

Универзитет “Свети Кирил и Методиј” – Скопје  
Природно математички факултет – институт за физика

Семинарска работа на тема:

# *Земанов ефект*

## ***Земанов ефект***

Изработил

Тони Петковски

Ментор

проф. Д-р Драган Јакимовски

- Мај 2008 -

## *Содржина*

Семинарска работа на тема:.....	1
Земанов ефект.....	1
Содржина.....	2
Вовед.....	3
Нормален Земанов ефект.....	3
Аномален Земанов ефект.....	5
Магнетно поле на сонцето.....	9
Заклучок.....	12
Литература.....	13

## Вовед

Разделувањето на спектралните линии кога атом се наоѓа во многу јако магнетно поле го набљудувал Фарадеј, претходно предвидено врз база на основните класични теории на Лоренц, и прв пат истражувано од Земан, според кој е наречен и самиот ефект. (Питер Земан, 1865 – 1943, прв го забележал ефектот во 1896 година. Во 1902 година добил Нобелова награда за физика. Предавал на Лајденскиот и Амстердамскиот универзитет). Во квантната механика, промената на фреквенцијата и на брановата должина на спектралната линија предизвикува смена на енергетското ниво на едната или и на двете конституенти кои учествуваат во транзицијата. Земановиот ефект кој што се однесува на спектралните линии кои резултираат од транзицијата на поднивоата традиционално се нарекува нормален Земанов ефект, додека оној кој што се однесува кога тоталниот спин на погорните или последните нивоа или и на обете е различен од нула е наречен аномален ефект. Нема фундаментална разлика помеѓу двата ефекта, како и да е ние генерално нема да правиме разлика помеѓу нив, освен со еден исклучок: големата вредност на магнетниот момент на електронот малку го усложнува објаснувањето на аномалниот ефект, па прво ќе го разгледуваме Земановиот ефект во транзицијата помеѓу разделните поднивоа.

## Нормален Земанов ефект

Кај нормалниот Земанов ефект, ако јачината на магнетното поле е доволно голема, а спектралните апарати со кои се врши набљудувањето имаат голема разделна способност, секоја спектрална линија се разделува така што точно може да се определи разликата помеѓу фреквенцијата на спектралните линии на кои е разложена првобитната линија. Растојанието меѓу овие линии е пропорционално на јачината на магнетното поле и е еднакво за сите спектрални линии. Објаснувањето на овој ефект го дава квантната механика. Разделувањето на спектралните линии под влијание на магнетно поле е резултат на разделувањето на енергетските нивоа во атомот. За одделните поднивоа спинот е нула и тоталниот аголен момент  $J$  е еднаков на орбиталниот аголен момент  $L$ . Кога е сместен во јако магнетно поле енергијата на атомот се менува поради енергијата на сопствениот магнетен момент на полето која е дадена со :

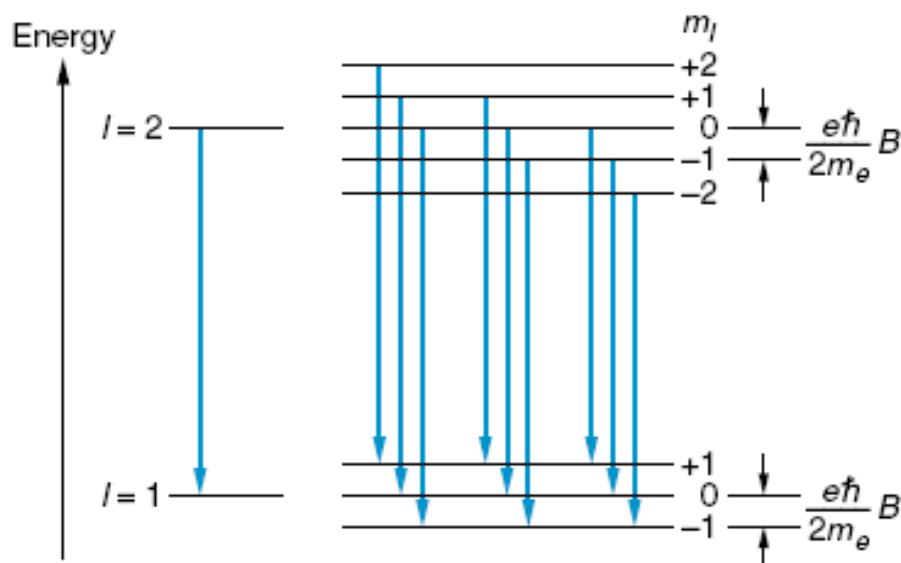
$$\Delta E = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} = -\mu_z B$$

каде  $z$  правецот е дефиниран од правецот на  $\mathbf{B}$ . За  $\mu_z$  ние имаме

$$\mu_z = -m_l \mu_B = -m_l (e\hbar/2m_e) \quad \text{и}$$

$$\Delta E = +m_l \frac{e\hbar}{2m_e} B = m_l \mu_B B \quad (1-1).$$

Откако има  $2l + 1$  вредности за  $m_l$ , секое енергетско ниво се разделува во  $2l + 1$  нивоа. Сликата (1-1) го покажува разделувањето на нивоата во случај на транзиција помеѓу состојбите  $l = 2$  и  $l = 1$ .



Слика(1-1)

Селектното правило  $\Delta m_l = \pm 1$  го распределува бројот на можните линии на постојаниот приказ. Поради подреденото разделување на нивоата има само три различни енергии:

$$\underline{E_0 + e\hbar B/2m_e}, \quad E_0, \quad \text{и} \quad \underline{E_0 - e\hbar B/2m_e}$$

соодветно на транзициите со

$$\Delta m_l = +1, \Delta m_l = 0, \text{ и } \Delta m_l = -1.$$

Може да видиме дека тука ќе бидат само овие енергии за секоја висока и крајна вредност на  $l$ . Промената во фреквенцијата на емитираната спектрална линија е сменетата енергија поделена со  $\hbar$ . Промените на фреквенциите се  $\pm eB/2m_e$  или 0.

### Аномален Земанов ефект

Како што е кажано погоре, аномалниот Земанов ефект се јавува кога спинот на кои било иницијални или крајни нивоа, или и на обете е различен од нула. Пресметката на разделбата на енергетските нивоа е малку комплицирана од фактот дека магнетниот момент за време на спинот почесто е 1 одколку  $1/2$  Боров магнетон, и како резултат на тоа тоталниот магнетен момент не е паралелен на тоталниот аголен момент. Земајќи атом со орбитален аголен момент  $\mathbf{L}$  и спин  $\mathbf{S}$ . Неговиот тотален аголен момент е

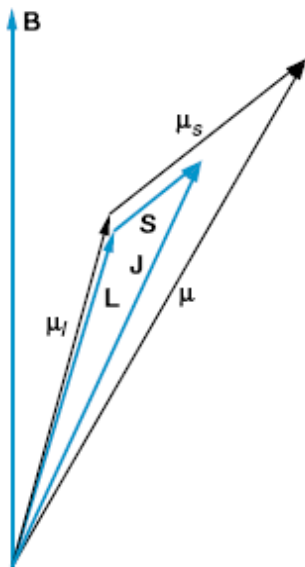
$$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$$

Каде што тоталниот магнетен момент е

$$\boldsymbol{\mu} = -g_l \mu_B \frac{\mathbf{L}}{\hbar} - g_s \mu_B \frac{\mathbf{S}}{\hbar}$$

Од  $g_l = 1$  и  $g_s = 2$  ние имаме

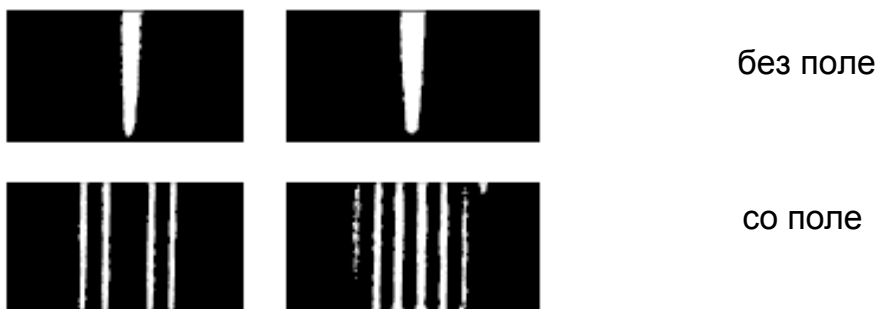
$$\boldsymbol{\mu} = -\frac{\mu_B}{\hbar} (\mathbf{L} + 2\mathbf{S}) \tag{1-2}$$



Слика(2-1): Векторски дијаграм за тоталниот магнетен момент кога  $S$  не е нула. Моментот не е паралелен со тоталниот аголен момент  $J$ , бидејќи  $\mu_s/S$  е двапати  $\mu_l/L$ .

Горната слика е модел на векторски дијаграм на додавката од  $L + S$  за да даде  $J$ . Магнетните моменти се прикажани со црните вектори. Таков векторски модел може да биде употребен за да се пресмета разделувањето на нивоата а ние ќе ги дискутираме само резултатите.

Секое енергетско ниво е разделено во  $2j + 1$  нивоа, одговарајќи на можните вредности за  $m_j$ . За обични лабораториски магнетни полиња, кои што се слаби во споредба со внатрешните магнетни полиња поврзани со спин-орбиталниот ефект, нивото на разделување е мало во споредба со фино-структурните разделувања. За разлика од случајот за поднивоата во нормалниот ефект, Земановото разделување на овие нивоа зависи од  $j$ ,  $l$  и  $s$ , и генерално има повеќе од три различни енергии на поминување според фактот дека горната и долната состојба се разделени со различни количини. Разделувањето на нивоата, т.е размената на енергија поврзана со позицијата на енергетското ниво без поле, може да биде напишана

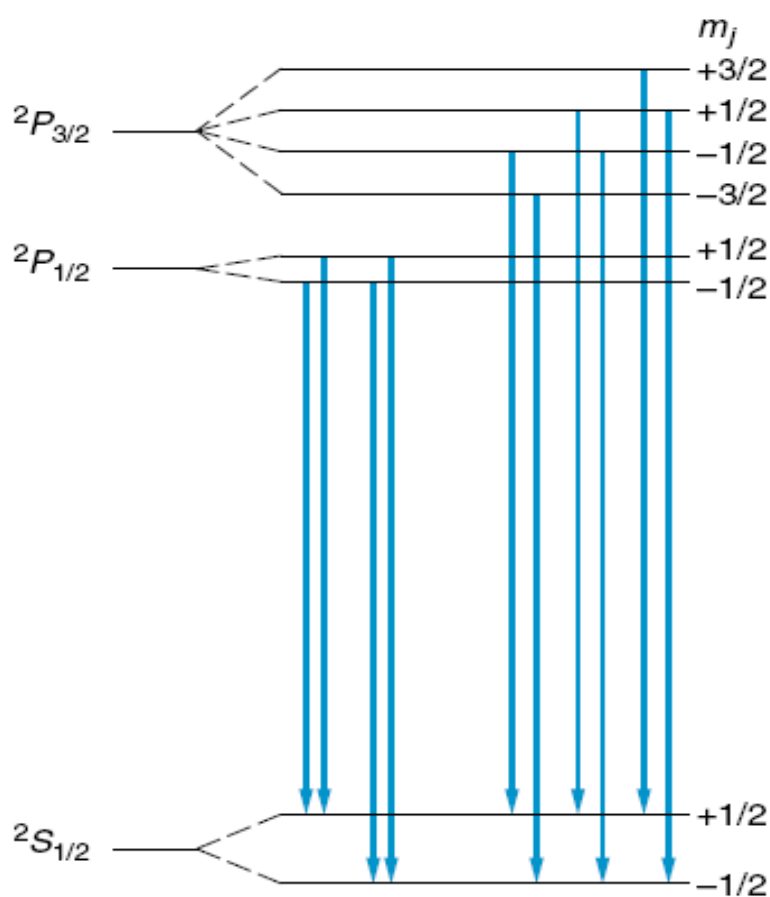


слика(2-3)

$$\Delta E = g m_j \left( \frac{e \hbar B}{2 m_e} \right) = g m_j \mu_B B \quad (1-3)$$

Каде  $g$ , наречен Ландеов  $g$  фактор е даден со

$$g = 1 + \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)} \quad (1-4)$$



Слика (2-4) : Разделувањето на енергетските нивоа во магнетно поле за  $^2P_{3/2}$ ,  $^2P_{1/2}$  и  $^2S_{1/2}$  енергетски нивоа за натриум го покажуваат аномалниот Земанов ефект. Разделувањето на нивоата зависи од  $L$ ,  $S$  и  $J$ , кои водат кон повеќе од три линии забележани во нормалниот ефект. (сликите (2-3) и (2-4) се од Н. Е. White, Introduction to Atomic Spectra (New York: McGraw-Hill Book Company, 1934).

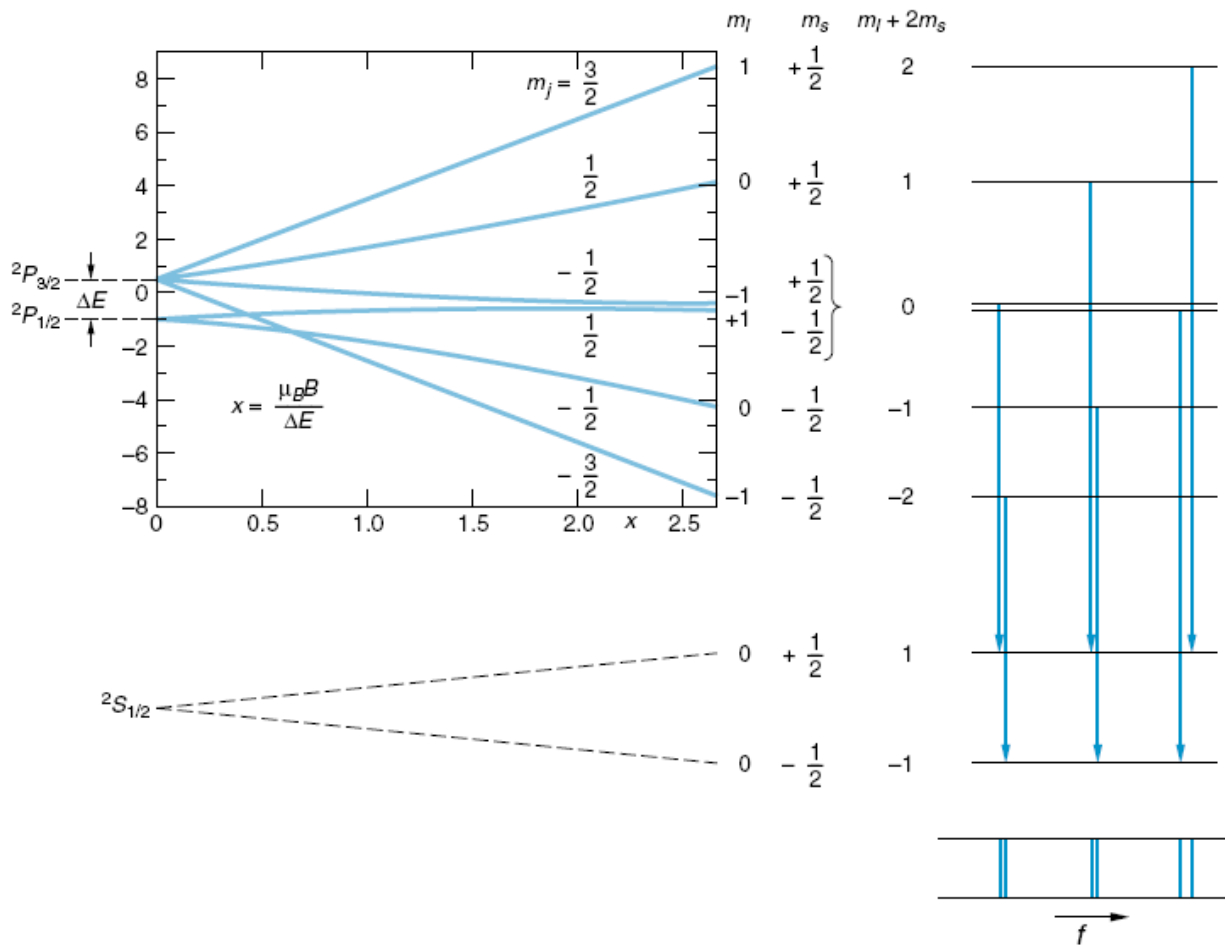
Забележувајќи дека за  $s = 0, j = 1$ , равенката (1-3) го дава разделувањето во нормалниот Земанов ефект како што и се очекуваше. Сликата (2-3) го покажува разделувањето на дублетните нивоа на натриумот  ${}^2P_{1/2}, {}^2P_{3/2}$ , и  ${}^2S_{1/2}$ . Селективното правило  $\Delta m_j = \pm 1$  или 0 дава четири линии за транзицијата  ${}^2P_{1/2} \rightarrow {}^2S_{1/2}$  и шест линии за транзицијата  ${}^2P_{3/2} \rightarrow {}^2S_{1/2}$ , како што е обележано. Енергиите на овие линии може да бидат пресметани под услови  $e\hbar B/2m_e$  од равенките (1-3) и (1-4). Ако надворешното магнетно поле е доволно големо, Земановото разделување е поголемо од фино-структурното разделување. Ако  $\mathbf{B}$  е доволно големо така што би можеле да го занемариме фино-структурното разделување, Земановото разделување е дадено со

$$\Delta E = (m_l + 2m_s) \left( \frac{e\hbar B}{2m_e} \right) = (m_l + 2m_s) \mu_B B$$

Разделувањето тогаш е слично со нормалниот Земанов ефект и се набљудуваат само три линии.

Оваа однесување во јако магнетно поле е наречено Paschen-Back -ов ефект според неговите откривачи, F. Paschen и E. Back.

Сликата (2-5) ја покажува транзицијата на разделувањето на нивоата од аномален Земанов ефект во Paschen-Back -ов ефект каде што магнитудата од  $\mathbf{B}$  се зголемува. Основната причина за промена во појавата на аномалниот ефект каде што  $\mathbf{B}$  се зголемува е тоа што надворешното магнетно поле му дава огромна енергија на спин-орбиталниот ефект и ги раздвојува  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{S}$  така што тие дејствуваат на  $\mathbf{B}$  скоро независно, и покрај тоа што проекцијата на  $\mathbf{L}$  се однесува како да  $\mathbf{S} \approx 0$ , и ефектот се сведува на три линии, каде што секоја со секоја формира дублет.



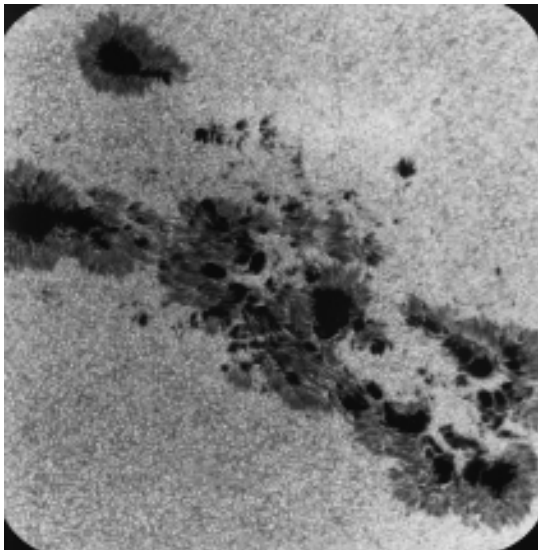
Слика (2-5) : Paschen-Back ов ефект. Кога надворешното магнетно поле е толку големо така што Земановото разделување е појако од спин-орбиталното разделување, разделувањето на нивоата е униформно за сите атоми и се забележуваат само три спектрални линии, како и во нормалниот Земанов ефект. Секоја од трите линии е всушност близу споен дублет, како што е илустрирано од преминот на сликата десно. Ова се истите премини прикажани во слика (2-4).

## Магнетно поле на сонцето

Магнетното поле од сонцето и ѕвездите може да биде определено со мерење на Земановиот ефект на разделување на спектралните линии. Претпоставуваме дека натриумовата спектрална линија емитирана во одреден регион од сончевиот диск е разделена во четири – компонентен Земанов ефект ( слика 2-4). Прашањето е која е

јачината на сончевото магнетно поле  $B$  во тој регион ако промената на брановата должина  $\Delta\lambda$  помеѓу најкратката и најдолгата бранова должина е  $0.022 \text{ nm}$  ако знаеме дека брановата должина на натриумовата спектрална линија е  $589.8 \text{ nm}$ ?

- Натриумовата линија е емитувана во  $3^2P_{1/2} \rightarrow 3^2S_{1/2}$ . Од релацијата (1-4) го пресметуваме Ландеовите  $g$  фактори кои ги користиме за да ги пресметаме  $\Delta E$  вредностите од релацијата 1-3.



Слика(3-1)

Сложена група од сончеви зраци фотографирани во видлива бела светлина. Силните магнетни полиња поврзани со сончевите зраци се мерат со набљудување на Земановиот ефект на разделување на спектралните линии. (слика од *National Solar Observatory, Sacramento Peak*)

За  $3^2P_{1/2}$  НИВО:

$$g = 1 + \frac{\frac{1}{2}(\frac{1}{2} + 1) + \frac{1}{2}(\frac{1}{2} + 1) - 1(1 + 1)}{2(\frac{1}{2})(\frac{1}{2} + 1)} = 2/3$$

За  $3^2S_{1/2}$  НИВО:

$$g = 1 + \frac{\frac{1}{2}(\frac{1}{2} + 1) + \frac{1}{2}(\frac{1}{2} + 1) - 0}{2(\frac{1}{2})(\frac{1}{2} + 1)} = 2$$

И од релацијата (1-3);

$$\text{За } 3^2P_{1/2} \text{ НИВО: } \Delta E = \left(\frac{2}{3}\right) \left(\pm \frac{1}{2}\right) (5.79 \cdot 10^{-5} \text{ eV/T}) B$$

За  $3^2S_{1/2}$  ниво: 
$$\Delta E = 2 \left( \pm \frac{1}{2} \right) (5.79 \cdot 10^{-5} \text{ eV} / T) B$$

Најдолгата линија со бранова должина  $(m_j = -\frac{1}{2} \rightarrow m_j = +\frac{1}{2})$  ќе има:

$$-1.93 \times 10^{-9} B - 5.79 \times 10^{-9} B = -7.72 \times 10^{-9} B \text{ eV}$$

Најкратката линија со бранова должина  $(m_j = +\frac{1}{2} \rightarrow m_j = -\frac{1}{2})$

ќе има:

$$1.93 \times 10^{-9} B + 5.79 \times 10^{-9} B = 7.72 \times 10^{-9} B \text{ eV}$$

Целосната енергетска разлика помеѓу овие два фотона е

$$\Delta E = -1.54 \times 10^{-8} B \text{ eV}$$

Од  $\lambda = 1/f = hc/E, \Delta\lambda = -(hc/E^2)\Delta E = 0.022 \text{ nm}$ . Тогаш имаме

$$\Delta E = -0.022 \text{ nm} (E^2/hc) = -1.54 \times 10^{-8} B$$

каде  $E = hc/\lambda = hc/(589.9 \text{ nm})$ . Конечно добиваме

$$B = \frac{(0.022 \times 10^{-9})hc}{(589.8 \times 10^{-9})^2(1.54 \times 10^{-8})(1.60 \times 10^{-19})}$$

$$B = 0.51 \text{ T}$$

За споредба, просечното магнетно поле на Земјата е околу **0,00005 T**

## Заклучок

Земановиот ефект претставува еден од доказите за просторно квантирање. Според тоа, кога моментот на импулсот би добивал какви било ориентации во просторот, ефектите од магнетното поле би се манифестирале со ширење на спектралните линии, а не со нивно разделување. Изложената теорија може да се примени само на оние појави кај кои дејството на спинот е занемарено. Теориските резултати укажувале на расцепување на спектралните линии во триплети. Меѓутоа, експерименталните резултати укажувале дека ваквото расцепување на спектралните линии се среќава доволно ретко. Подоцна е утврдено дека тоа се случува кога: 1) сумарниот спин на електроните во атомот е еднаков на нула и 2) во релативно силни магнетски полиња. Во сите други случаи постои посложено расцепување и за нивно теоретско толкување е неопходна Дираковата теорија за честичка со спин  $\frac{1}{2}$ . Од историски причини ефектите поврзани со спинот се наречени аномален Земанов ефект. Во граничен случај, кога спинот е еднаков на нула, се манифестират ефектите што го носат називот нормален Земанов ефект.

## *Литература*

- [http://en.wikipedia.org/wiki/Zeeman\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Zeeman_effect)
- <http://enjoy.phy.ntnu.edu.tw/file.php?file=/120/zeeman.pdf&shared=228>
- <http://cat.middlebury.edu/~PHManual/zeeman.html>
- <http://www.physik.unibas.ch/Praktikum/VPII/Zeeman/zeeman.pdf>
  
- Ѓорѓи Ивановски: Квантна механика 2, УКИМ ПМФ Скопје (2000)
- Невенка Андоновска: Вовед во атомската и нуклеарната физика, УКИМ ПМФ Скопје (2001)
- Ronald Gautreau: Schaum's Outline of modern physics, second edition (1999)







