

Frumeinda- og ljósfræði:

LS tengsl

Kafli 5

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

5. vika vor 2021

Inngangur

- Við skoðum nú atóm með tveimur gildisrafeindum alkali earth metals eins og Mg og Ca
- Uppbygging þessara frumefna á margt sameiginlegt með helíni
- Við notum miðju-sviðs nálgunina eins og fyrir alkalí frumefni
- Fyrst ritum við Hamiltonian fyrir N rafeindir með mætti $V_{\text{CF}}(r)$

$$H = \sum_{i=1}^N \left[-\frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla_i^2 + V_{\text{CF}}(r_i) + \left\{ \sum_{j>i}^N \frac{e^2/4\pi\epsilon_0}{r_{ij}} - S(r_i) \right\} \right]$$

Inngangur

- Þennan Hamiltonian má rita

$$H = H_{\text{CF}} + H_{\text{re}}$$

þar sem miðju-sviðs Hamiltonian er

$$V_{\text{CF}}(r) = -\frac{e^2/4\pi\epsilon_0}{r} + S(r)$$

og

$$H_{\text{re}} = \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{e^2/4\pi\epsilon_0}{r_{ij}} - S(r_i) \right\}$$

er leifðar rafstöðu víxlverkun (e. residual electrostatic interaction)

- Leifðar rafstöðu víxlverkun er sá hluti fráhrindikraftsins sem ekki er tekinn með í miðju sviðinu

Inngangur

- T.d. fyrir röðun eins og $1s2s$ í He, eða $3s4s$ í Mg, hafa báðar rafeindirnar kúlusamhverfar dreifingar en miðju-svið getur ekki fullkomlega lýst fráhrindikrafti á milli þeirra
- Leifðar rafstöðu víxlverkun truflar röðunina $n_1 l_1 n_2 l_2$ sem eru eiginástönd miðju-sviðsins
- Hverfipunga eiginástönd þessara tveggja rafeinda eru margfeldi brautar og spuna falla þeirra

$$|l_1 m_{l_1} s_1 m_{s_1}\rangle |l_2 m_{l_2} s_2 m_{s_2}\rangle$$

og orka þeirra er ekki háð stefnu atómsins svo að öll m_l ástöndin eru margfeldin

Inngangur

- Þ.e. ástandið 3p4p hefur

$$(2l_1 + 1)(2l_2 + 1) = 9$$

margfeldna samantekt á $Y_{l_1, m_1} Y_{l_2, m_2}$

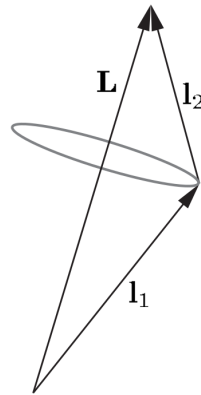
- Sérhvert þessara ástanda hefur fjögur spunaföll, en við þurfum ekki að gera ráð fyrir 36 margfeldni, þar sem við skiptum upp í stöðu og spuna hluta eins og í helíni
- Við finnum fyrst eiginástönd truflunarinnar H_{re}
- Í þessari framsetningu er H_{re} er hornalínu fylki og eigingildin eru hornalínu stökin

Inngangur

- Víxlverkun milli rafeindanna, vegna rafstöðufráhrindingar, veldur breytingu á hverfiþunga þeirra, vigrarnir l_1 og l_2 breyta um stefnu, en stærð þeirra breytist ekki
- Þessi innri víxlverkun breytir heldur ekki heildar hverfiþunganum

$$\mathbf{L} = \mathbf{l}_1 + \mathbf{l}_2$$

og l_1 og l_2 snúast um þennan vigur eins og myndin sýnir



Frá Foot (2005)

Inngangur

- Þegar ekkert vægi verkar á atóm hefur \mathbf{L} fasta stefnu í rúminu og z -þátturinn M_L er einnig hreyfingarfasti (m_{l_1} og m_{l_2} eru ekki góðar skammtatölur)
- Hin sígilda varðveisla hverfiþunga svarar til þess í skammtafræði að virkjarnir L^2 og L_z víxlist báðir við H_{re}

$$[L^2, H_{re}] = 0 \quad \text{og} \quad [L_z, H_{re}] = 0$$

og þar sem H_{re} er óháður spuna verður einnig að gilda að

$$[S^2, H_{re}] = 0 \quad \text{og} \quad [S_z, H_{re}] = 0$$

- Að auki er H_{re} einnig víxlinn við spuna hvorrar rafeindar fyrir sig s_1 og s_2 en við veljum eiginföll \mathbf{S} til að andsamhverfa bylgjuföllin eins og í helínu

Inngangur

- Spunaeiginföllin fyrir tvær rafeindir eru ψ_{spin}^A og ψ_{spin}^S fyrir $S = 0$ og $S = 1$
- Skammtatölurnar L , M_L , S og M_S hafa vel skilgreind gildi í Russell-Saunders eða LS -tengsla skipan
- Þar með eru eiginástönd H_{re}

$$|LM_LSM_S\rangle$$

- Í LS tengsla skipan eru orkustigin merkt með L og S
- Við höfum séð dæmi um 1L og 2L fyrir $1snl$ röðina í helíni þar sem LS -tengsla skipan er mjög góð nálgun

Inngangur

- Flóknara tilfelli er $npn'p$ röðun eins og t.d. $3p4p$ í kísli, sem hefur sex liði

$$l_1 = 1, \quad l_2 = 1 \quad \Rightarrow \quad L = 0, 1, 2$$

$$s_1 = \frac{1}{2}, \quad s_2 = \frac{1}{2} \quad \Rightarrow \quad S = 0, 1$$

sem er ritað

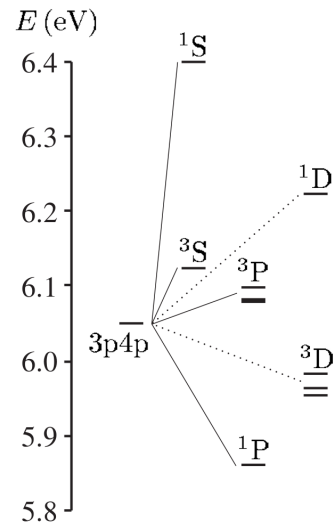
$${}^{2S+1}L = {}^1S, {}^1P, {}^1D, {}^3S, {}^3P, {}^3D$$

- Beina og skiptitegrið sem ákvarða orku þessara liða er flókið að reikna
- Hin

$$(2l_1 + 1)(2l_2 + 1) = 9$$

margfeldin ástönd brautarhverfipunga verða $1 + 3 + 5 = 9$ ástönd M_L sem eru tengd S, P og D liðunum

Inngangur

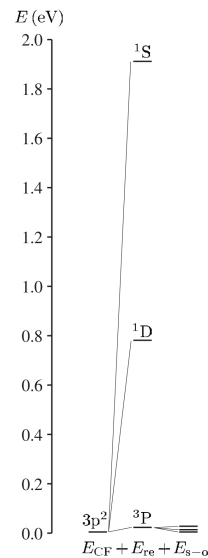


Frá Foot (2005)

- Allir liðir $3p4p$ röðunar í kísli og liggja við 6 eV ofan við grunnástand
- Leifðar rafstöðu víxlverkun leiðr til orkumunar ~ 0.2 eV milli liða
- Fíngerðarklofnun er einu stærðarþrepi minna eins og sést á liðunum 3P og 3D

Inngangur

- Eins og í helíni leiðir línuleg samantekt fjögurra margfeldinna spuna ástanda til triplet og singlet liða – ólíkt helíni liggja triplet ekki endilega neðan við singlet



Frá Foot (2005)

- Orkustig $3p^2$ röðunarinnar í kísli – einsetulögmál Pauli leyfir einungis þrjá þætti

Inngangur

- Lægsta orkustigið er 3P í samræmi við reglu Hund og þetta er grunnástand kísilatóms
- Í tilfalli grunn röðunar jafngildra rafeinda gilda reynslureglur um röðun spuna og brautar í lægstu orku sem er nefnd regla Hund:
 - orkulægsti liðurinn hefur stærsta gildi S í samræmi við einsetulögmál Pauli
 - ef það eru nokkrir slíkir liðir er sá með stærst L lægst

⇒ Dæmi 5.1

⇒ Dæmi 5.2

Fíngerð í LS tengsla framsetningu

- Fíngerð kemur til vegna víxlverkunar spuna og brautar fyrir sérhverja óþöruðu rafeindanna sem er gefið með Hamiltonian

$$H_{s-o} = \beta_1 \mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{l}_1 + \beta_2 \mathbf{s}_2 \cdot \mathbf{l}_2$$

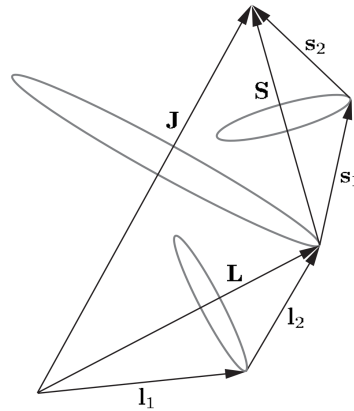
- Fyrir atóm með tvær gildisrafeindir H_{s-o} virkar sem truflun á ástandið

$$|LM_L SM_S\rangle$$

- Vigurlíkanið, þessi víxlverkun milli spuna og brautar veldur því að \mathbf{L} og \mathbf{S} breyta stefnu svo að hvorki né L_z og S_z eru fastar
- Heildar hverfiþunginn er $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$, og z -þátturinn J_z , eru hvorutveggja fastar vegna þess að ekkert ytra vægi verkar á atómið

Fíngerð í LS tengsla framsetningu

- Við metum nú áhrif truflunar H_{S-O}



Frá Foot (2005)

- Í vigurlíkaninu af LS -tengslum snúast \mathbf{l}_1 og \mathbf{l}_2 um \mathbf{L} eins og myndin sýnir
- Aðeins er þörf á að skoða þáttinn eftir \mathbf{L} eða

$$\mathbf{l}_1 \longrightarrow \left\{ \frac{(\overline{\mathbf{l}_1 \cdot \mathbf{L}})}{|\mathbf{L}|^2} \right\} \mathbf{L}$$

Fíngerð í LS tengsla framsetningu

- Tímameðaltalið $\overline{\mathbf{l}_1 \cdot \mathbf{L}}$ í vigurlíkaninu verður væntigildið $\langle \mathbf{l}_1 \cdot \mathbf{L} \rangle$ í skammtafræði
- Einnig notum við $L(L + 1)$ sem stærð vigursins
- Ef við beitum þessu líka á spuna þá er

$$H_{s-o} = \beta_1 \frac{\langle \mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{S} \rangle}{S(S + 1)} \mathbf{S} \cdot \frac{\langle \mathbf{l}_1 \cdot \mathbf{L} \rangle}{L(L + 1)} \mathbf{L} + \beta_2 \frac{\langle \mathbf{s}_2 \cdot \mathbf{S} \rangle}{S(S + 1)} \mathbf{S} \cdot \frac{\langle \mathbf{l}_2 \cdot \mathbf{L} \rangle}{L(L + 1)} \mathbf{L} = \beta_{LS} \mathbf{S} \cdot \mathbf{L}$$

- Sýna má að fyrir hverfipungavigur \mathbf{J} og þátt hans J_z , að fylkisstök sérhvers vigurvirkja \mathbf{V} er í réttu hlutfalli við þau af \mathbf{J} eða

$$\langle JM_J | \mathbf{V} | JM_J \rangle = c \langle JM_J | \mathbf{J} | JM_J \rangle$$

Fíngerð í LS tengsla framsetningu

- Við beitum þessu á tilfallið þegar $\mathbf{V} = \mathbf{l}_1$ eða \mathbf{l}_2 í grunni eiginástanda $|LM_L\rangle$ og sambærilegt fyrir spuna
- Ef

$$\langle LM_L | \mathbf{l}_1 | LM_L \rangle = c \langle LM_L | \mathbf{L} | LM_L \rangle$$

þá má finna fastann c með því að taka punktfeldi við \mathbf{L} á báðum hliðum

$$c = \frac{\langle LM_L | \mathbf{l}_1 \cdot \mathbf{L} | LM_L \rangle}{\langle LM_L | \mathbf{L} \cdot \mathbf{L} | LM_L \rangle}$$

- Þar með er

$$\langle LM_L | \mathbf{l}_1 | LM_L \rangle = \frac{\langle \mathbf{l}_1 \cdot \mathbf{L} \rangle}{L(L+1)} \langle LM_L | \mathbf{L} | LM_L \rangle$$

Fíngerð í LS tengsla framsetningu

- Þetta er dæmi um ofanvarp sem einnig má beita á l_2 sem og s_1 og s_2 í grunni eiginviga $|SM_S\rangle$

- Orku hliðrunin er

$$E_{s-o} = \beta_{LS} \langle \mathbf{S} \cdot \mathbf{L} \rangle$$

- Til að finna þessa orku verður að finna væntigildi $\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}$ eða

$$\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} = (\mathbf{J} \cdot \mathbf{J} - \mathbf{L} \cdot \mathbf{L} - \mathbf{S} \cdot \mathbf{S})/2$$

fyrir sérhvern þátt í $(2S+1)L$

- Sérhver þáttur hefur $(2S + 1)(2L + 1)$ margfeldin ástönd

\implies Dæmi 5.3

Fíngerð í LS tengsla framsetningu

- Sérhver línuleg samantekt þessara ástanda er einnig eiginástand með sömu rafstöðuorku og við getum nýtt þetta frelsi til að velja heppileg eiginástönd
- Við notum ástöndin $|LSJM_J\rangle$; sem eru línulegar samantektir á grunnástöndunum $|LM_LSM_S\rangle$ en við þurfum ekki að ákvarða þau nákvæmlega til að finna eiginorkuna

- Eiginorkan með ástöndin $|LSJM_J\rangle$ er

$$E_{s-o} = \frac{\beta_{LS}}{2} \{J(J+1) - L(L+1) - S(S+1)\}$$

- Þar með er orkubilið á milli aðlægðra J stiga

$$\Delta E_{FS} = E_J - E_{J-1} = \beta_{LS} J$$

Fíngerð í LS tengsla framsetningu

- Jafnan

$$E_{s-o} = \frac{\beta_{LS}}{2} \{J(J+1) - L(L+1) - S(S+1)\}$$

gefur væntigilædi víxlverkunarorku spuna og brautar hverfiþungavigna S og L ef að LS -tengsl eru gild og þar með hafi vigrarnir merkingu

- Stærðin $\beta_{LS}/2$ er ekki einfaldlega í réttu hlutfalli við lið eins og $\frac{(1/r)dV(r)}{dr}$, vegna þess að nú er mættið mun flóknara
- Hins vegar hefur $\beta_{LS}/2$ sama gildi fyrir öll orkustig í svokölluðu fjölstigi, fyrir öll orkustig með sameiginleg L og S
- Vegna þess má nota þessa jöfnu til að reikna aðskilnað orkustiga í fjölstigi

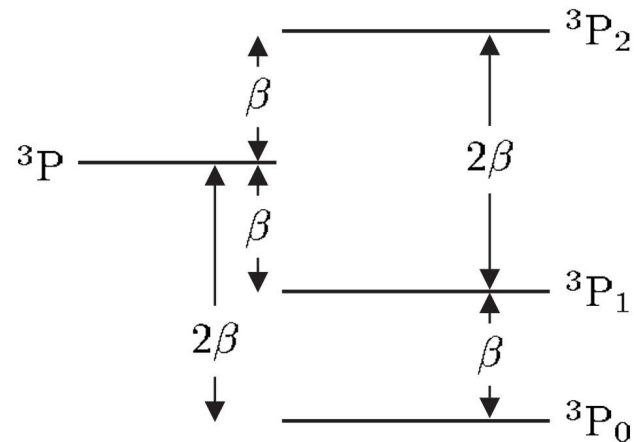
Fíngerð í LS tengsla framsetningu

- Sé skammtatala lægra stigsins J , og skammtatalan hærra stigsins $J + 1$ þá er aðskilnaður stiganna

$$\begin{aligned}\Delta E &= \frac{\beta_{LS}}{2} [(J + 1)(J + 2) - L(L + 1) - S(S + 1)] \\ &\quad - \frac{\beta_{LS}}{2} [J(J + 1) - L(L + 1) - S(S + 1)] \\ &= \frac{\beta_{LS}}{2} [(J + 1)(J + 2) - J(J + 1)] = \beta_{LS}(J + 1)\end{aligned}$$

- Þessi jafna segir að aðskilnaður stiga í fjölstigi sé í réttu hlutfalli við heildarhverfiþunga skammtatöluna og er kölluð aðskilnaðar regla Landé

Fíngerð í LS tengsla framsetningu



Frá Foot (2005)

- Til dæmis hefur 3P ($L = 1 = S$) þrjú J stig: $(2S+1)L_J = {}^3P_0, {}^3P_1, {}^3P_2$ og aðskilnaðurinn milli $J = 2$ og $J = 1$ er tvöfaldur aðskilnaðurinn milli $J = 1$ og $J = 0$

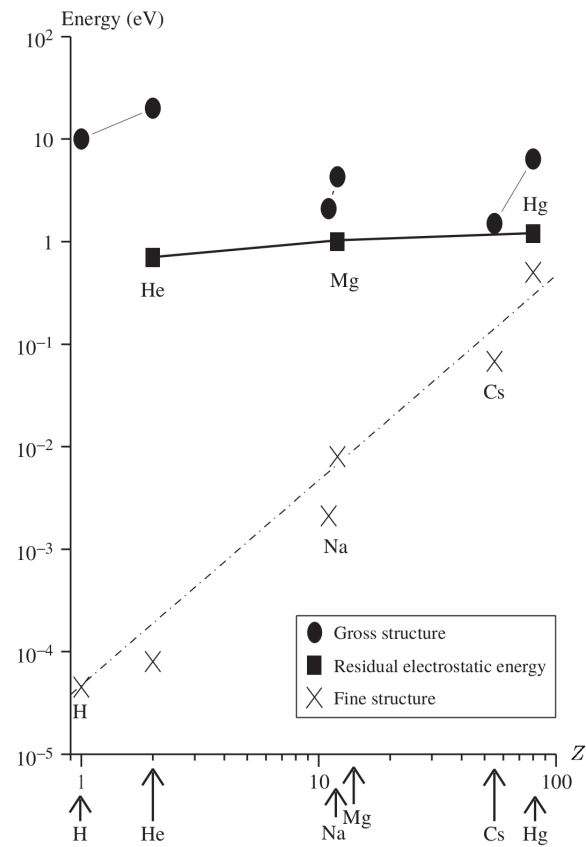
\implies Dæmi 5.4

\implies Dæmi 5.5

jj tengsla framsetning

- Til að finna fíngerð í LS -tengslum var víxlverkun spuna og brautar tekin sem truflun á stigið $(2S+1)L$
- Þetta er í lagi svo lengi sem $E_{re} \gg E_{s-o}$ sem er yfirleitt tilfellið fyrir létt atóm
- Víxlverkun spuna og brautar eykst með aukinni atómtölu, svo að E_{re} nálgast E_{s-o}
- Það er hins vegar aðeins í þeim tilfellum sem skiptitegrið er lítið sem E_{re} er stærra en E_{s-o}

jj tengsla framsetning



Frá Foot (2005)

- Dæmigerð orkugildi sem fall af atómtölunni Z

jj tengsla framsetning

- Þegar H_{s-o} verkar beint á tiltekna röðun veldur það því að l og s hvorrar rafeindar hafa tengsl og gefa $\mathbf{j}_1 = \mathbf{l}_1 + \mathbf{s}_1$ og $\mathbf{j}_2 = \mathbf{l}_2 + \mathbf{s}_2$
- Í þessari *jj* tengsla framsetningu vinnur hvor gildisrafeind út af fyrir sig
- Fyrir sp röðun hafa s -rafeindirnar aðeins $j_1 = 1/2$ og p -rafeindin hefur $j_2 = 1/2$ eða $3/2$ svo að það koma fram tvö stig táknuð með

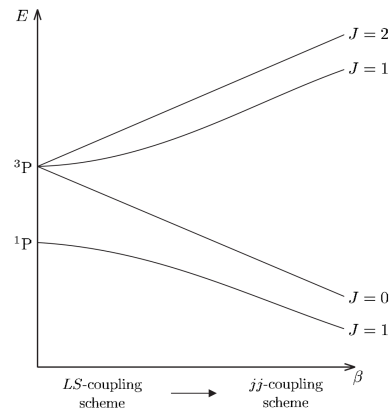
$$(j_1, j_2) = (1/2, 1/2) \quad \text{og} \quad (1/2, 3/2)$$

- Leifðar rafstöðu víxlverkun verkar sem truflun á *jj*-tengsla stig, og veldur því að hverfipungi rafeindanna sé tengdur $\mathbf{J} = \mathbf{j}_1 + \mathbf{j}_2$
- Þar sem ekkert ytra vægi verkar á atómið eru M_J einnig góðar skammtatölur

jj tengsla framsetning

- Fyrir sp röðun höfum við

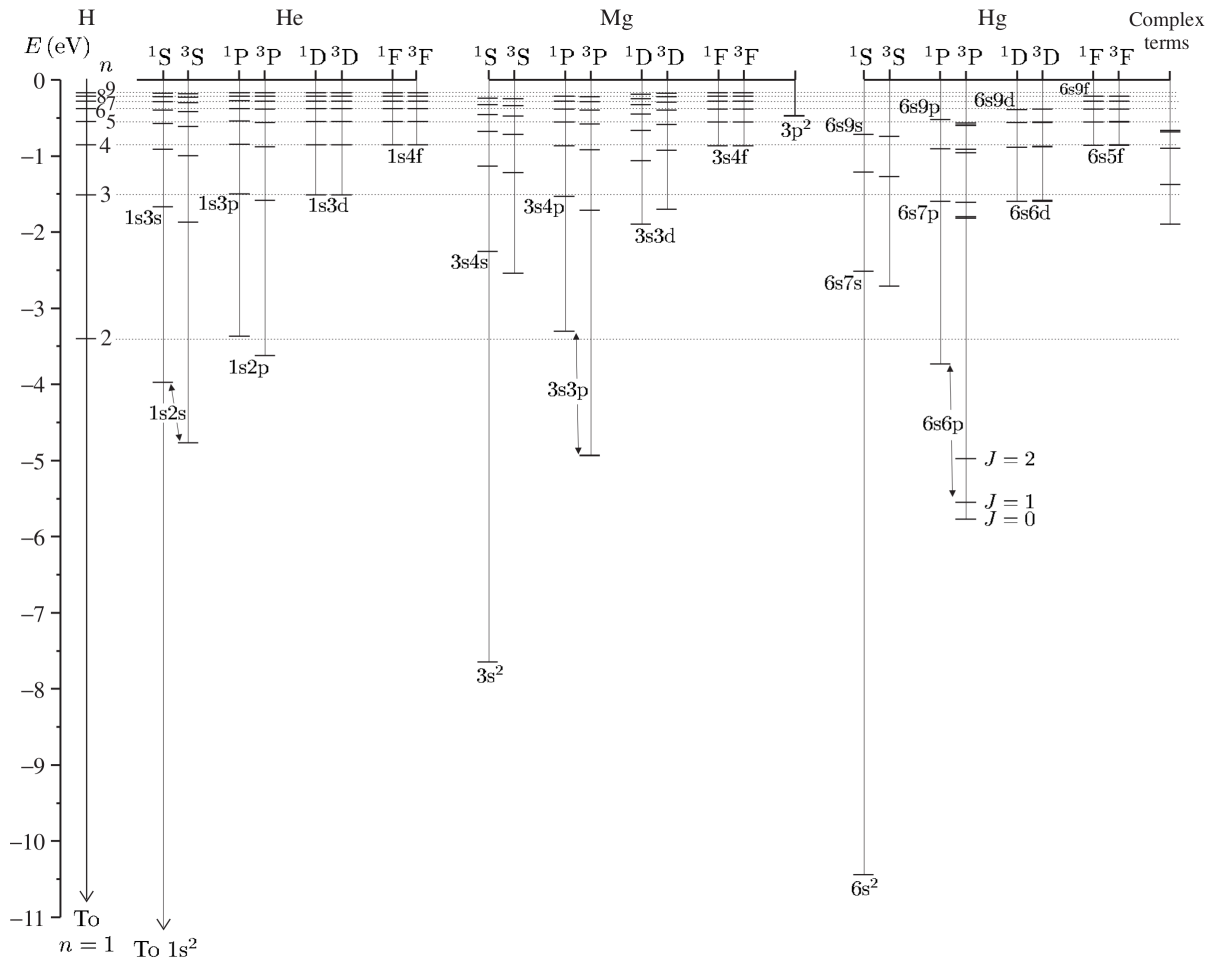
$$(j_1, j_2)_J = (1/2, 1/2)_0, (1/2, 1/2)_1, (1/2, 3/2)_0, (1/2, 3/2)_2$$



Frá Foot (2005)

- Þetta tvístig er sýnt á myndinni
- Samantekt
 - LS -tengsla framsetning: $E_{re} \gg E_{s-o}$
 - jj -tengsla framsetning: $E_{s-o} \gg E_{re}$

Færslur milli tengsla framsetninga



Frá Foot (2005)

Færslur milli tengsla framsetninga

3s3p, Mg	6s6p, Hg
2.1850	3.76
2.1870	3.94
2.1911	4.40
3.5051	5.40

Frá Foot (2005)

- Skoðum nú nánar færslur í Mg og Hg
- Taflan sýnir orkustigin í 10^6 m^{-1} sem mæld eru frá grunnástandi
- Fyrir sp röðun væntum við ^1P og ^3P þátta
- *LS*-tengsla framsetning gefur nákvæma lýsingu vegna þess að fíngerðin er smærri heldur en orkumunurinn ($E_{re} \sim 1.3 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$) milli ^3P þáttarins við $\sim 2.2 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ og $^1\text{P}_1$ þáttarins við $3.5 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$

Færslur milli tengsla framsetninga

3s3p, Mg	6s6p, Hg
2.1850	3.76
2.1870	3.94
2.1911	4.40
3.5051	5.40

Frá Foot (2005)

- Í kvikasilfri er bilið á milli orkustiga 0.18, 0.46 og 1.0 (í 10^6 m^{-1})
- Ef við segjum að þessi þrjú stig séu 3P_0 , 3P_1 og 3P_2 sjáum við að bila reglan er ekki vel uppfyllt þar sem $0.46/0.18 = 2.6$ (ekki 2.0)
- Þetta frávik frá LS -tengslum á ekki að koma á óvart þar sem þessi röðun hefur víxlverkun milli spuna og brautar sem er aðeins litíð eitt minni en einstigs - þrístigs víxlverkun
- Þrátt fyrir þetta þungt atóm gefa LS -tengsl betri nálgun en jj -tengsl

Valreglur í LS -tengsla framsetningu

1	$\Delta J = 0, \pm 1$	$(J = 0 \leftrightarrow J' = 0)$	Level
2	$\Delta M_J = 0, \pm 1$	$(M_J = 0 \leftrightarrow M_{J'} = 0 \text{ if } \Delta J = 0)$	State
3	Parity changes		Configuration
4	$\Delta l = \pm 1$	One electron jump	Configuration
5	$\Delta L = 0, \pm 1$	$(L = 0 \leftrightarrow L' = 0)$	Term
6	$\Delta S = 0$		Term

Frá Foot (2005)

- Taflan gefur valreglur fyrir færslur í LS -tengsla framsetningu
- Reglan fyrir J lýsir varðveislueiginleikum þessarar stærðar og er stranglega framfylgt
- Þessi regla innifelur $\Delta j = 0, \pm 1$ en með þeim auknum kröfum að $J = 0 \leftrightarrow J' = 0$
- Reglan fyrir ΔM_J er afleiðing reglunnar fyrir ΔJ ; útgeislun eða ísog ljóseindar getur ekki breytt þættinum á z -ásnum meira en sem nemur heildar hverfipunga

Valreglur í LS -tengsla framsetningu

- Í röðinni $n_1l_1 n_2l_2 n_3l_3 \dots n_xl_x$ er það aðeins ein rafeind sem breytir l gildi sínu (en getur einnig breytt n)
- Reglan fyrir ΔL leyfir færslur eins og $3p4s \ ^3P_1 - 3p4p \ ^3P_1$
- Regla ΔS stafar af því að rafsviðstvípólsvirkinn verkar ekki á spuna
- Þrátt fyrir það eru færslur $\Delta S = 1$ leyfðar í kvikasílfuratómi eins og $6s^2 \ ^1S_0 - 6p6p \ ^3P_1$, sem gefur línu við 254 nm
- Þetta stafar af því að þungum atómum er ekki nákvæmlega lýst með LS -tengsla framsetningu og víxlverkun spuna og brautar blandar 1P_1 bylgjuföllum við bylgjuföllin sem er lýst með 3P_1
- Þó að þetta sé ekki alveg bannað er hraði færslunnar verulega minna en ef þetta væri fullkomlega leyfð færsla

Zeeman hrif

- Segulvægi atóms hefur framlag frá bæði braut og spuna

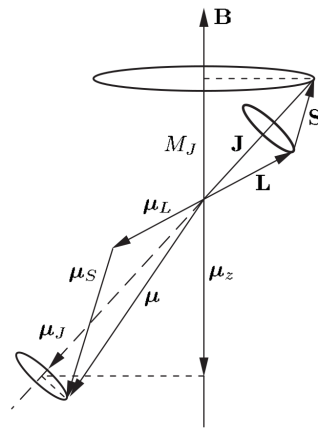
$$\mu = -\mu_B \mathbf{L} - g_s \mu_B \mathbf{S}$$

- Víxlverkun atóms við ytra segulsvið er lýst með

$$H_{ZE} = -\mu \cdot \mathbf{B}$$

- Væntigildi þessa Hamiltonian má finna í grunninum $|LSJM_J\rangle$, ef gefið er að $E_{EZ} \ll E_{s-o} \ll E_{re}$, þ.e. að víxlverkunin sé meðhöndluð sem truflun á fíngerðina í LS -tengsla framsetningunni

Zeeman hrif



Frá Foot (2005)

- Í vigurlíkaninu vörpum við segulvæginu á \mathbf{J} ($\mathbf{B} = B\hat{e}_z$) sem gefur

$$H_{ZE} = -\frac{\langle \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{J} \rangle}{J(J+1)} \mathbf{J} \cdot \mathbf{B} = \frac{\langle \mathbf{L} \cdot \mathbf{J} \rangle + g_s \langle \mathbf{S} \cdot \mathbf{J} \rangle}{J(J+1)} \mu_B B J_z$$

- Í vigurlíkaninu

$$E_{ZE} = g_J \mu_B B M_J$$

Zeeman hrif

- Hér er Landé g -stuðullinn er

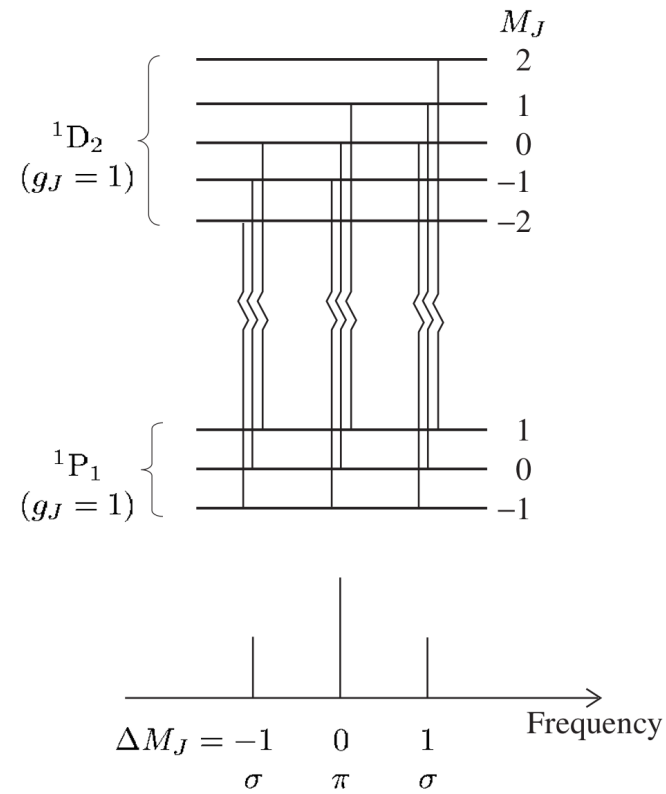
$$g_J = \frac{\langle \mathbf{L} \cdot \mathbf{J} \rangle + g_s \langle \mathbf{S} \cdot \mathbf{J} \rangle}{J(J + 1)}$$

- Ef gert er ráð fyrir að $g_s \approx 2$ þá er

$$g_J = \frac{3}{2} + \frac{S(S + 1) - L(L + 1)}{2J(J + 1)}$$

- Singlet þættir hafa $S = 0$ svo $\mathbf{J} = \mathbf{L}$ og $g_J = 1$
- Singlet hafa öll sömu Zeeman klofnun milli M_J ástanda og færslur milli singlet þátta sýna normal Zeeman hrif

Zeeman hrif



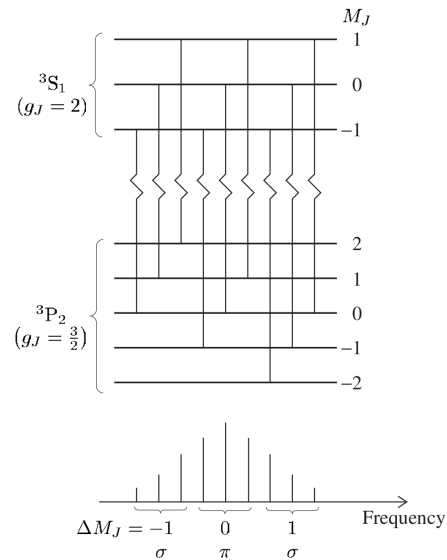
Frá Foot (2005)

- $1s2p \ ^1P_1 - 1s3d \ ^1D_2$ línan í litíni

Zeeman hrif

- Ástöndin eru klofin upp í þrjá og fimm M_J , sem bæði hafa $S = 0$ og $g_J = 1$ og leyfðar færslur koma fram í sama mynstri og sígilda líkanið segir til um – normal Zeeman hrif
- $\Delta M_J = \pm 1$ færslur sýna tíðnir sem er hliðrað sem nemur $\pm \mu_B/h$ í samanburði við $\Delta M_J = 0$ færslur
- Í atómi sem hefur tvær gildisrafeindir sýnir færsla milli triplet þátta óeðlileg Zeeman hrif

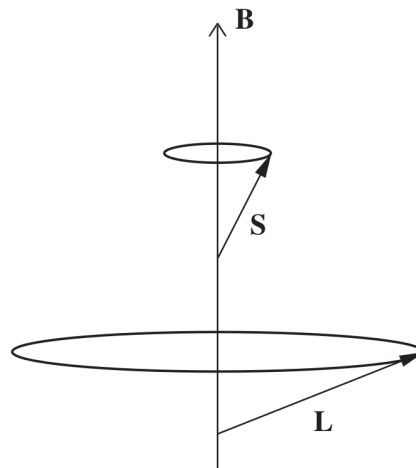
Zeeman hrif



Frá Foot (2005)

- Anomalous Zeeman hrif fyrir $6s6p \ ^3P_2 - 6s7s \ ^3S_1$ færslan í Hg
- Mynstrið hefur níu línur vegna þess að g_J er mismunandi fyrir ástöndin
- Mynstrið sem út kemur er háð gildum á g_J og J fyrir efra og lægra ástandið

Zeeman hrif

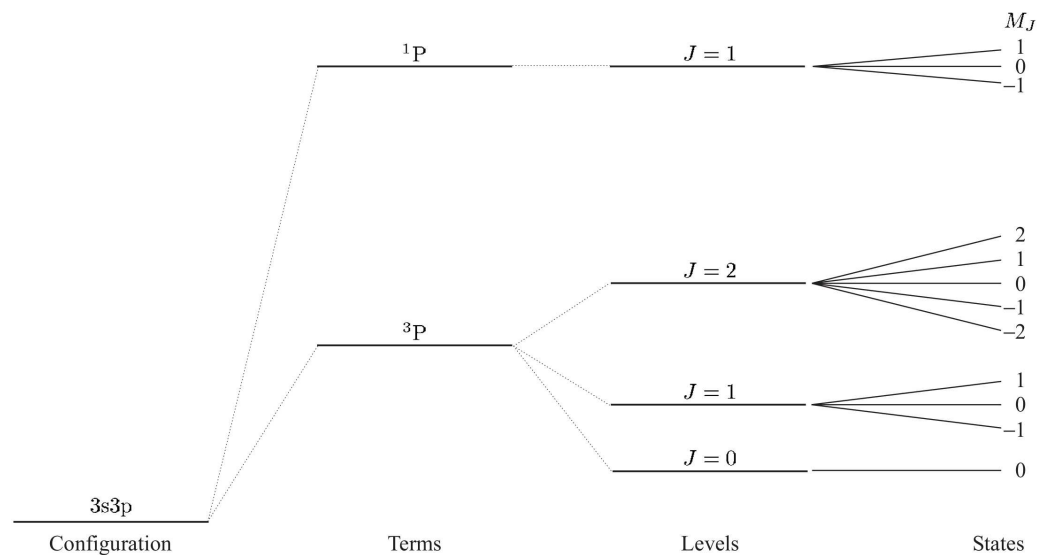


Frá Foot (2005)

- Í mjög sterku segulsviði koma fram Paschen-Beck hrif
- Spuna og brautar hverfingur snúast um stefnu segulsviðsins óháð hvert öðru
- Orkan er gefin með

$$E_{PB} = \mu_B B (M_L + 2M_S)$$

Samantekt



Frá Foot (2005)

- Lagskipting í LS -tengsla framsetningunni
 - Leifðar rafstöðu víxlverkun er ráðandi
 - Víxlverkun spuna og brautar klýfur þáttina í J liði
 - Zeeman hrif í veiku segulsviði kljúfa síðan upp í M_J þætti

Frekari upplýsingar

- Þessi kafli er að mestu byggður á kafla 5 hjá Foot (2005) og að einhverju leyti á kafla 10 hjá Eisberg and Resnick (1985).

Heimildir

Eisberg, R. and R. Resnick (1985). *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles* (2 ed.). New York, New York: John Wiley & Sons.

Foot, C. J. (2005). *Atomic Physics*. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.