

Estructura fina:

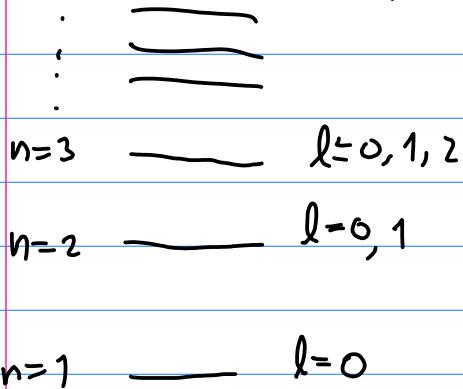
Espín-Órbita: $H_S = \xi(r) \vec{L} \cdot \vec{S}$

$$l, m_l, S, m_s \rightarrow l, s, j, m_j$$

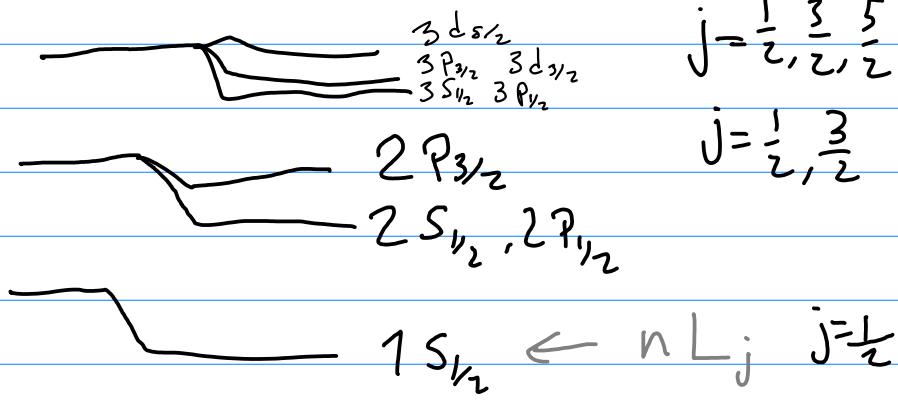
$$\vec{J} = \vec{S} + \vec{L}$$

$$\Delta E \sim j(j+1) - l(l+1) - s(s+1)$$

Estructura principal



Estructura fina



$$|l-s| < j < l+s$$

$$l=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

s p d f g h i ...

Para los átomos alcalinos obtenemos la misma estructura

Estructura hiperfina y corrimientos de isótopos

Efectos en los niveles de energía causados por el núcleo.

efectos hiperfinos \rightarrow desdoblamientos
efectos isótopos \rightarrow corrimientos

Efectos de isótopo

Corrimiento por masa nuclear

$$E_n = \frac{E_1}{\mu^2} \quad E_1 = -\frac{1}{2} \alpha^2 \mu c^2$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_n}$$

masa
reducida

Efectos de volumen no cero del núcleo



Estructura hiperfina

El núcleo puede ser una distribución complicada de cargas y espines.

- Puede tener varios momentos multipolares (2^k) eléctricos y magnéticos

Por simetría

- magnéticos sólo con K impar
- eléctricos sólo con K par

Los posibles son:

dipolar magnético, cuadripolar eléctrico

octupolar magnético, ...

Si el núcleo tiene momento angular total

$$\vec{I} \quad |I, m_I\rangle$$

Esto acota el máximo momento multipolar EM en el núcleo

$$K \leq Z I$$

Si $I = \frac{1}{2}$ $K \leq 1 \Rightarrow$ sólo hay dipolar magnético

Momento dipolar magnético:

$$\vec{\mu}_N = g_F \mu_N \vec{I} / \hbar$$

magnetón nuclear

factor g de Landé $\sim O(1)$

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = \frac{m_e}{m_p} \mu_B \quad ; \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$$

Table 5.1 Values of the spin, Landé factor and magnetic moment of the nucleons and some nuclei. The notation is such that ${}_a^b X$ represents a nucleus with a total of a nucleons, b of which are protons

Nucleus	Spin I	X	Landé factor g_I	\equiv	Magnetic moment μ_N (in nuclear magnetons)
proton p	1/2		5.5883		2.79278
neutron n	1/2		-3.8263		-1.91315
deuteron ${}^2_1 D$	1		0.85742		0.85742
${}^3_2 He$	1/2		-4.255		-2.1276
${}^4_2 He$	0		—		0
${}^{12}_6 C$	0		—		0
${}^{16}_8 O$	0		—		0
${}^{39}_{19} K$	3/2		0.2609		0.3914
${}^{67}_{30} Zn$	5/2		0.35028		0.8757
${}^{85}_{37} Rb$	5/2		0.54108		1.3527
${}^{129}_{54} Xe$	1/2		-1.5536		-0.7768
${}^{133}_{55} Cs$	7/2		0.7369		2.579
${}^{199}_{80} Hg$	1/2		1.0054		0.5027
${}^{201}_{80} Hg$	3/2		-0.37113		-0.5567

La escala del efecto está determinada por $\frac{Me}{mp} \approx \frac{1}{1836}$

i.e. podemos usar teoría de perturbaciones.

$$\ln \delta jm; I^m_I >$$

Empezaremos por suponer que el núcleo es un dipolo magnético.

- El dipolo nuclear se ve afectado por el campo \vec{B} debido a \vec{L}
- El dipolo nuclear genera un \vec{B}' que afecta al momento magnético electrónico.

$$H_{HF} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{e}{\hbar} g_I \mu_B \mu_N \frac{1}{r^3} \left[\vec{L} \cdot \vec{I} - \vec{S} \cdot \vec{I} + \frac{3(\vec{S} \cdot \vec{r})(\vec{I} \cdot \vec{r})}{r^2} + \frac{g_F}{3} \delta(\vec{r}) \vec{I} \cdot \vec{S} \right]$$

Haciendo maromas, usando el Teorema de proyección (con j fija) restringidos a espacio de j fija

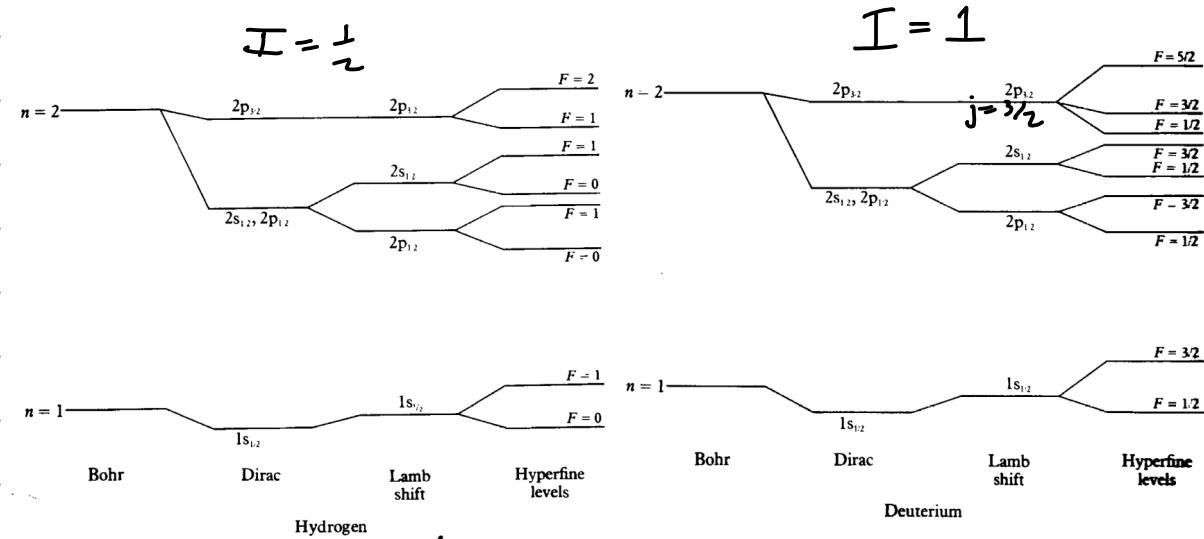
$$H_{HF} = A_{hf} \vec{I} \cdot \vec{J}$$

$\vec{F} = \vec{I} + \vec{J}$ para tener la diagonalización gratis.

$$\ln l \leq j \leq I \Rightarrow \ln l \leq j \leq I + m_f$$

$$H_{HF} = \frac{A_{hf}}{2} (F^2 - I^2 - J^2)$$

$$\Delta E = \frac{A_{hf}}{2} (F(F+1) - I(I+1) - j(j+1))$$



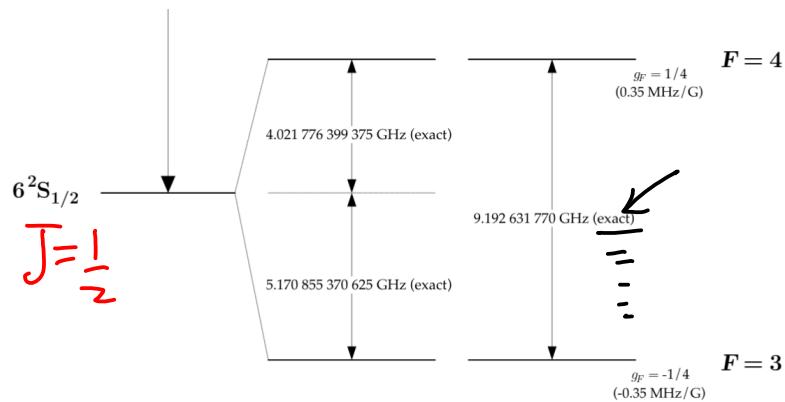
5.18 The splitting of the $n = 1$ and $n = 2$ levels of hydrogen and deuterium. The splittings are not to scale and are magnified from the left to the right of the diagram.

dipolar magnética cuadrupolar eléctrica (no en hidrógeno)

$$H_{\text{hfs}} = A_{\text{hfs}} \frac{\mathbf{I} \cdot \mathbf{J}}{\hbar^2} + B_{\text{hfs}} \frac{\frac{3}{2\hbar}(\mathbf{I} \cdot \mathbf{J})^2 - I(I+1)J(J+1)}{2I(2I-1)J(2J-1)} + C_{\text{hfs}} \frac{\frac{10}{\hbar^3}(\mathbf{I} \cdot \mathbf{J})^3 + \frac{20}{\hbar^2}(\mathbf{I} \cdot \mathbf{J})^2 + \frac{2}{\hbar}(\mathbf{I} \cdot \mathbf{J})[I(I+1) + J(J+1) + 3] - 3I(I+1)J(J+1) - 5I(I+1)J(J+1)}{I(I-1)(2I-1)J(J-1)(2J-1)} \quad (7.132)$$

Again, the three terms on the right-hand side respectively represent magnetic-dipole (applicable for $I, J > 0$), electric-quadrupole (applicable for $I, J > 1/2$), and magnetic-octupole (applicable for $I, J > 1$) couplings. Thus, A_{hfs} is the magnetic-dipole hyperfine constant, B_{hfs} is the electric-quadrupole hyperfine constant, and C_{hfs} is the magnetic-octupole hyperfine constant. We can see which terms are applicable to a given transition

octopolar
magnética
cu
(no
hidrógeno)



Steck

133 Cs

Table 5: Cesium D Transition Hyperfine Structure Constants.

Magnetic Dipole Constant, $6^2S_{1/2}$	$A_{6^2S_{1/2}}$	$h \cdot 2.298\ 157\ 942\ 5$ GHz (exact)	[20]
Magnetic Dipole Constant, $6^2P_{1/2}$	$A_{6^2P_{1/2}}$	$h \cdot 291.920(19)$ MHz	[8, 22]
Magnetic Dipole Constant, $6^2P_{3/2}$	$A_{6^2P_{3/2}}$	$h \cdot 50.275(3)$ MHz	[21]
Electric Quadrupole Constant, $6^2P_{3/2}$	$B_{6^2P_{3/2}}$	$h \cdot -0.53(2)$ MHz	[21]

Atmos hidrogenoides

e^-

e^-

μ^-

Z protones 0000

e^+

p