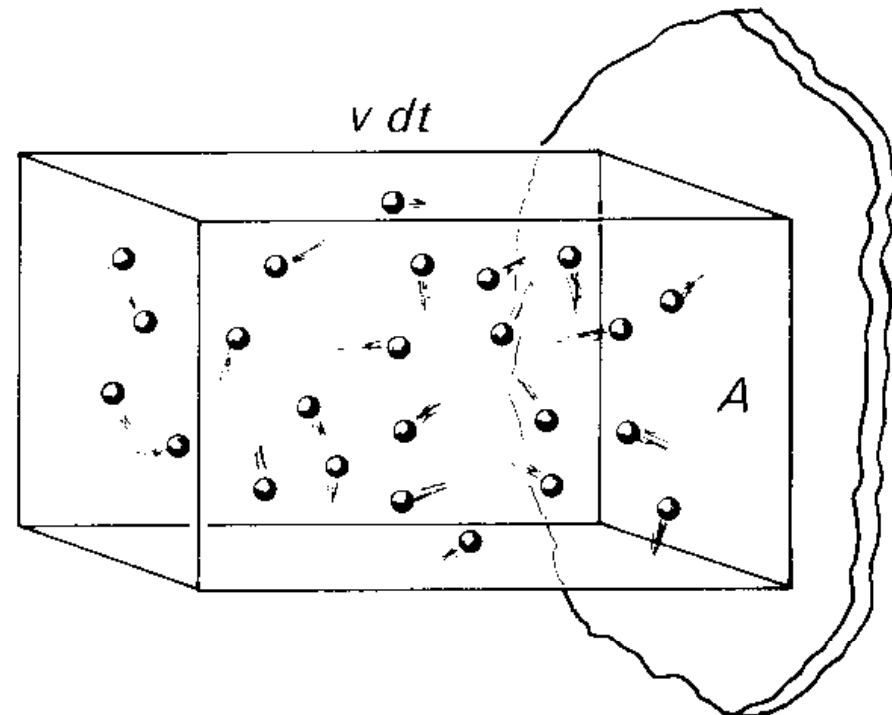
Ideales Gasgesetz

$$\underbrace{p_{cloud}}_{\text{Druck}} \underbrace{V_{cloud}}_{\text{Volumen}} = \underbrace{N_{atom}}_{\text{Anzahl Atome}} k_B T_K$$

$$p_{cloud} \frac{V_{cloud}}{N_{atom}} = p_{cloud} d_{atom}^3 = k_B T_K$$

$$d_{atom}^3 = \frac{k_B T_K}{p_{cloud}}$$

Volumen, dass jedes Atom bei gewählter Temperatur einnimmt



Diagnose

Teilchenabstand erniedrigt sich bei Abkühlung

Kritische Temperatur

$$T_{\text{BEC}}$$

Wellenlänge bei Temperatur T_K

$$\lambda_{\text{de Broglie}}^2 = \frac{h^2}{3k_B T_K m_{\text{atom}}}$$

Atomabstand im Idealen Gas

$$d_{\text{atom}} = \left(\frac{k_B T_K}{p_{\text{cloud}}} \right)^{1/3}$$

Setze Teilchenabstand im Gas gleich mit Wellenlänge der Materiewelle

$$\lambda_{\text{de Broglie}}^2 = \frac{h^2}{3k_B T_{\text{BEC}} m_{\text{atom}}} = \left(\frac{k_B T_{\text{BEC}}}{p_{\text{cloud}}} \right)^{2/3} = (d_{\text{atom}})^2$$

$$T_{\text{BEC}}^{5/2} = \frac{h^2 p_{\text{cloud}}^{2/3}}{3k_B^{5/3} m_{\text{atom}}}$$

$$T_{\text{BEC}} = \frac{1}{k_B} \left(\frac{h^2 p_{\text{cloud}}^{2/3}}{3m_{\text{atom}}} \right)$$

kritische Temperatur für Überlapp Materiewellen

typische Druckverhältnisse

$$p \approx 10^{-10} \text{ Pa}$$

$$m_{\text{Rb}} = 85 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Masse eines Rubidium Atoms

Diagnose

- bei T_{BEC} geht Atomwolke in neuen Materiezustand über genannt **BOSE-EINSTEIN KONDENSAT**
- Atome kondensieren ohne Anziehungskräfte und sind nur durch Quantenphysik getrieben

Bose-Einstein Kondensation

Kritische Temperatur

Symptome

- **Pauli-Prinzip gibt NUR für Teilchen mit Gesamtspin 1/2**
- **im Gegensatz zu Fermionen können alle Bosonen in tiefsten Zustand relaxieren**
- **Besetzung von Quantenzuständen in Bose-Gas folgt spezieller Bose-Einstein Statistik**

Für Bosonen gilt die Bose–Einstein Statistik

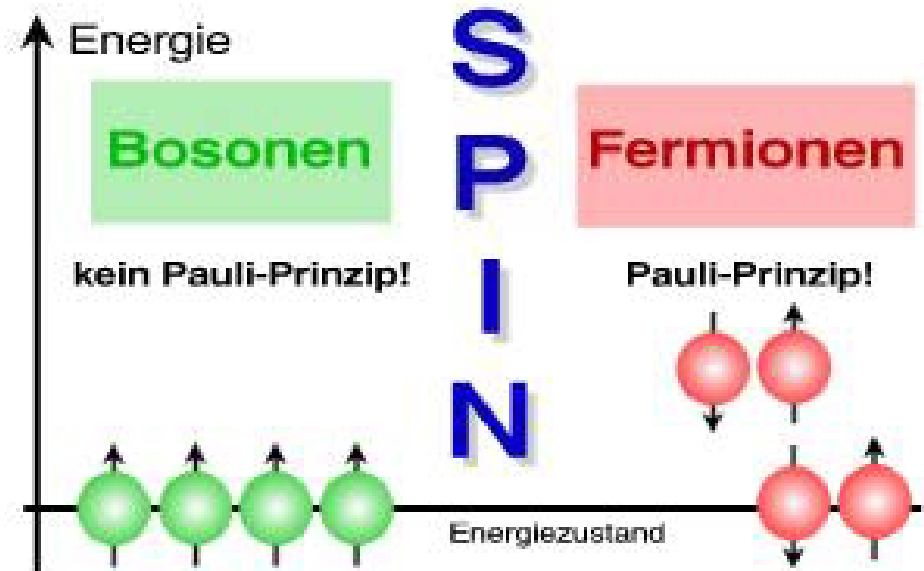
$$n_{\text{Bose-Einstein}}(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - \mu_{\text{chem}}}{k_B T_K} - 1\right)}$$

Wahrscheinlichkeit, dass Teilchen Energie E hat

μ_{chem} : Chemisches Potenzial

Kritische Temperatur zur Erreichung BEC

$$T_{\text{BEC}} = \frac{2\pi}{(2.6124)^{2/3}} \frac{\hbar^2}{k_B m_{\text{atom}}} \left(\frac{N_{\text{atom}}}{V}\right)^{2/3}$$



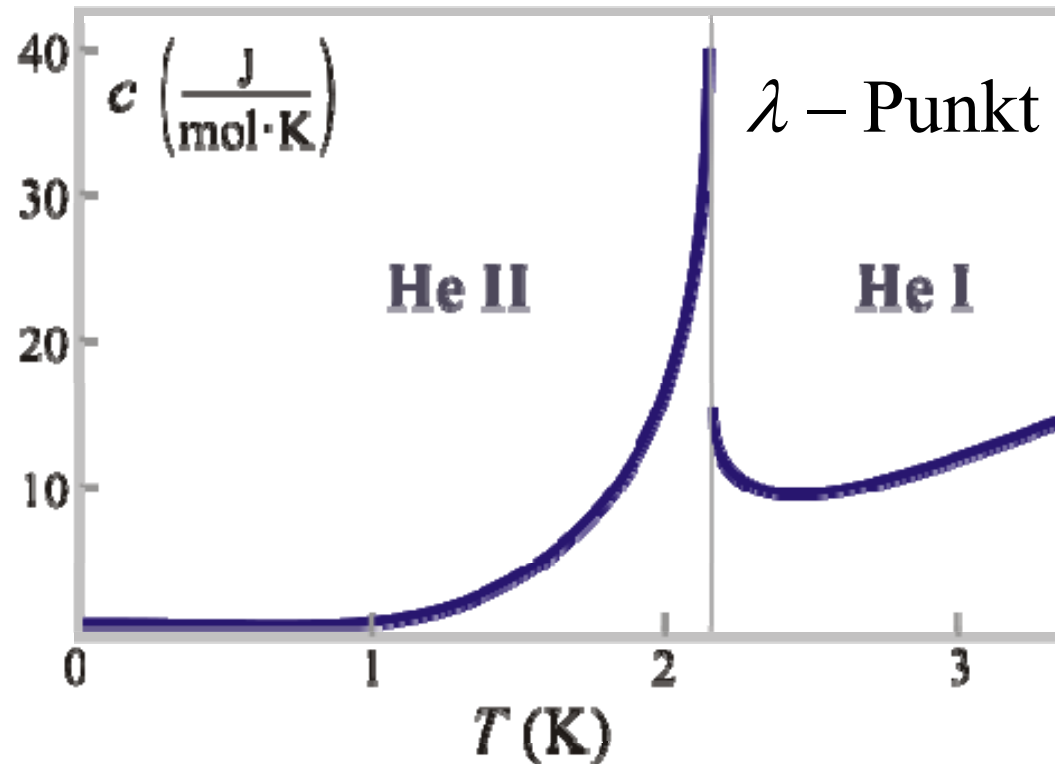
Diagnose

- **Unterhalb kritischer Temperatur entspricht deBroglie Wellenlänge mittlerem Teilchenabstand**
- **Entstehung EINER großen kohärenten Materiewelle**
- **einzelne Teilchen können nicht mehr individuell aufgelöst werden**
- **Temperatur und Dichte hängen stark voneinander ab**

Supraflüssigkeit Helium-4

Symptome

Suprafluides ^4He wird als Helium-II und normalfluides als Helium-I bezeichnet

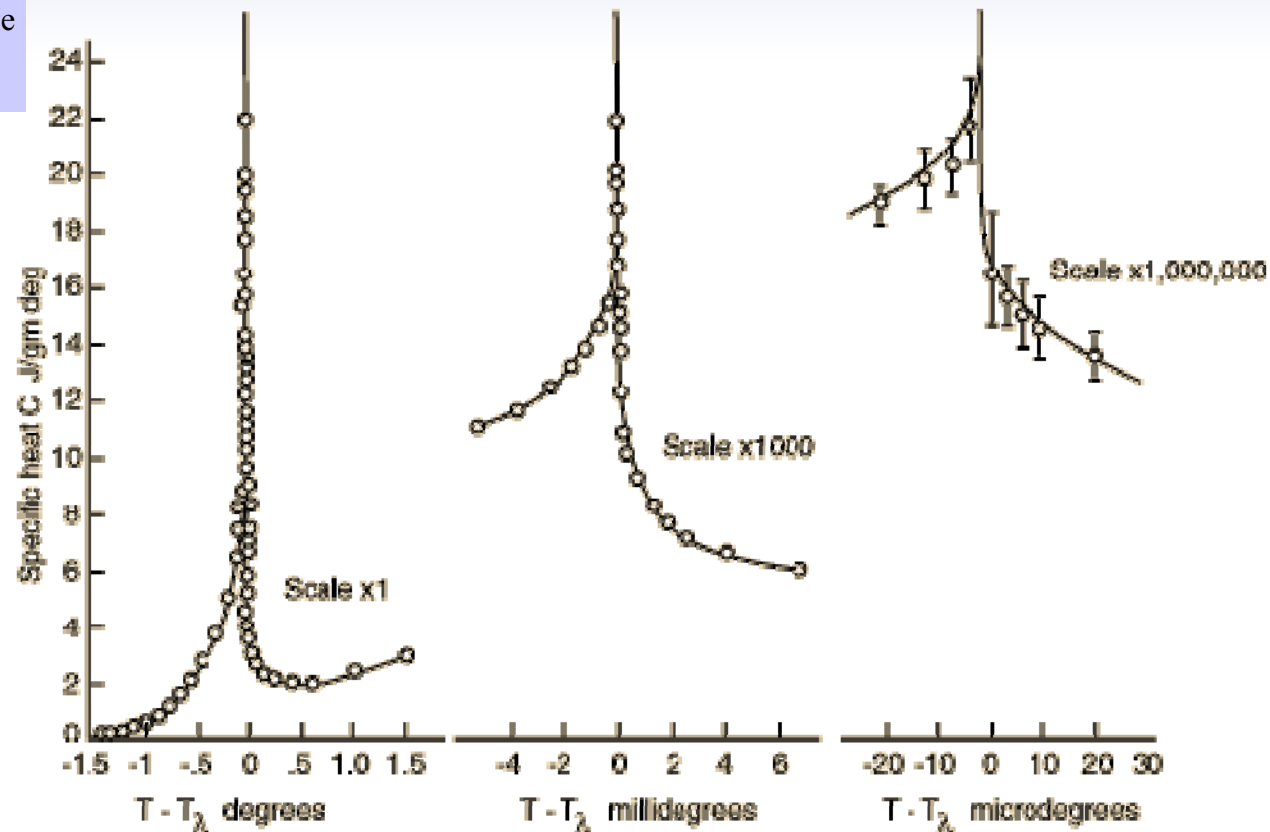


Diagnose

- nahezu ideale Wärmeleitfähigkeit der Flüssigkeit durch Effekt des Zweiten Schalls
- bei Drehung der Flüssigkeit bilden sich quantisierte mechanische Wirbel
- bei hoher Wirbeldichte ordnen sich Wirbel in regelmäßigen hexagonalen Gitter an
- in Supraflüssigkeit sind Springbrunnen nicht zu stoppen (Fountain-Effekt)
- Flüssigkeits-Pegel stellen sich in Nachbargefäßen auf gleiche Höhe ein (Onnes-Effekt)

Supraflüssigkeit Helium-4

Lambdapunkt von ^4He
 $T_\lambda = 2.17 \text{ K}$



Diagnose

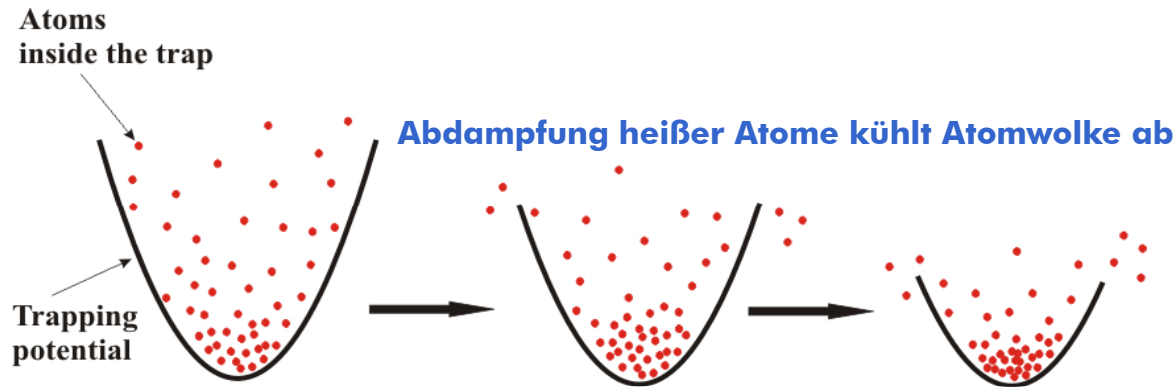
- unterhalb kritischer Temperatur (Lambdapunkt) geht Helium-4 in supraleitende Phase über
- Verhalten bei tieferen Temperaturen wird durch 2-Fluid-Modell beschrieben
- normalflüssige und supraflüssige Phase existieren nebeneinander
- je tiefer die Temperatur, desto höher wird der Anteil Supraflüssigkeit
- bei $T=0\text{K}$ ist gesamte Flüssigkeit supraflüssig

Bose-Einstein Kondensation in Atomgasen

Kondensat-Wolke

Symptome

Anzahl Atome in Kondensatzustand steigt mit immer tieferer Temperatur unterhalb T_{BEC}



BEC vs Non-BEC Atome in Atomwolke

$$\frac{N_{BEC}}{N_{\text{all atoms}}} = 1 - \left(\frac{T_K}{T_{BEC}} \right)^{2/3}$$

für $T_K < T_{BEC}$

Typische experimentelle Bedingungen

Anzahl Atome : $N_{\text{atoms}} \approx 10^2 - 10^9$

Dichte in Atomwolke : $n_{\text{atoms}} \approx 10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

Abmessung der Atomwolke : einige $10 \mu\text{m}$

Kritische Temperatur : $500 \text{ nK} - 2 \mu\text{K}$

Kühlvorgang dauert s bis min

Erreichte Temperaturen : $T_K^{BEC} \approx 5 \text{ nK}$

Diagnose

Erst am absoluten Nullpunkt sind alle Atome der Atomwolke im Grundzustand

5.4.8gan Ar⁺ on
 Extrablatt 26.02.26 Ar⁺ off during TUF + probe

Student's Name _____ Date 48
 Subject _____ Instructor's Name _____

* TUF not clean because of the Ar⁺ beam
 → install high-power AOM to switch Ar⁺ off
 during TUF

no stabilization of Ar⁺ power
 probe 197 MHz 66 kHz
 1.7 Hz
 ~ 200 kHz
 ~ 740 kHz

5.4.8gan Ar ⁺ on	5.50.18
Ar ⁺ off during TUF + probe	5.51.22
Ar ⁺ off during TUF + probe	5.52.56
Ar ⁺ off during TUF + probe	5.53.34
Ar ⁺ off during TUF + probe	5.54.52
Ar ⁺ off during TUF + probe	5.59.37

Switch off Ar⁺ during TUF
 66 kHz 6.00.56
 TUF from 5 → 10 ms 6.01.45
 probe int x 4
 pit image defeated
 probe 197 → 182 MHz 6.02.42
 TUF 10 → 7 ms 6.03.18
 Final RF 66 kHz → 89 kHz 6.04.28
 Final RF 89 kHz 6.05.02

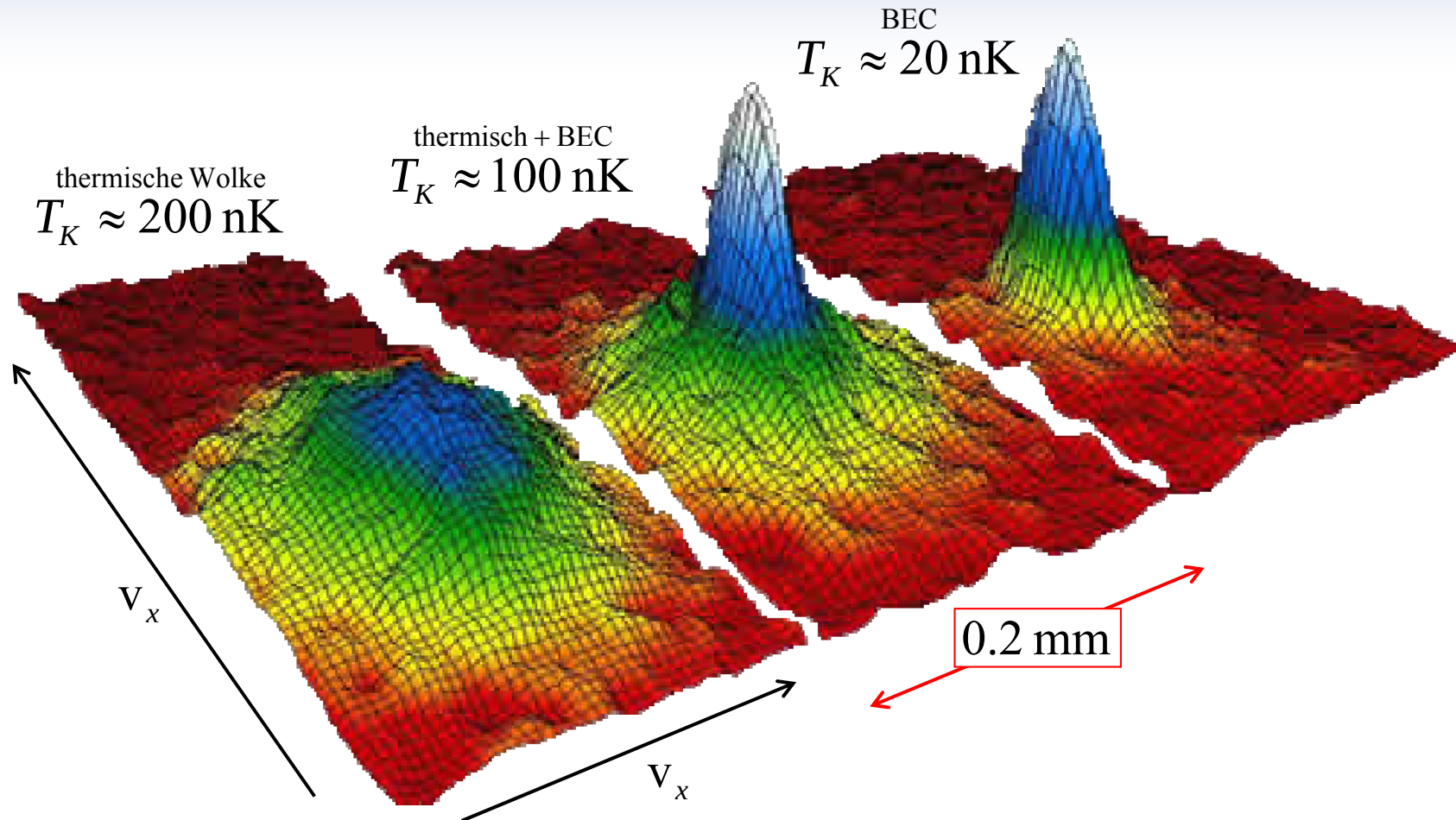
6.03.18
 6.04.28 | BEC? (?)

Klaasjan van Druten 1995-09-25

Lab book entry

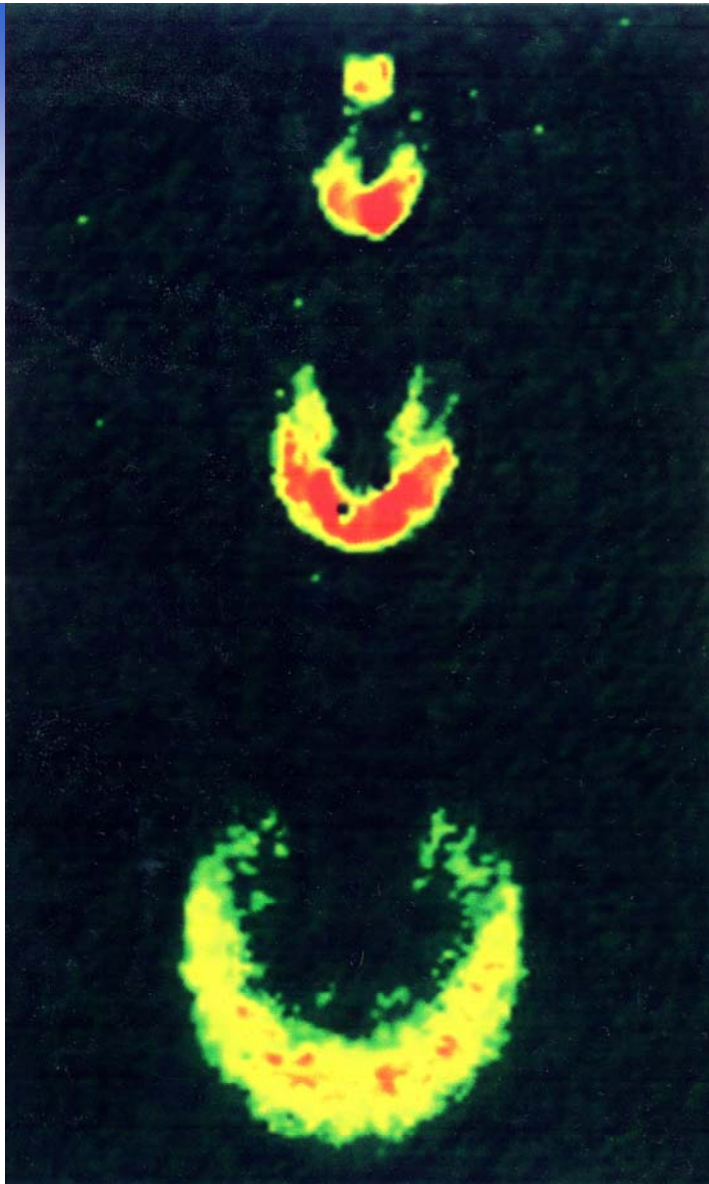
Bose-Einstein Kondensation

BEC aus 2000 ^{87}Rb



Diagnose

- charakteristische Expansionsgeschwindigkeit der Atomwolke nach Abschalten der Falle
- thermische Atome haben Maxwell-Boltzmann Geschwindigkeitsverteilung
- BEC-Atome haben nahezu identische Geschwindigkeit



Repeated release from the trap of parts of a Bose-Einstein condensate of sodium atoms. Pulses of coherent matter fall in the gravitational field – the phenomenon can be seen as an atom laser effect. The real size of the picture is 2.5 mm x 5 mm.

**The Nobel Prize in Physics 2001 was awarded jointly to
Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle and Carl E. Wieman
for the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms,
and for early fundamental studies of the properties of the condensates**