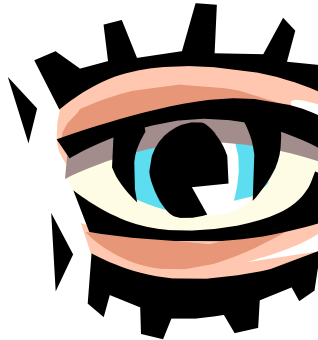


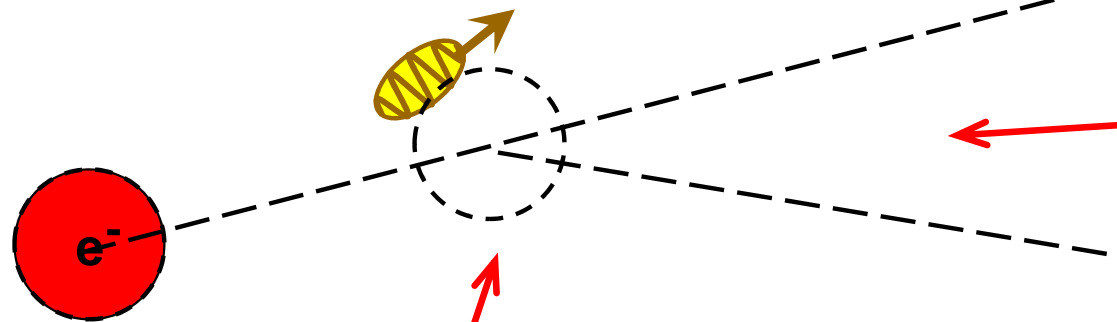
Relace neurčitosti



$$m_{kul.} \approx 1 \text{ kg}$$

$$m_X = 50 \text{ keV}c^{-2} \approx 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m_e = 511 \text{ keV}c^{-2} \approx 10^{-30} \text{ kg}$$



Zatímco hmotnost fotonu a makroskopického objektu

Po interakci elektron zcela nepředvídatelně změní velikost a směr své hybnosti.

má hmotnost srovnatelnou s hmotností elektronu. Přenos hybnosti při srážce tedy nelze zanedbat.

Při interakci vysokoenergetického fotonu s elektronem předá foton elektronu část své hybnosti.

Jak pozorujeme mikroskopické objekty?

Relace neurčitosti

Viditelné světlo : $m_\nu = 3 \text{ eV}c^{-2} \approx 6 \times 10^{-36} \text{ kg}$

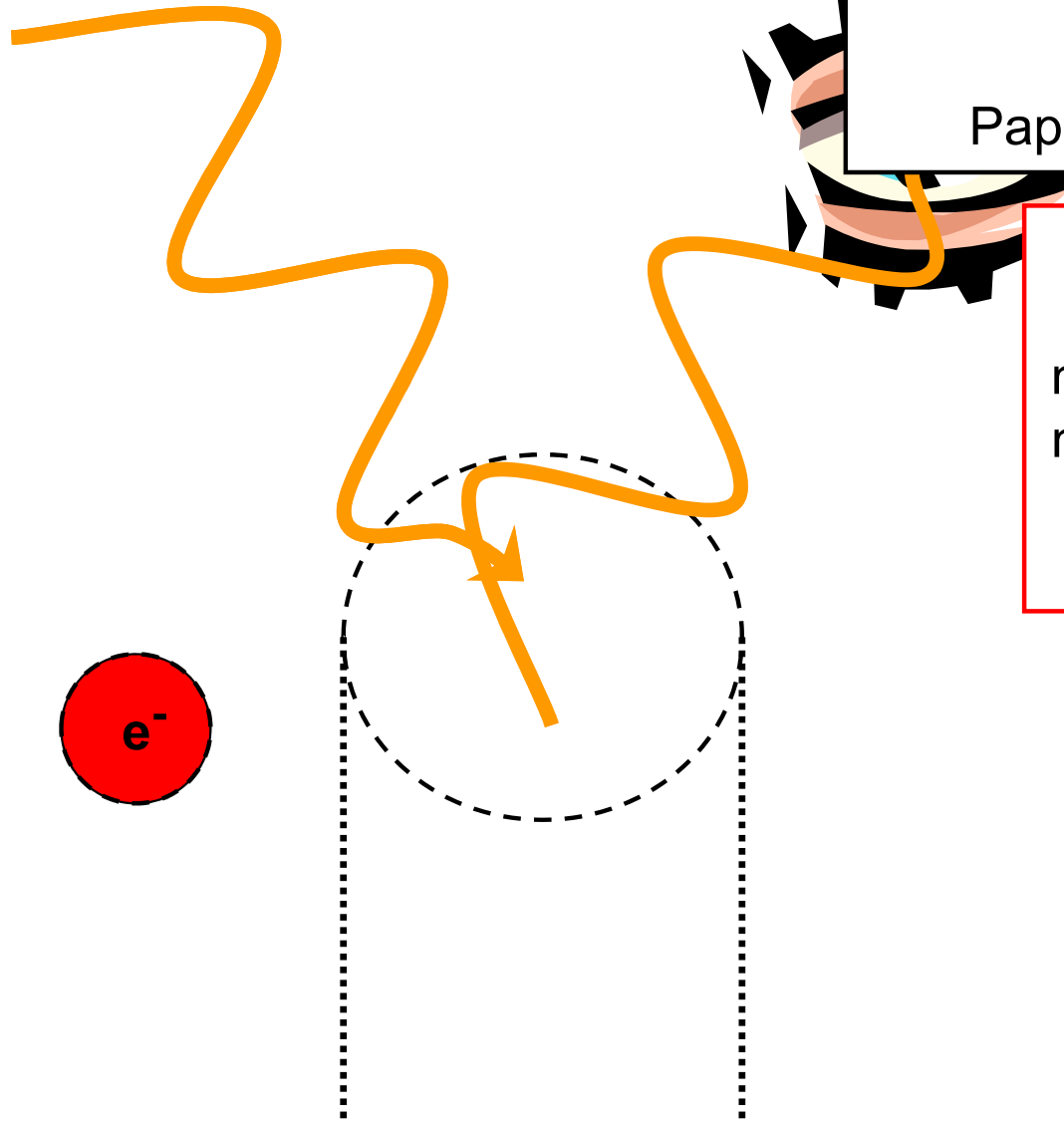
$$\lambda = 6.4 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Paprsky X : $\lambda = 2.5 \times 10^{-11} \text{ m}$

Pokud se pokusíme k určení hybnosti elektronu použít nízkoenergetický foton, narazíme na další problém : chyba v určení polohy bude rovna nejméně velikosti vlnové délky fotonu.

Po interakci je známa hybnost elektronu, ne však jeho poloha

Chyba při určení polohy je rovna minimálně vlnové délce fotonu.



Relace neurčitosti

Předchozí princip lze zobecnit, což udělal německý teoretický fyzik Werner Heisenberg roku 1927. Heisenbergovy relace neurčitosti jsou jedním ze základních kamenů kvantové fyziky.

Hybnost a polohu částice (kvanta) nelze současně určit s libovolnou přesností. Určíme-li přesně polohu, neznáme hybnost částice vůbec – a naopak. Nepřesnosti v určení hybnosti a polohy jsou spolu svázány následujícími vztahy:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h / 2\pi$$

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq h / 2\pi$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq h / 2\pi$$

operátory – dynamické proměnné komutátory



Werner K.
Heisenberg

1901 - 1976

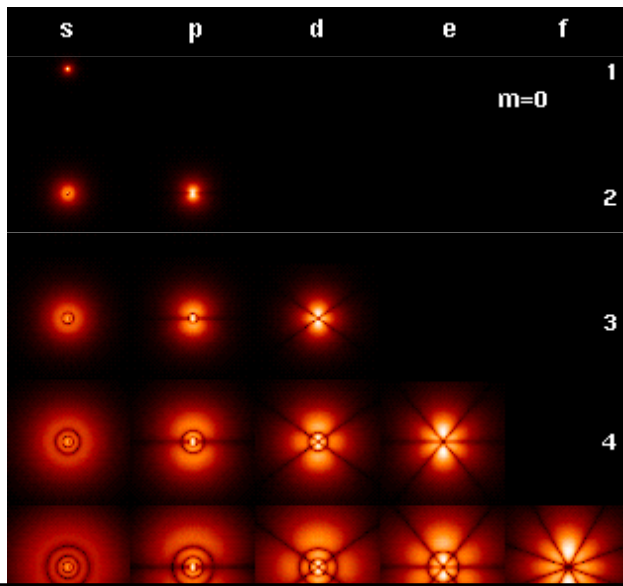
Kvantová čísla atomu vodíku

$$\psi_{nlm}(x, y, z, t)$$

Symbol	Název	Dovolené hodnoty
n	Hlavní kvantové číslo	1, 2, 3, ... *)
l	Orbitální kvantové číslo	0, 1, 2, ... , n-1
m	Magnetické kvantové č.	-l, ... +l

$$-\frac{i}{\hbar} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{1}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \right) \psi$$

*) Každá s funkcí Ψ_{nlm} odpovídá jednomu povolenému stavu elektronu v obalu (orbitalu). Za běžných podmínek se všechny funkce se stejným n navenek projevují stejně a dohromady odpovídají jednomu orbitu v Bohrově modelu atomu.



Částice popsaná vlnovou funkcí již vyhovuje Heisenbergovým relacím neurčitosti, neboť $|\Psi|^2$ udává pouze pravděpodobnost výskytu částice, nikoliv přesnou polohu a hybnost.

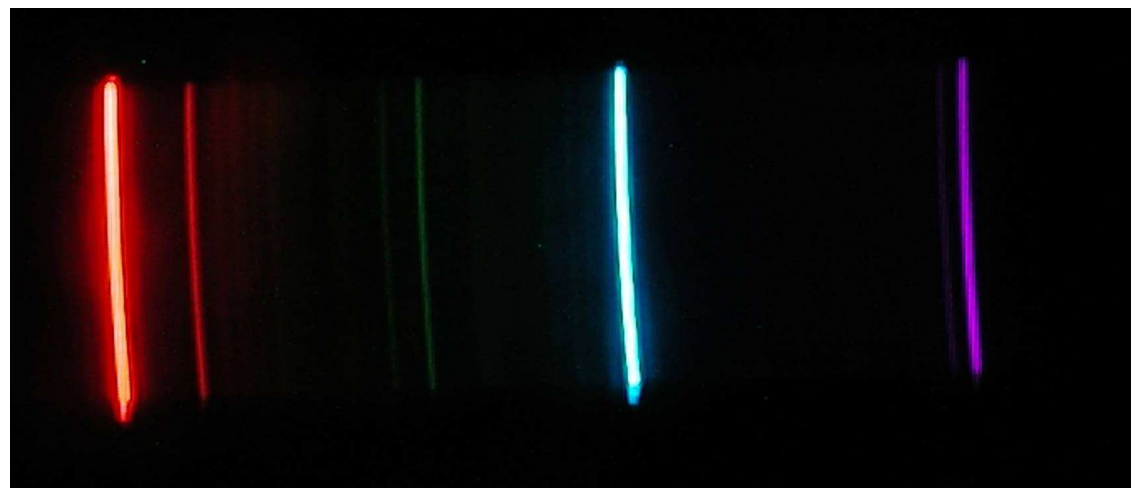
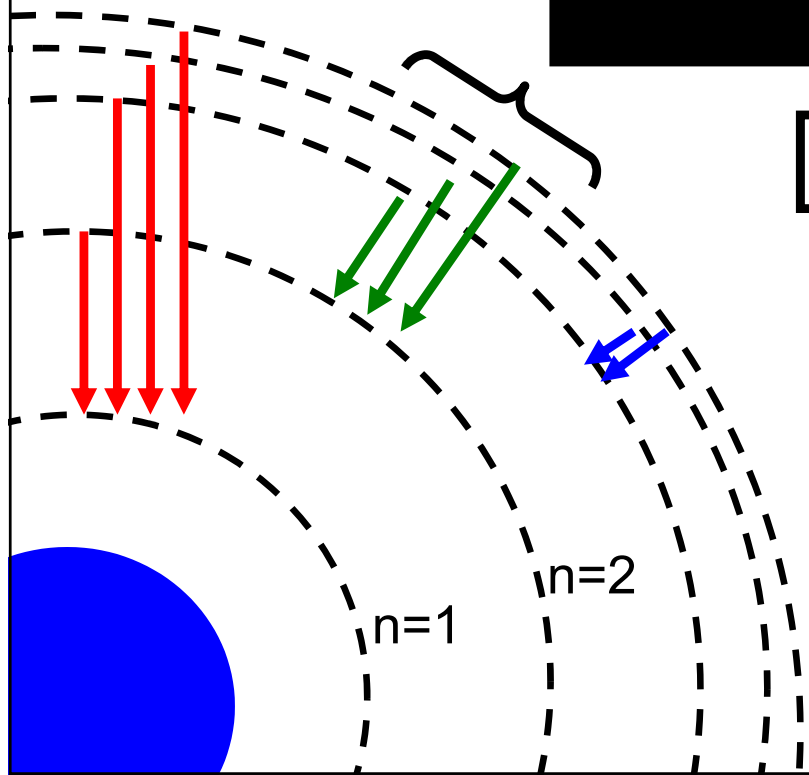
Pozorování atomových spekter

$$E_n = - \frac{13.6 \text{ eV}}{n^2}$$

UV Lymanova série



Optická Balmerova série



Rozštěpení energetických hladin v mg. poli



Spektrum vodíku pozorované v silném magnetickém poli.



Běžné spektrum sodíku.

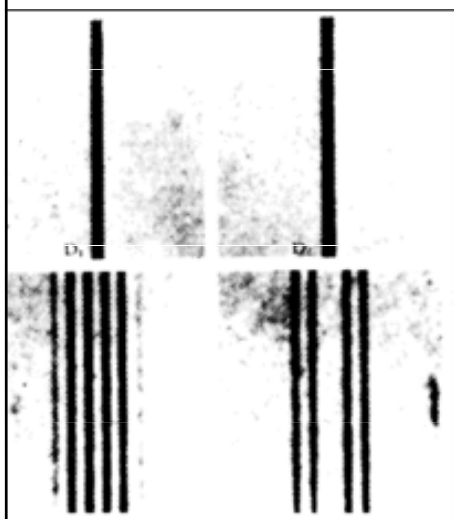
Řešení Schrödingerovy rovnice pro atom v mg. poli

$$-\frac{i}{\hbar} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{1}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} + \mu_B \right) \psi$$

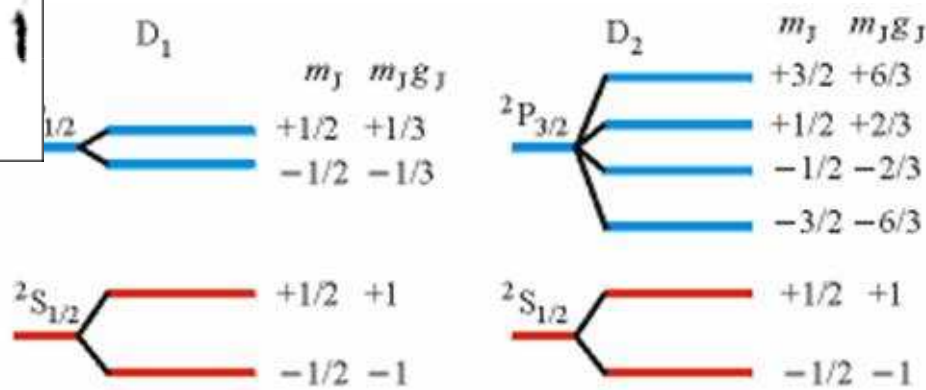
$$V_M = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}, \quad \vec{\mu} = -\mu_B (g_l \vec{L} + g_s \vec{S}) / \hbar,$$

Každý další jev se v principu dá vyřešit přidáním příslušného členu do Schrödingerovy rovnice a nalezením

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$$



Tento jev objevil holandský fyzik Pieter Zeeman. Zeeman tento jev vysvětlil jako interakci mezi magnetickým polem a magnetickým dipólovým momentem (souvisí s orbitálním momentem).



Zeemanův jev

Rozštěpení a posun čar vlivem magnetického pole ve spektru sodíku. Vlevo je původní spektrum, vpravo pak spektrum v magnetickém poli.



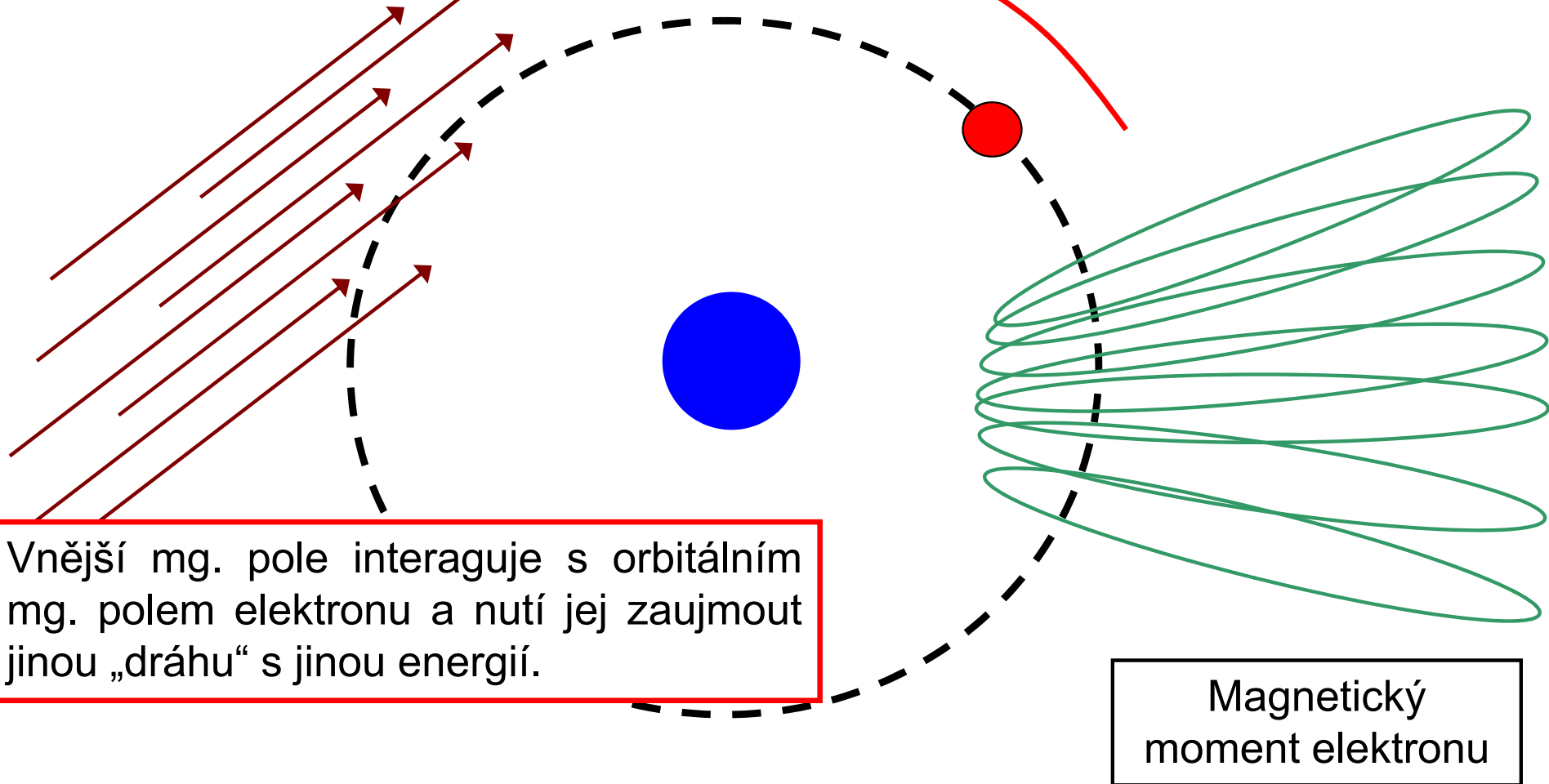
Pieter Zeeman
1865 - 1943

Zjednodušený výklad Zeemanova jevu

Štěpení hladin atomů vlivem magnetického pole. Jde o skupinu hladin, které bez přítomnosti magnetického pole mají stejnou energii (tzv. degenerovaná hladina).

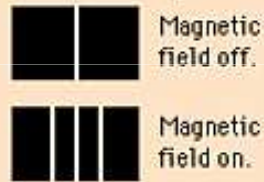
V přítomnosti magnetického pole mají jednotlivé hladiny již nepatrně odlišnou energii, která vede k rozštěpení jedné spektrální čáry na více čar.

Vnější magnetické pole



"Normal" Zeeman effect

This type of splitting is observed with hydrogen and the zinc singlet.

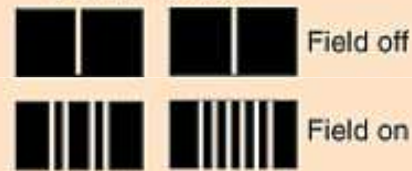


This type of splitting is observed for spin 0 states since the spin does not contribute to the angular momentum.

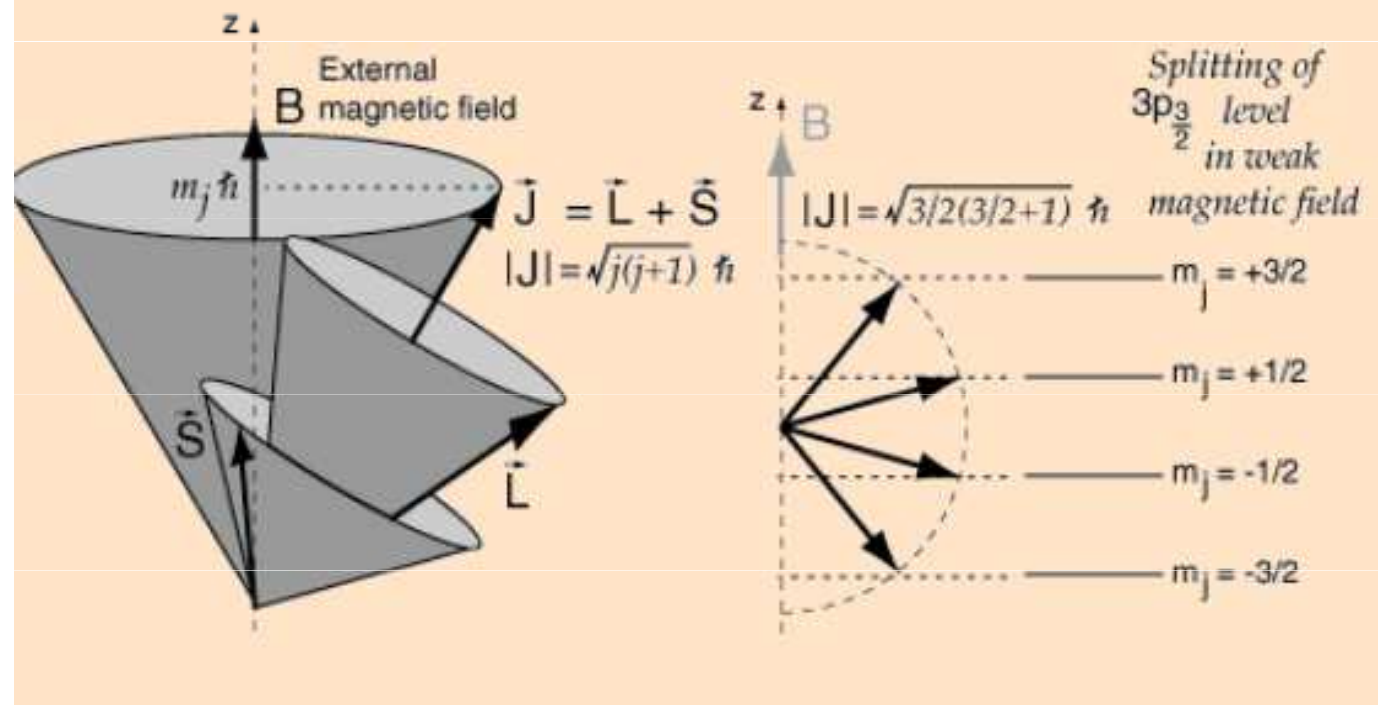
"Anomalous" Zeeman effect

When electron spin is included, there is a greater variety of splitting patterns.

Sodium doublet



Zinc sharp triplet



Celkový magnetický moment atomu

$$\vec{\mu}_J = -\frac{\mu_B}{\hbar} (\vec{L} + 2\vec{S})$$

dostaneme jako součet orbitálních a vlastních magnetických momentů jednotlivých elektronů atomového obalu. Magnetický moment jádra můžeme zanedbat, protože je velmi malý.

Orbitální magnetický moment hybnosti elektronu souvisí s pohybem elektronu v prostoru, je vázán na [orbitální moment hybnosti elektronu](#) a je možno jej interpretovat i v rámci nekvantové fyziky

Vlastní (spinový) magnetický moment elektronu je základní vlastností elektronu, souvisí s vlastním momentem hybnosti elektronu – [spinem](#). Za důkaz existence vlastního magnetického momentu elektronu můžeme považovat [Sternův-Gerlachův pokus](#) a [Einsteinův-de Haasův pokus](#).

Bohrův magneton je fyzikální konstanta, která popisuje vztahy v atomovém obalu pod vlivem elektrického pole. Vychází ze vztahu základních konstant (elementárního náboje elektronu, redukované Planckovy konstanty a hmotnost elektronu)

http://artemis.osu.cz/mmfyz/am/am_4_3_1.htm

