Frumeinda- og ljósfræði:

LS tengsl

Kafli 5

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

5. vika vor 2020

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 $V_{\mathrm{CF}}(r)$

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

Inngangur

- Þennan Hamiltonian má rita

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

þar sem miðju-sviðs Hamiltonian er

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

og

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

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
- Hverfiþunga 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 $Y_{l_1,m_2}Y_{l_2,m_2}$

- 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 $H_{\rm re}$

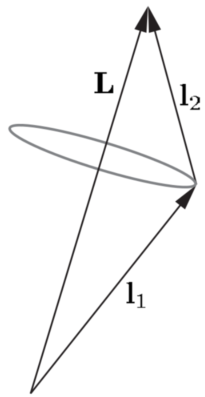
- Í þessari framsetningu er $H_{\rm re}$ er hornalínu fylki og eigingildin eru hornalínu stökin

Inngangur

- Víxlverkun milli rafeindanna, vegna rafstöðufráhrindingar, veldur breytingu á hverfiþunga þeirra, vigrarnir $\mathbf{l}_1$ og $\mathbf{l}_2$ breyta um stefnu, en stærð þeirra breytist ekki
- Þessi innri víxlverkun breytir heildur ekki heildar hverfiþunganum

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

og $\mathbf{l}_1$ og $\mathbf{l}_2$ snúast um þennan vigur eins og myndin sýnir



Frá Foot (2005)

Inngangur

- Þegar ekkert vægi verkar á atóm hefur **L** fasta stefnu í rúminu og $z-$þátturinn M_L er einnig hreyfingarfasti (m_{l_1} og m_{l_2} eru ekki góðar skammatölur)

- Hin sígilda varðveisla hverfiþunga svarar til þess í skammtafræði að virkjarnir L^2 og $L-z$ víxlist báðir við $H_{\rm re}$

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

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

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

- Að auki er $H_{\rm re}$ einnig víxlinn við spuna hvorrar rafeindar fyrir sig $\mathbf{s}_1$ og $\mathbf{s}_2$ en við veljum eiginföll **S** til að andsamhverfa bylgjuföllin eins og í helíni

Inngangur

- Spunaeiginföllin fyrir tvær rafeindir eru $\psi^{\mathrm{A}}_{\mathrm{spin}}$ og $\psi^{\mathrm{S}}_{\mathrm{spin}}$ 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 helínu 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

$$l_1 = 1, \;\; l_2 = 1 \quad \Rightarrow \quad L = 0, 1, 2$$
$$s_1 = \frac{1}{2}, \;\; s_2 = \frac{1}{2} \quad \Rightarrow \quad S = 0, 1$$

sem er ritað

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

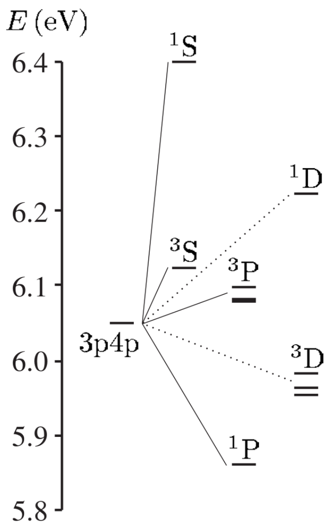
- Beina og skiptitegrið sem ákvarða orkur þessara liða er flókið að reikna

- Hin

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

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

Inngangur

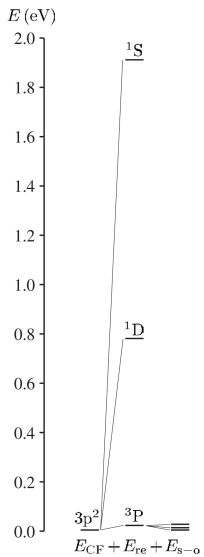


Frá Foot (2005)

- 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 ^{3}P og ^{3}D

Inngangur

- Eins og í helíni leiðir línuleg samantekt fjögurra margfeldinna spuna ástanda til triplet og eins singlet liðar – 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 ^{3}P í samræmi við reglu Hund og þetta er grunnástand kísilatóms
- Í tilfelli 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

$\Longrightarrow$ Dæmi 5.1

$\Longrightarrow$ Dæmi 5.2

$\Longrightarrow$ Dæmi 5.3

Fíngerð í LS tengsla framsetningu

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

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

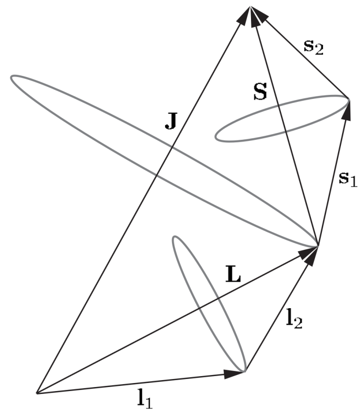
- Fyrir atóm með tvær gildisrafeindir virkar $H_{\mathrm{s-o}}$ sem truflun á ástandið

$$|LM_L SM_S\rangle$$

- 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 $H_{\mathrm{s-o}}$



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

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

- Sýna má að fyrir hverfiþungavigur $\mathbf{J}$ 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 tilfellið 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 $\mathbf{l}_2$ sem og $\mathbf{s}_1$ og $\mathbf{s}_2$ í grunni eiginvigra $|SM_S\rangle$
- Orku hliðrunin er

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

- 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

$\Longrightarrow$ Dæmi 5.4

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

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

- Þar með er orkubilið á milli aðlægðra J stiga

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

Fíngerð í LS tengsla framsetningu

- Jafnan

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

gefur væntigilædi víxlverkunarorku spuna og brautar hverfiþungavigra **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 $\overline{(1/r)\mathrm{d}V(r)/\mathrm{d}r}$, 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 þess jöfnu til að reikna aðskilnað orkustiga í fjölstigi

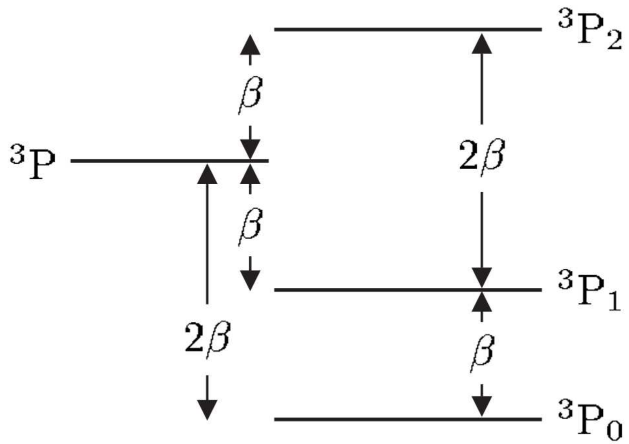
Fíngerð í LS tengsla framsetningu

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

$$
\begin{aligned}
\mathcal{E} = \frac{\beta_{LS}}{2}\left[(J+1)(J+2) - L(L+1) - S(S+1)\right] \\
- \frac{\beta_{LS}}{2}\left[J(J+1) - L(L+1) - S(S+1)\right] \\
= \frac{\beta_{LS}}{2}\left[(J+1)(J+2) - J(J+1)\right] = \beta_{LS}(J+1)
\end{aligned}
$$

- 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 ^{3}P $(L = 1 = S)$ þrjú J stig: $^{(2S+1)}L_J$ = ^{3}P$_0$, ^{3}P$_1$, ^{3}P$_2$ og aðskilnaðurinn milli $J = 2$ og $J = 1$ er tvöfaldur aðskilnaðurinn milli $J = 1$ og $J = 0$

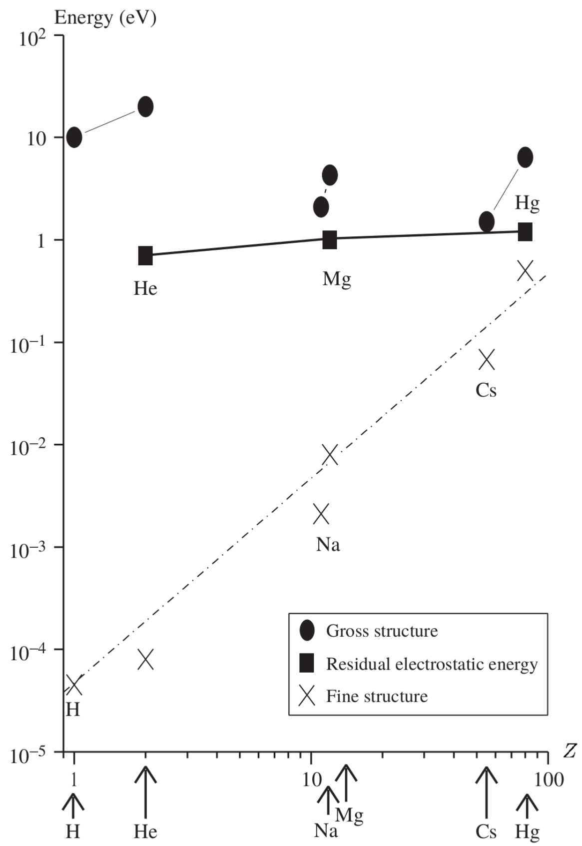
$\Longrightarrow$ Dæmi 5.5

$\Longrightarrow$ Dæmi 5.6

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 $E_{\mathrm{re}} \gg E_{\mathrm{s-o}}$ sem er yfirleitt tilfellið fyrir létt atóm
- Víxlverkun spuna og brautar eykst með aukinni atómtölu, svo að E_{re} nálgast $E_{\mathrm{s-o}}$
- Það er hins vegar aðeins í þeim tilfellum sem skiptitegrið er lítið sem E_{re} er stærra en $E_{\mathrm{s-o}}$

jj tengsla framsetning



Frá Foot (2005)

- Dæmigerð orkugildi sem fall af atómtölunni Z

jj tengsla framsetning

- Þegar $H_{\mathrm{s-o}}$ verkar beint á tiltekna röðun veldur það því að $\mathbf{l}$ og $\mathbf{s}$ 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 sem eru táknuð með

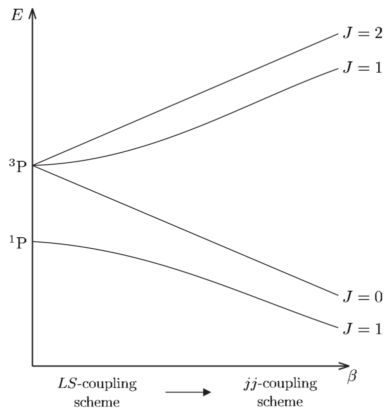
$$(j_1, j_2) = (1/2, 1/2) \quad \text{og} \quad (1/2, 3/2)$$

- Leifðar rafstöðu víxlverkun verkar sem truflun á jj-tengsla stig, og veldur því að hverfiþungi 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

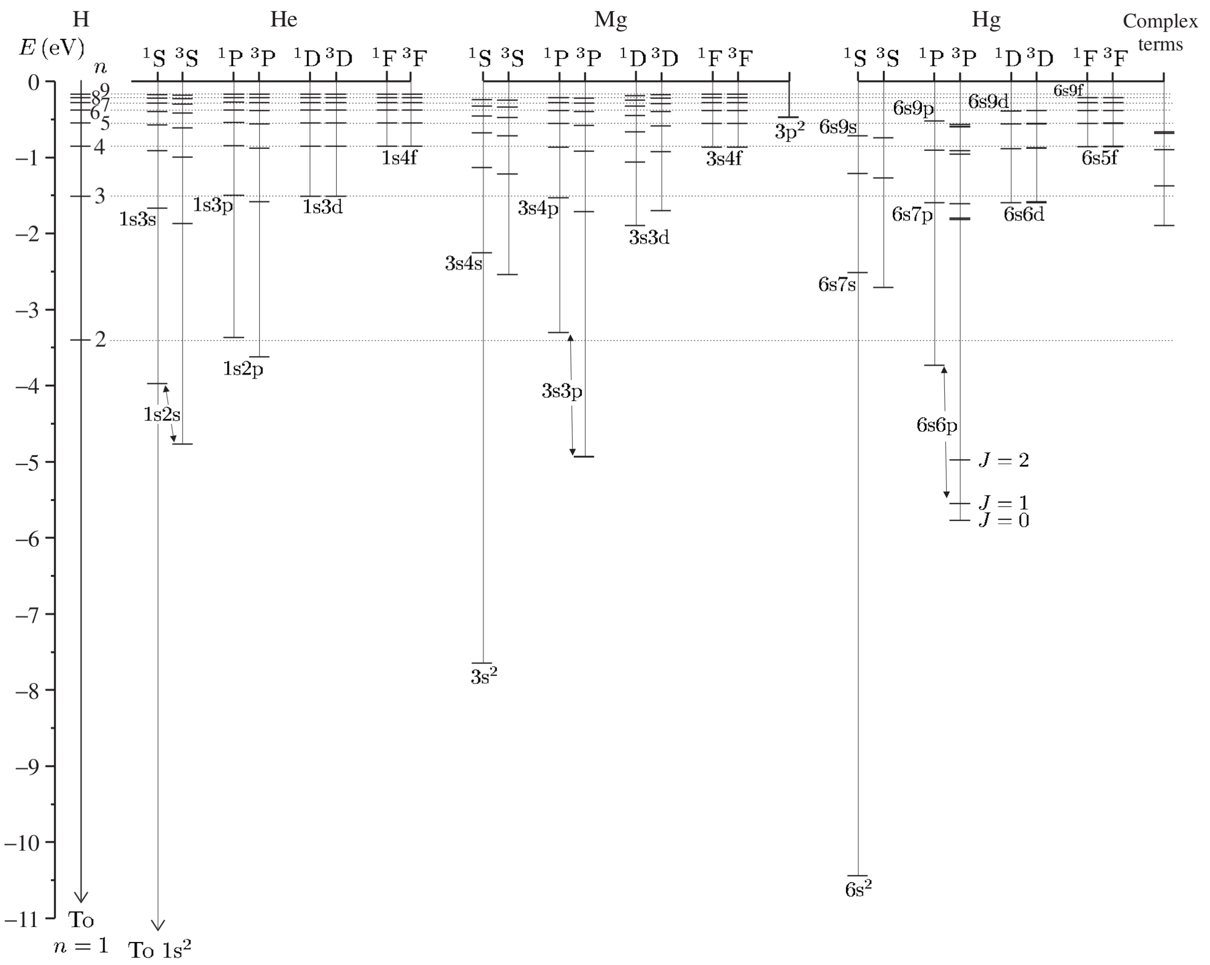
$$(j_1, j_2)_J = (1/2, 1/2)_0, (1/2, 1/2)_1, (1/2, 3/2)_1, (1/2, 3/2)_2$$



Frá Foot (2005)

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

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 ^{1}P og ^{3}P þátta
- Fyrir Mg er bilið á milli lægstu stiganna 2000 m^{-1} og 4100 m^{-1}, sem er nálægt 1 til 2 hlutfallinu í þrístigi
- LS-tengsla framsetning gefur nákvæma lýsingu vegna þess að fíngerðin er smærri heldur en orkumunurinn ($E_{\rm re} \sim 1.3 \times 10^6$ m^{-1}) milli ^{3}P þáttarins við $\sim 2.2 \times 10^6$ m^{-1} og ^{1}P$_1$ þáttarins við 3.5×10^6 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 $^3\mathrm{P}_0$, $^3\mathrm{P}_1$ og $^3\mathrm{P}_2$ sjáum við að bila reglan er ekki vel uppfyllt þar sem 0.46/0.18 = 2.6 (ekki 2.0)
- Þetta frávik frá LS-tenglsum 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	$\Delta J = 0, \pm 1$	$(J = 0 \nleftrightarrow J' = 0)$	Level
2	$\Delta M_J = 0, \pm 1$	$(M_J = 0 \nleftrightarrow M_{J'} = 0$ if $\Delta J = 0)$	State
3	Parity changes		Configuration
4	$\Delta l = \pm 1$	One electron jump	Configuration
5	$\Delta L = 0, \pm 1$	$(L = 0 \nleftrightarrow L' = 0)$	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 $J = 0 \nleftrightarrow J' = 0$
- 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 hverfiþunga

Valreglur í LS-tengsla framsetningu

- Í röðinni $n_1 l_1$ $n_2 l_2$ $n_3 l_3$ ... $n_x l_x$ 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 $^3P_1$
- Reglan ΔS stafar af því að rafsviðstvípólsvirkinn verkar ekki á spuna
- Þrátt fyrir það eru færslur $\Delta S = 1$ leyfðar í kvikasilfuratómi 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 minn en ef þetta væri fullkomlega leyfð færsla

Zeeman hrif

- Segulvægi atóms hefur framlag frá bæði braut og spuna

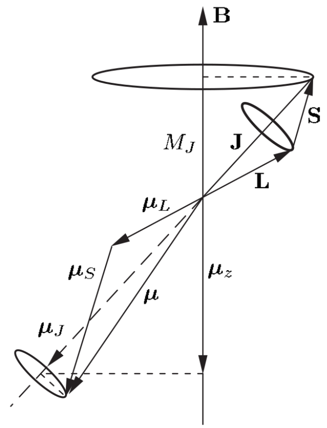
$$\mu = -\mu_{\mathrm{B}}\mathbf{L} - g_s\mu_{\mathrm{B}}\mathbf{S}$$

- Víxlverkun atóms við ytra segulsvið er lýst með

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

- Væntigildi þessa Hamiltonian má finna í grunninum $|LSJM_J\rangle$, ef gefið er að $E_{\mathrm{EZ}} \ll E_{\mathrm{s-o}} \ll E_{\mathrm{re}}$, 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 $\mathbf{J}$ ($\mathbf{B} = B\hat{\mathbf{e}}_z$) sem gefur

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

- Í vigurlíkaninu

$$E_{\mathrm{ZE}} = g_J \mu_{\mathrm{B}} B M_J$$

Zeeman hrif

- Hér er Landé $g-$stuðullinn er

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

eða

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

þar sem brautar $g_L = 1$, og er stundum ritað

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

Zeeman hrif

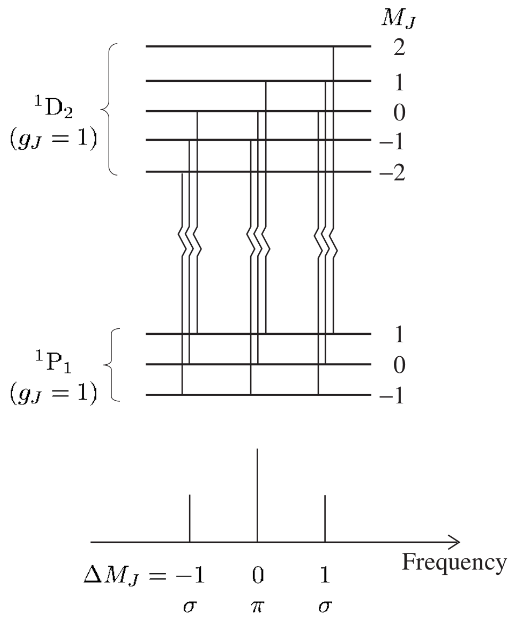
- Ef að auki er gert er ráð fyrir að $g_s \approx 2$ þá er

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

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

$\Longrightarrow$ Dæmi 5.7

Zeeman hrif



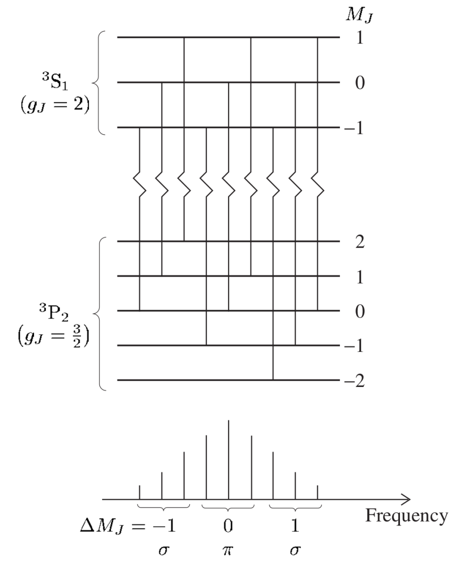
Frá Foot (2005)

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

Zeemanhrif

- Öll önnur mynstur vor svo kölluð anomalous Zeeman hrif
- $\Delta M_J = \pm 1$ færslur sýna tíðnir sem er hliðrað sem nemur $\pm\mu_{\mathrm{B}}/h$ í samanburði við $\Delta M_J = 0$ færslur
- Í atómi sem hefur tvær gildisrafeindir sýnir færsla milli þrístigs þátta óeðlileg Zeeman hrif

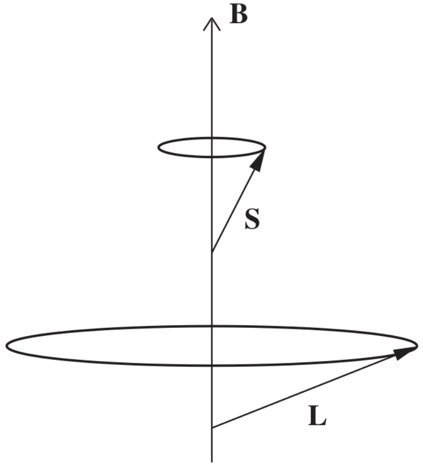
Zeeman hrif



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

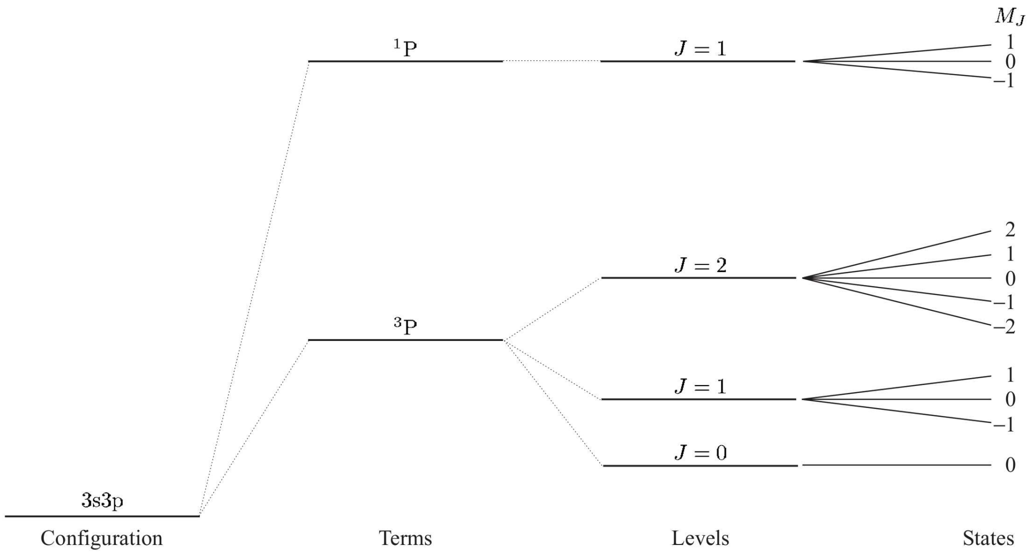


Frá Foot (2005)

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

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

Samantekt



Frá Foot (2005)

- Lagskipting í LS-tengsla framsetningunni
  - Leifðar rafstöðu víxlverkun er ráðandi
  - Víxlverkun spuna og brautar klýfur þætti 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.