

# 《原子物理学》

## 第四章 原子中电子的自旋

# 上一节回顾

- 碱金属双线的描述 (589.0nm、589.6nm) **3P-→3S**
- 碱金属的原子实
  - 轨道贯穿 ==》 量子数亏损
  - 原子实极化
- 自旋磁矩和轨道磁矩之间的相互作用
  - 电子自旋磁矩感受到轨道运动

$$\Delta E_{l,s} = \frac{Rhc\alpha^2 Z^{*4}}{n^3 l(l + \frac{1}{2})(l + 1)} \frac{j(j + 1) - l(l + 1) - s(s + 1)}{2}$$

- 原子内部磁场强度的估计
- 跃迁选择定则:  $\Delta l = \pm 1$   $\Delta j = 0, \pm 1$  (**0 → 0 除外**)  $\Delta m_l = 0, \pm 1$

# 上一节回顾

- 原子核与核外电子的电场作用：主量子数  $n$ , 轨道角动量  $l$ , 磁  $m$
- 电子L-S 耦合导致的能级分裂: 碱金属双线
- 氢原子光谱的精细结构
  - 电子L-S耦合
  - 电子相对论质量修正
  - 电子相对论势能修正

$$E = -\frac{hcR}{n^2} - \frac{hcR\alpha^2}{n^4} \left( \frac{n}{j+1/2} - \frac{3}{4} \right), j = l \pm \frac{1}{2}$$

- 兰姆位移
  - $2^2S_{1/2}$  比  $2^2P_{1/2}$  高  $\Rightarrow$  QED
- 核自旋I-J耦合：超精细结构
- 弱外磁场：塞曼效应

# 超精细结构

- 比精细结构小了三个数量级的能级移动或分裂，它源自原子核的自旋角动量 $\vec{I}$ ，电四极矩 $\vec{Q}$ 及同位素效应的影响，其数值只有 $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ 。这里我们只简单介绍原子核磁矩导致的超精细结构。

自旋轨道相互作用引起的能量变化：

$$U = \frac{1}{2} \frac{Z^* e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e^2 c^2} \frac{1}{r^3} \vec{S} \cdot \vec{L}$$

原子核磁矩  $\vec{\mu}_I$  和电子产生的磁场相耦合引起的能量变化为：

$$U = \vec{\mu}_I \cdot \vec{B}_e = A \vec{I} \cdot \vec{J}$$

核自旋角动量和电子的总角动量会耦合出一个新的角动量：

$$\vec{F} = \vec{I} + \vec{J}$$

# 原子核的自旋

原子核有自旋，自旋角动量为 $I$ ，是量子化的。

$$|\vec{I}| = \sqrt{I(I+1)}\hbar \quad \text{其中 } I \text{ 称为核的自旋量子数}$$

$$|\vec{I}_z| = m_I \hbar \quad (m_I = -I, -I+1, \dots, I-1, I) \quad m_I \text{ 为核磁量子数}$$

原子核	自旋量子数	磁矩
${}^2_1\text{H}$	1	$+0.8565\mu_N$
${}^6_3\text{Li}$	1	$-0.8213\mu_N$
${}^7_3\text{Li}$	3/2	$+3.2532\mu_N$
${}^{39}_{19}\text{K}$	3/2	$+1.136\mu_N$

原子核的磁矩与核自旋角动量的关系

$$\vec{\mu}_I = g_I \frac{e}{2M_p} \vec{I}$$

$$\begin{aligned} \mu_I &= g_I \frac{e}{2M_p} \sqrt{I(I+1)} \cdot \hbar \\ &= g_I \sqrt{I(I+1)} \mu_N \end{aligned}$$

$$\mu_{IZ} = g_I m_I \mu_N$$

核磁子

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2M_p}$$

# 原子的总角动量

➤ 原子的总角动量  $\vec{F} = \vec{I} + \vec{J}$

$\vec{I}$  和  $\vec{J}$  的相互作用造成能级的超精细结构分裂。

量子数  $F=(I+J), (I+J-1), \cdots, |I-J|$

不同F的状态具有不同能量，于是原来不考虑核自旋 ( $F=J$  为定值) 的能级又分裂成  $(2I+1)$  个子能级。

➤ 磁性超精细效应引起的附加能量:  $U = \vec{\mu}_I \cdot \vec{B}_e = A \vec{I} \cdot \vec{J}$

$$\Delta E_{\text{II}} = \frac{a}{2} [ F(F+1) - J(J+1) - I(I+1) ]$$

对于氢原子(类氢离子)  
，量子力学计算得:

$$a = -2g_I \left( \frac{m_e}{M_p} \right) \frac{\alpha^2 Z}{n} E_n \frac{1}{j(j+1)(2\ell+1)}$$

# 超精细结构量级

精细结构相互作用能的量级为  $a^2 E_n$  ,  
超精细结构的相互作用能是精细结构的  $(m_e/M_I)$ , 大约  $1/1837$

◆ 总能量:  $E = E_n + \Delta E_{n,j}(\text{精细}) + \Delta E_{IJ}(\text{超精细})$

超精细含义: 在一定  $j$  值对应能级上的非常细小的分裂.

◆ 结合  $\ell, j$  的选择定则:  $\Delta \ell = \pm 1$

$$\Delta j = 0, \pm 1$$

F的跃迁选择定则:  $\Delta F = 0, \pm 1$

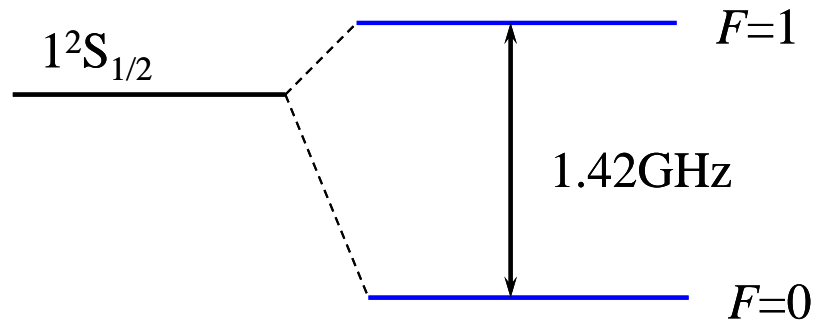
超精细能级间的跃迁, 由  $F, \ell, j$  的选择定则共同确定.

# 氢原子的超精细结构

氢原子,  $I=1/2$ ,  $J=1/2$ :

$$F = 0, 1 \quad U = \vec{\mu}_I \cdot \vec{B}_e = A \vec{I} \cdot \vec{J}$$

$$DE_{\text{H}} = \frac{a}{2} [ F(F+1) - J(J+1) - I(I+1) ]$$



$$U = \begin{cases} +\frac{1}{4}a & F=1 \\ -\frac{3}{4}a & F=0 \end{cases}$$

$$\Delta E = U(F=1) - U(F=0) = a$$

$\nu = 1\,420\,405\,751.7667 \pm 0.009 \text{ Hz}$ , 相应的波长为  $21 \text{ cm}$

$$a = -2g_I \left( \frac{m_e}{M_p} \right) \frac{\alpha^2 Z}{n} E_n \frac{1}{j(j+1)(2\ell+1)}$$



# 21cm谱线在天文学上的应用

---

- 21cm线位于电磁波谱上的微波。这个波长的辐射在无线电天文学上有重要应用，因为无线电波可以穿过对可见光是不透明的星际云等巨大星际介质区域。在这个波段的电波可以轻易通过地球的大气层被观测到。
- 一般假定氢原子是规则分布在整个星系之中，在各个观测方向都可以发现到21cm线，唯一的不同在于每条线的多普勒效应强度。因此由射电天文望远镜观测到的21cm谱线，科学家可以计算出银河系每个旋臂的相对速度。

# 21cm谱线

---

- 跃迁
  - 自发跃迁几率低  $\leftarrow$  寿命约1千万年
  - 被宇宙尘埃吸收的几率也小  $\Rightarrow$  携带远古宇宙的信息
  - 低温碰撞  $\Rightarrow$  粒子数反转
- 宇宙学红移  $\Rightarrow$  接收到的波长随产生时间变长  $\Rightarrow$  气体云团的视向速度
- 谱线观测  $\Rightarrow$  氢分布图  $\Rightarrow$  银河系旋臂结构
- 赛曼效应  $\Rightarrow$  星系内磁场

# Na 原子双黄线的超精细光谱

Na 原子双黄线: **主线系**  $3^2P \rightarrow 3^2S$   $I=3/2$  **超精细结构**  $F$

$^2P \rightarrow ^2P_{3/2}, ^2P_{1/2}$  (精细结构)

$$^2P_{3/2}: j=3/2; I=3/2 \rightarrow F=3, 2, 1, 0$$

$$\Delta E_{I,j} = \dots\dots$$

$$^2P_{1/2}: j=1/2; I=3/2 \rightarrow F=2, 1$$

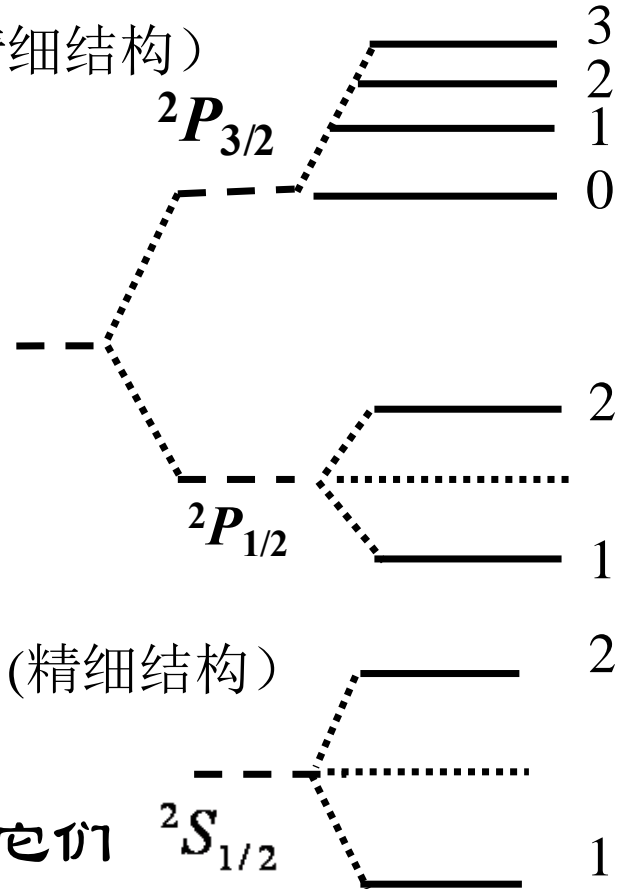
$$\Delta E_{I,j} = 3a_{I,j}/4, -5a_{I,j}/4$$

$$^2S_{1/2}: j=1/2; I=3/2 \rightarrow F=2, 1$$

$$\Delta E_{I,j} = 3a_{I,j}/4, -5a_{I,j}/4$$

$^2S \rightarrow ^2S_{1/2}$  (精细结构)

- 对S能级: 靠近核, 受核自旋的影响大
- 对P能级: 距核远, 受核自旋影响小, 它们的分裂非常小, 通常情况下可不予考虑.



$$\Delta E_{IJ} = \frac{a}{2} [ F(F+1) - J(J+1) - I(I+1) ]$$

# 原子超精细结构的应用 —— 铯 ( $^{133}\text{Cs}$ ) 原子钟

$^{133}\text{Cs}$  (133=质子数加中子数,  $m_p \approx m_n$ ) :  $I=7/2$

铯原子基态:  $^2\text{S}_{1/2}$

铯原子基态的**超精细能级**:

$$j = 1/2; \quad I=7/2 \Rightarrow F = 4, 3$$

**$F=4$ 和 $F=3$**  间的能级间距  $\Delta E_{I,j}$

$\Rightarrow$  超精细跃迁频率:  $\nu = 9192\,631\,770\text{ Hz}$  ( $\sim 9193\text{MHz}$ )

原子钟技术获得了  
1989年诺贝尔物理奖

国际计量大会将**铯原子基态两个超精细能级辐射频率 $\nu$ 次所经历的时间定义为1秒**.

2012年12月, 中国计量科学院自主研发的铯原子钟精度可达到**1500万年误差才1秒**. 该系统已成为我国“北斗二号”卫星导航的地面原子时基准钟.

# 赛曼效应

原子的磁矩及磁场中的能级分裂

# 塞曼 (P. Zeeman, 1865-1943)



- 荷兰人，1902年诺贝尔物理学奖获得者
- "in recognition of the extraordinary service they rendered by their researches into the influence of magnetism upon radiation phenomena"

1896年，塞曼在研究磁场对光的影响实验时发现

*A. J. Kox, Euro. J. Phys. 18 (1997) 139-144*

a flame placed between the poles of a magnet. With the help of a grating, a spectrum is created. The yellow sodium D-lines appear as narrow and sharp lines. 'When the magnet is switched on', the description continues, 'the lines become wider until they are two to three times as wide'. This simple sentence describes the discovery

something new. A publication describing his experiments was presented by Kamerlingh Onnes at the monthly meeting of Saturday 31 October of the Section of Sciences of the Dutch Academy of Sciences. In it Zeeman concluded:

The experiments have made it increasingly probable that absorption and thus also emission lines of a gaseous substance are widened by magnetic forces. [4]

# 塞曼效应

---

把原子放入磁场中，其光谱线发生分裂，原来的一条谱线分裂成几条，且分裂后的谱线成分是偏振的，这种现象称为**塞曼效应**。

这是1896年由荷兰物理学家塞曼在实验中观察到的。**光谱的分裂根源于其能级的分裂。**

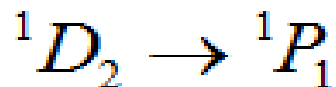
根据谱线分裂情况的不同，塞曼效应分为**正常塞曼效应**与**反常塞曼效应**。

# 正常塞曼效应

## 镉 (Cd) 的 6438.47 埃 红色谱线的塞曼效应

把镉原子放在磁场中，垂直于磁场的方向观察，发现这条谱线分裂为三条，彼此间隔相等。三条谱线是平面偏振的

镉原子



无 B



垂直于  
B 方向  
观察



原位

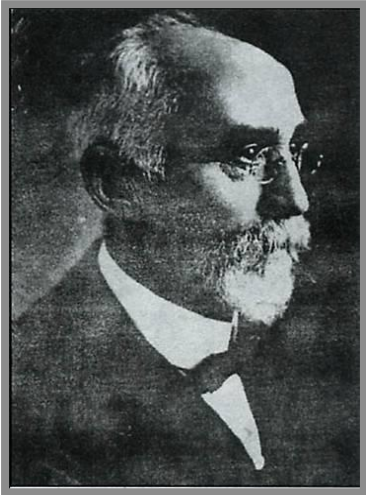
等间隔分裂



# 正常塞曼效应经典解释

正常塞曼效应虽然是一种量子效应，但当时塞曼的老师洛伦兹 (Lorentz) 却很快作出了经典电磁学解释。原有的谱线分裂成了等间隔的三条：

$$\begin{cases} n_0 - L \\ n_0 \\ n_0 + L \end{cases}$$



洛伦兹, 荷兰  
(1853-1928)

与塞曼共同在1902  
年获诺贝尔奖

洛伦兹认为光的发射是因为物质中电子的振荡引起的，任意一个方向上的振动都可以分解为沿着磁场的振动和垂直于磁场方向平面内两个方向的圆运动，共三个分量。

磁场对做相反方向圆运动的电子的洛伦兹力，分别使频率变慢和变快。因此，磁场中光源发出的谱线会分裂成三条，而且是偏振的。

# 反常塞曼效应

1897年12月，普勒斯顿(T.Preston)发现：当磁场较弱时，塞曼分裂的数目可以不是三个，间隔也不尽相同。这称为反常塞曼效应。

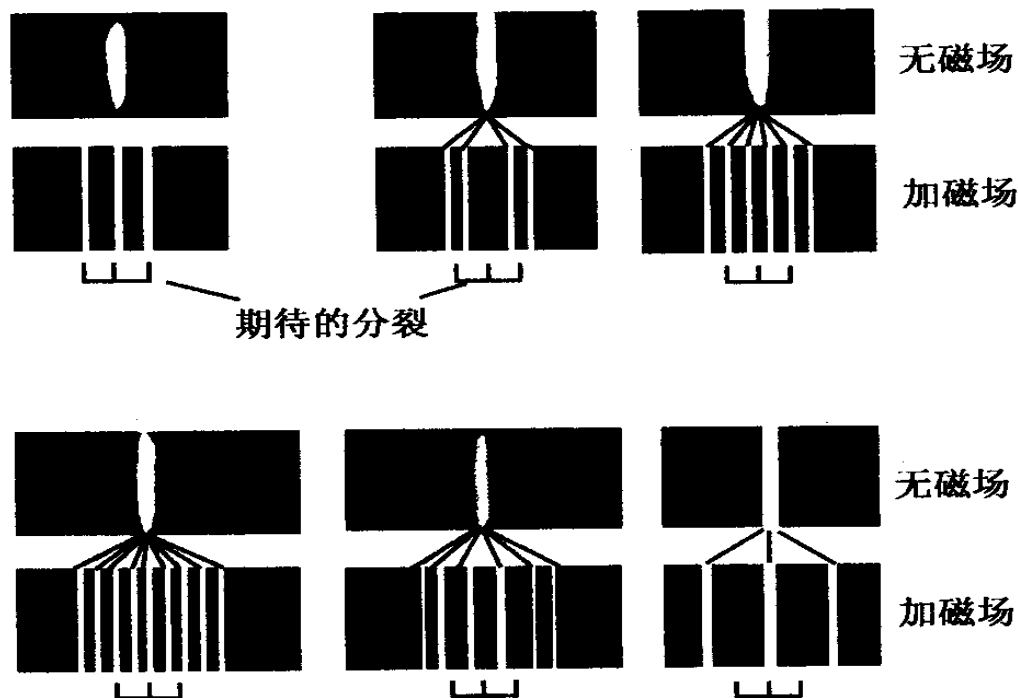


图 22.5 塞曼效应的实验结果

# 反常塞曼效应 举例

① 弱磁场下：Na黄光：

$$D_2 \text{ 线 } 589.0\text{nm } {}^2P_{3/2} \rightarrow {}^2S_{1/2} \quad (1\text{分为}6)$$

；

② Li 原子  ${}^2D_{3/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}$  (1分为6)

$$D_1 \text{ 线 } 689.6\text{nm } {}^2D_{3/2} \rightarrow {}^2P_{1/2} \quad (1\text{分为}4)$$

；

$$\Delta L = \pm 1$$

$$\Delta J = 0, \pm 1, \quad 0 \rightarrow 0 \text{ 除外}$$

$$\Delta m_J = 0, \pm 1$$

在量子力学和电子自旋概念建立之前，反常塞曼效应一直不能解释（约30年），被列为“**原子物理中悬而未决的问题**”之一。

**反常塞曼效应**是乌仑贝克-古兹米特提出电子自旋假设的根据之一。利用电子自旋假设有效地解释了反常塞曼效应，同时也证明了**电子自旋**假设的正确性。

**史特恩-盖拉赫实验和反常塞曼效应**，都需要用一种全新的物理图象作出解释。而正是这两个实验导致了“**电子自旋**”假定的提出。

# 塞曼效应

- 原子磁矩与外磁场发生相互作用，导致了原子能级和原子光谱线的分裂现象。

弱磁场中：

$$U = -\vec{\mu}_J \cdot \vec{B} = -\mu_{Jz} B$$

$$U = m_J g_J \mu_B B$$

$$E'_J = E_J + m_J g_J \mu_B B$$

$m_J$ ：磁量子数

无外磁场( $B \rightarrow 0$ )时，此 $2J+1$ 个态简并

有外磁场时，能级一般分裂为 $2J+1$ 条，间隔为 $g\mu_B B$

**正常塞曼效应**：一条谱线在外磁场作用下，分裂为等间隔的三条谱线。因为洛伦兹利用**经典图像**可以解释，因此称“**正常**”。

**反常塞曼效应**：除正常塞曼效应外的塞曼效应。

# 磁场中能级分裂举例

求下列能级的分裂情况：(1)  $^1P_1$ ; (2)  $^2P_{3/2}$ ; (3)  $^4D_{1/2}$

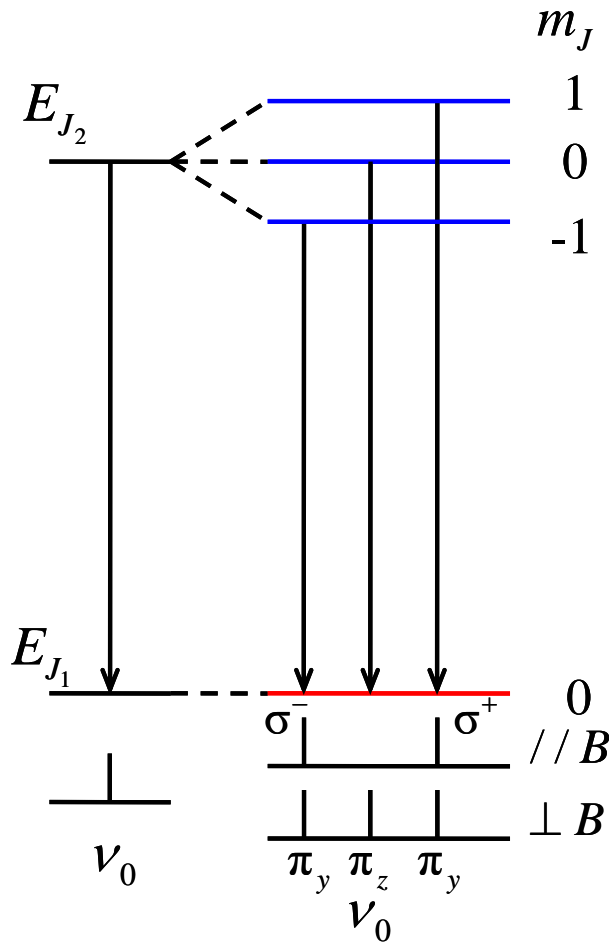
解：(1)  $^1P_1$ :  $g = 1, m_J = 0, \pm 1, \Delta E = m_J g B \mu_B = [1, 0, -1] B \mu_B$

(2)  $^2P_{3/2}$ :  $g = \frac{4}{3}, m_J = \pm \frac{3}{2}, \pm \frac{1}{2}, \Delta E = m_J g B \mu_B = [2, \frac{2}{3}, -\frac{2}{3}, -2] B \mu_B$

(3)  $^4D_{1/2}$ :  $g = 0, m_J = \pm \frac{1}{2}, \Delta E = m_J g B \mu_B = 0$

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

# 塞曼效应的简单图像



$$h\nu = E'_{J_2} - E'_{J_1}$$

$$= (E_{J_2} - E_{J_1}) + (m_{J_2}g_2 - m_{J_1}g_1)\mu_B B$$

$$= h\nu_0 + (m_{J_2}g_2 - m_{J_1}g_1)\mu_B B$$

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m_e}$$

$$\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} = \frac{(m_{J_2}g_2 - m_{J_1}g_1)\mu_B B}{hc} = (m_{J_2}g_2 - m_{J_1}g_1) \mathbf{L}$$

$$\mathbf{L} = \frac{\mu_B B}{hc} = \frac{eB}{4\pi m_e c} \quad \text{洛伦兹单位}$$

$$\mathbf{B}=\mathbf{1T} \text{ 时, } \mathbf{L}=\mathbf{0.466 \text{ cm}^{-1}}$$

磁量子数选择定则:  $\Delta m = m_{J_2} - m_{J_1} = 0, \pm 1$  (当  $\Delta J = 0, 0 \nleftrightarrow 0$ )

# 正常塞曼效应

- 电子发生跃迁前后两个原子态的总自旋 ( $S_1=S_2=0$ ) 都为零的谱线称为单态谱线，单态谱线分裂为三条的现象称为正常塞曼效应。
- 洛伦兹用经典理论首先推导出来的光谱分裂间距公式里并没有量子特征
- 朗德因子  $g$  的定义回顾：

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

- 对于  $S_1=S_2=0 \Rightarrow g_1=g_2=1$
- 再考虑跃迁选择定则：  $\Delta m_J = 0, \pm 1$
- 能级移动为：

$$U = M_J g_J \mu_B B = \begin{cases} \mu_B B & (M_J = 1) \\ 0 & (M_J = 0) \\ -\mu_B B & (M_J = -1) \end{cases}$$

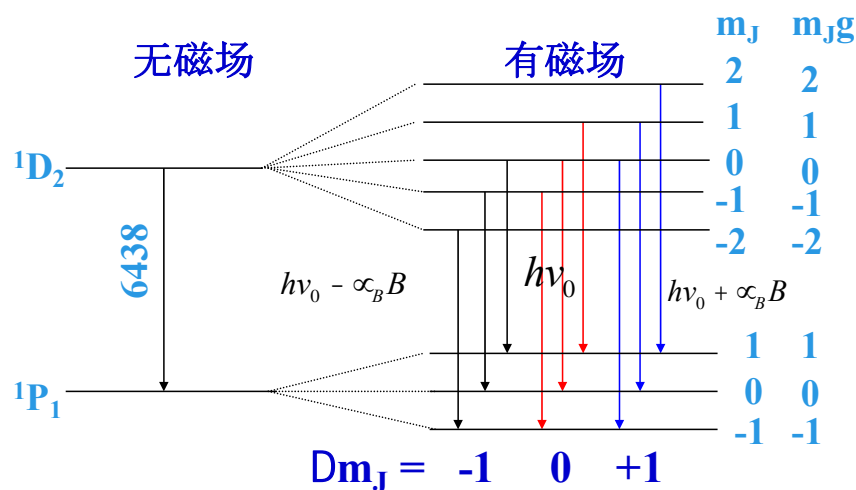
- 分裂光谱间隔：1个拉莫尔频率：  $Lc = eB/4\pi m_e$



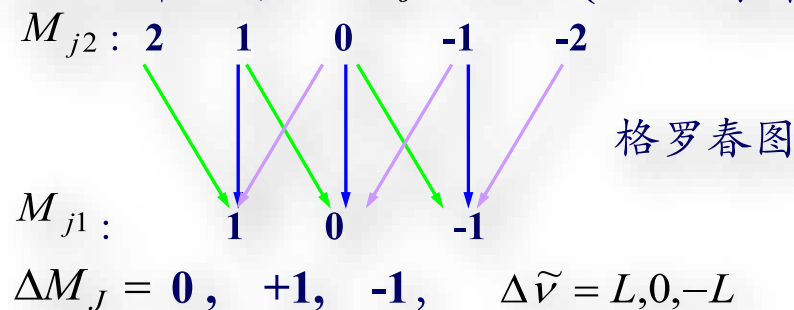
# 镉的6438.47埃谱线的正常塞曼分裂

镉最外层电子组态  $5S^2$ ,  $S_{\text{总}} = 0$

→ 单态谱线

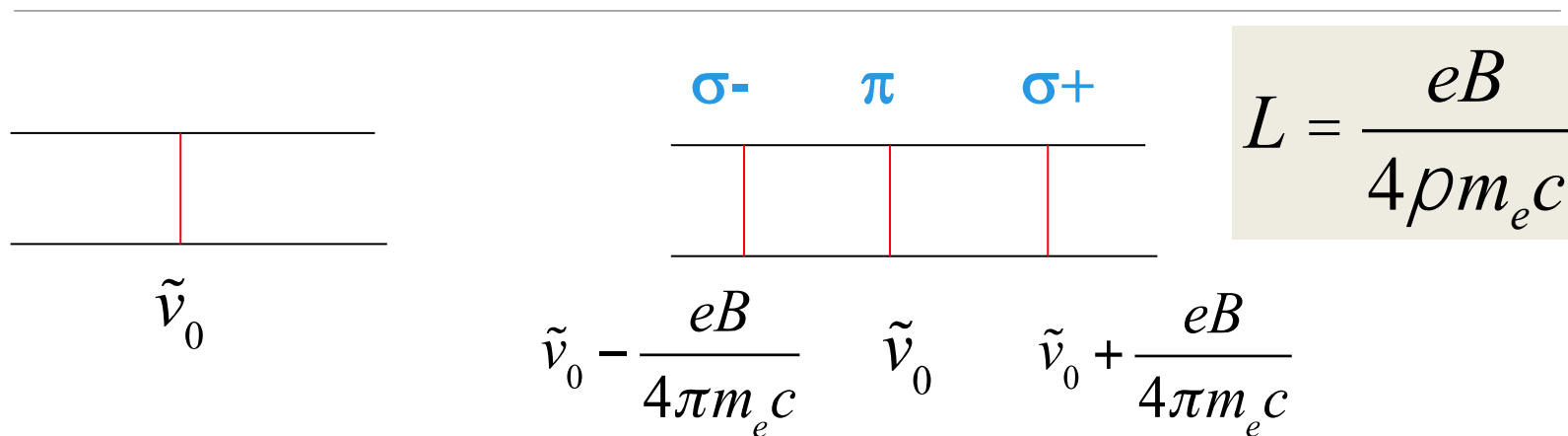


跃迁选择定则:  $\Delta M_J = 0, \pm 1$  ( $0 \rightarrow 0$  除外)



共9个跃迁，但只有三种能量差值，所以出现三条分支谱线，每一条包含三种跃迁，中间那条谱线仍在原谱线位置，左右两条同中间一条的能量差为  $\mu_B B$ 。波数差为  $L = eB / (4\pi m_e c)$ 。

# 洛伦兹经典观点



这里可能没有量子效应。确实这个公式不必用量子理论就可导出来。洛伦兹就是用经典的观点算出了正常的塞曼效应，因此又把它称为洛伦兹单位。可见，在正常塞曼效应下，三谱线间的间隔大小正好是一个洛伦兹单位 $L$ 。

$L$ 的物理意义是：在没有自旋的情况下，一个经典的原子体系的拉莫尔频率除以 $c$ 。

$$n_L = \frac{eB}{4\pi m_e c}$$

# 塞曼效应的偏振特性

在电磁学中，沿 $z$ 方向传播的电磁波（横波）的电矢量必定在 $oxy$ 平面：

$$\begin{cases} E_x = A \cos \omega t \\ E_y = B \cos(\omega t - a) \end{cases}$$

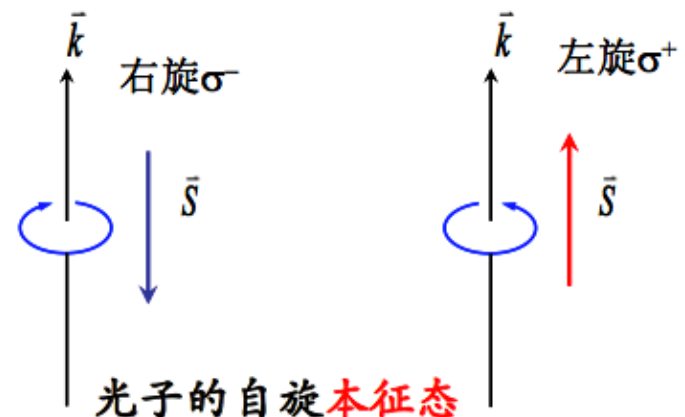
$$\alpha = \begin{cases} 0 \rightarrow \text{线偏振（电矢量在某一方向作周期性变化）} \\ \frac{\pi}{2}, A = B \rightarrow \text{圆偏振（电矢量为恒矢，方向：矢量箭头绕圆周运动）} \end{cases}$$

贝思于1936年**观察到圆偏振光具有角动量**。光的自旋角动量方向和电矢量旋转方向构成右螺旋关系。

**右旋偏振：**角动量方向与传播方向相反

**左旋偏振：**角动量方向与传播方向相同

光子具有自旋，其自旋量子数  
 $S=1, S_z=\pm 1$



# 塞曼效应的发射光谱具有偏振特性

## ● 沿着外磁场方向观察:

只能看到 $\Delta m_J = \pm 1$ 的**两条**谱线, 均为**圆**偏振光

$\Delta m_J = +1$ , 左旋圆偏振光,  $\sigma^+$

$\Delta m_J = -1$ , 右旋圆偏振光,  $\sigma^-$

右旋偏振: 角动量方向与传播方向相反

左旋偏振: 角动量方向与传播方向相同

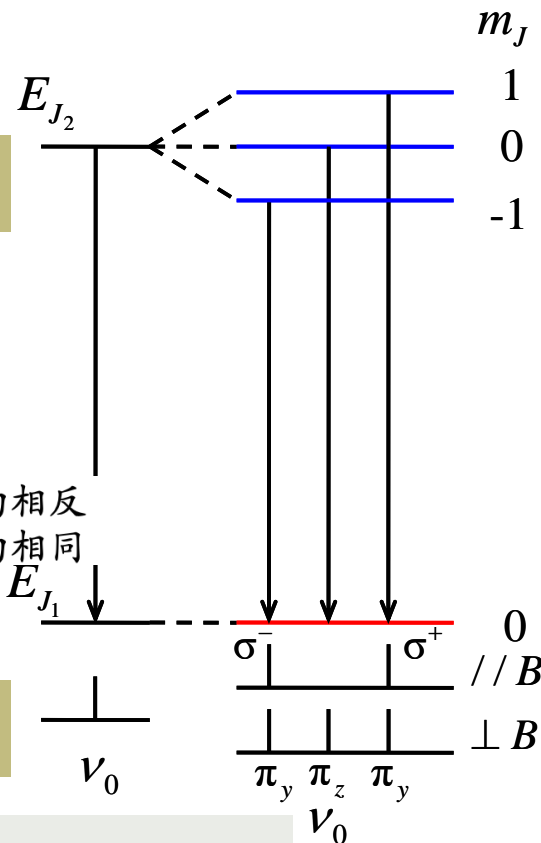
## ● 垂直外磁场方向观察:

能看到 $\Delta m_J = 0, \pm 1$ 的**三条**谱线, 均为**线**偏振光

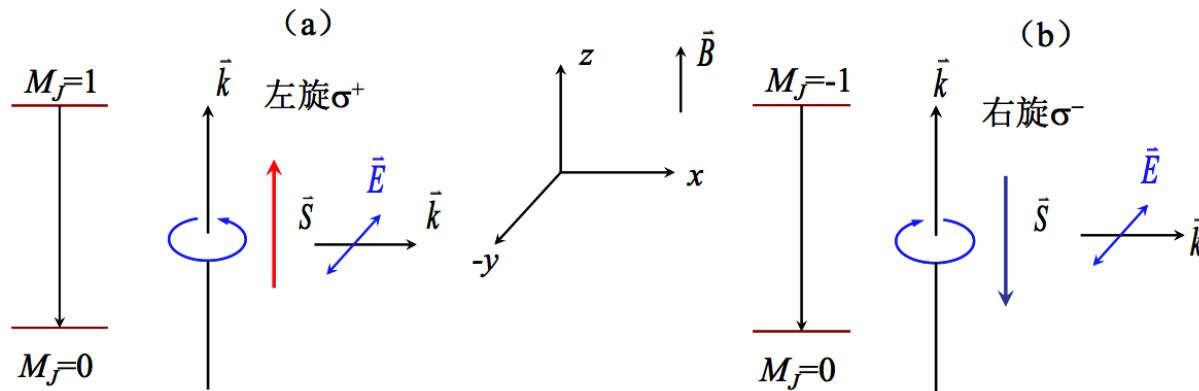
$\pi$

$\Delta m_J = 0$ , 偏振方向沿外磁场方向z的线偏振光 $\pi_z$

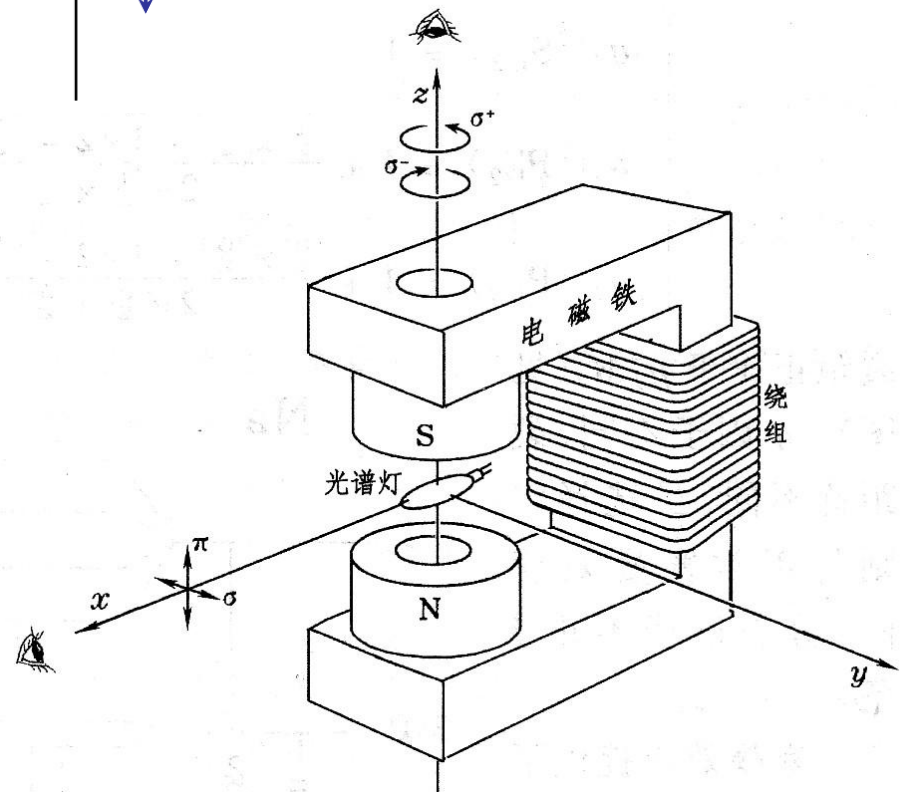
$\Delta m_J = \pm 1$ , 垂直于观测方向x与外磁场方向z,  $\pi_y$



# 跃迁与辐射光子的圆偏振



发光前原子系统的角动量等于发光后原子系统的角动量与所发光子的角动量的矢量和 (光子的角动量为  $\hbar$ )。



# 塞曼效应偏振性讨论

- 对于 $\Delta M = M_2 - M_1 = \pm 1$ 两条谱线，电矢量在 $xy$ 平面，因此，在与磁场 $B$ 垂直的方向(例如 $x$ 方向)观察时，只能见到 $E_y$ 分量(横波特性的)，我们观察到二条与 $B$ 垂直的线偏振光 $\pi_y$ 。
- 对于 $\Delta M = M_2 - M_1 = 0$ 的情况，原子在磁场方向( $z$ 方向)的角动量不变，光子必定具有在与磁场垂直方向(设为 $x$ 方向)的角动量，光的传播方向与磁场方向垂直。假设自旋角动量 $S$ 沿 $x$ 方向，光的电矢量必定在 $yz$ 平面内，可以有 $E_y$ 和 $E_z$ 分量。但是，凡角动量方向在 $xy$ 平面上的所有光子都满足 $\Delta M = 0$ 的条件，因此，平均的效果将使 $E_y$ 分量为零。
  - 在沿磁场方向( $z$ )上既观察不到 $E_y$ 分量，也不会有 $E_z$ 分量(横波特性的)，因此就观测不到 $\Delta M = 0$ 相应的 $\pi$ 偏振谱线。
  - 垂直磁场方向观察，只能观察到 $E_z$ ，线偏振光，即  $\pi$ 偏振光。

# 反常塞曼效应

- 反常塞曼效应是上下能级  $S_1, S_2$  都不等于零,  $g_1, g_2$  都不等于1, **非单态能级**之间的跃迁
- 讨论**钠**双线  $3^2P_{3/2,1/2} \rightarrow 3^2S_{1/2}$  跃迁在弱外磁场中的分裂情况, 并给出其发射光谱。

解：朗德因子：

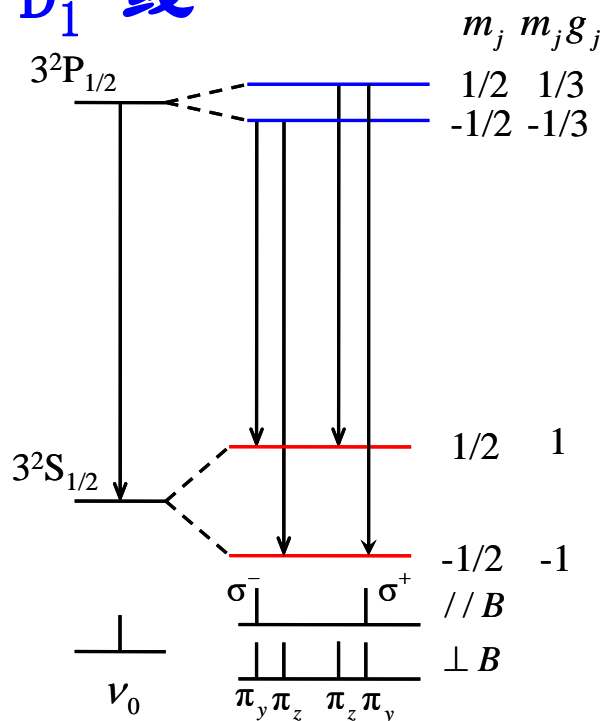
$$3^2S_{1/2}: g_{j_1} = 1 + \frac{\frac{1}{2} \times \frac{3}{2} + \frac{1}{2} \times \frac{3}{2} - 0}{2 \times \frac{1}{2} \times \frac{3}{2}} = 2$$

$$3^2P_{1/2}: g_{j_2} = 1 + \frac{\frac{1}{2} \times \frac{3}{2} + \frac{1}{2} \times \frac{3}{2} - 1 \times 2}{2 \times \frac{1}{2} \times \frac{3}{2}} = \frac{2}{3}$$

$$3^2P_{3/2}: g_{j_3} = 1 + \frac{\frac{3}{2} \times \frac{5}{2} + \frac{1}{2} \times \frac{3}{2} - 1 \times 2}{2 \times \frac{1}{2} \times \frac{3}{2}} = \frac{4}{3}$$

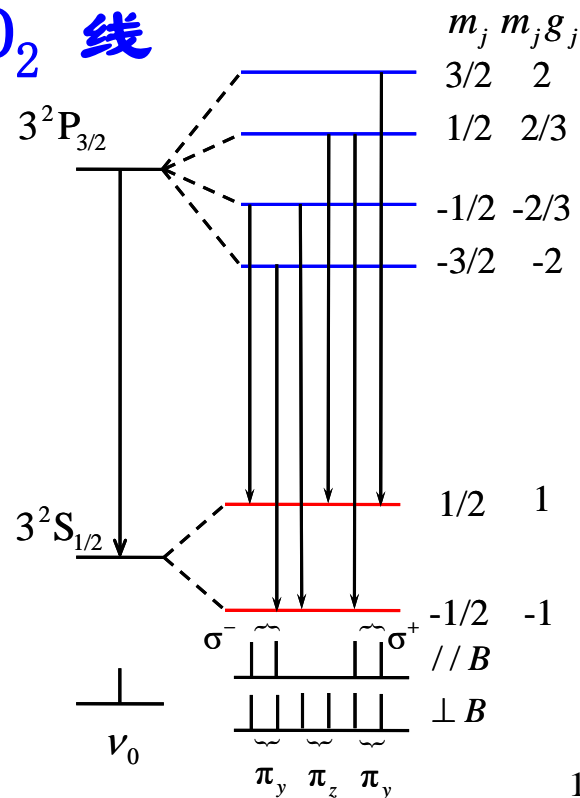
# 钠双线在外磁场中反常塞曼效应

**D<sub>1</sub> 线**



$$\frac{1}{l} - \frac{1}{l_0} = \left\{ \begin{array}{c} -\frac{4}{3} \\ -\frac{2}{3} \\ \frac{2}{3} \\ \frac{4}{3} \end{array} \right\} L$$

**D<sub>2</sub> 线**

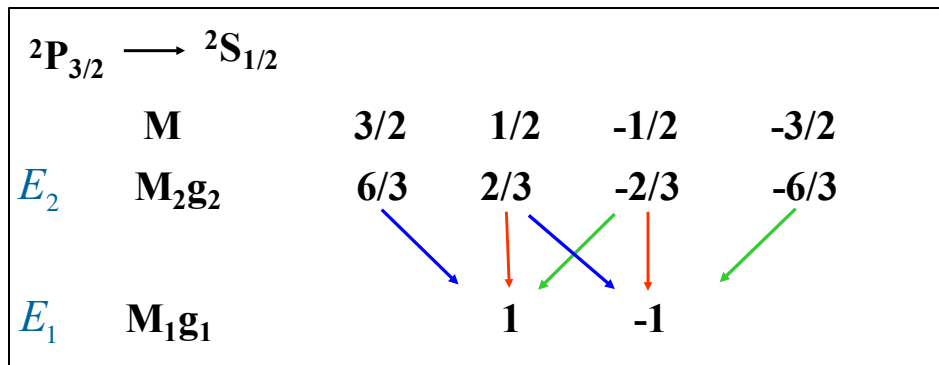


$$\frac{1}{l} - \frac{1}{l_0} = \left\{ \begin{array}{c} -\frac{5}{3} \\ -1 \\ -\frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ 1 \\ \frac{5}{3} \end{array} \right\} L$$

$$\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} = \frac{(m_{J_2} g_2 - m_{J_1} g_1) \mu_B B}{hc} = (m_{J_2} g_2 - m_{J_1} g_1) L$$

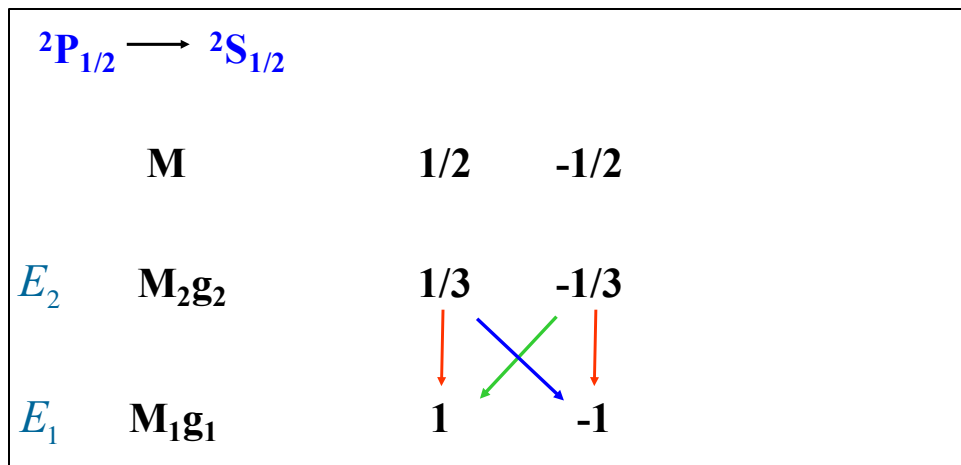


# 格罗春 (Grotrian) 图



$$\Delta\tilde{\nu} = \Delta\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \left(-\frac{5}{3}, -\frac{3}{3}, -\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{3}{3}, \frac{5}{3}\right)\tilde{L}$$

分为6条

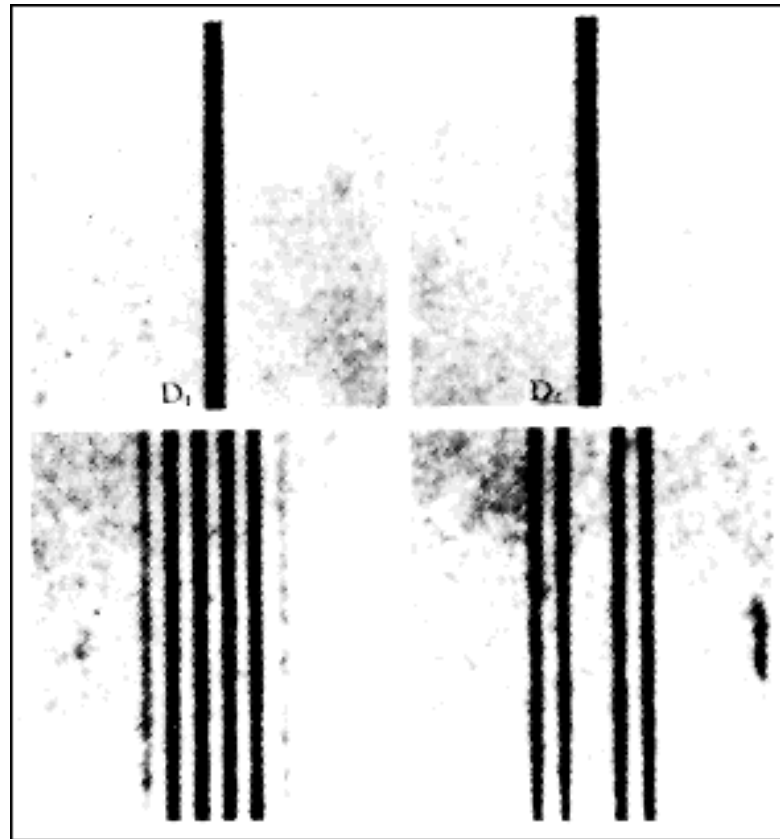


$$\Delta\tilde{\nu} = \Delta\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \left(-\frac{4}{3}, -\frac{2}{3}, \frac{2}{3}, \frac{4}{3}\right)\tilde{L}$$

分为4条

# 钠光谱的反常塞曼效应

$$\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} = \left\{ \begin{array}{c} -\frac{5}{3} \\ -1 \\ -\frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} \\ 1 \\ \frac{5}{3} \end{array} \right\} L$$



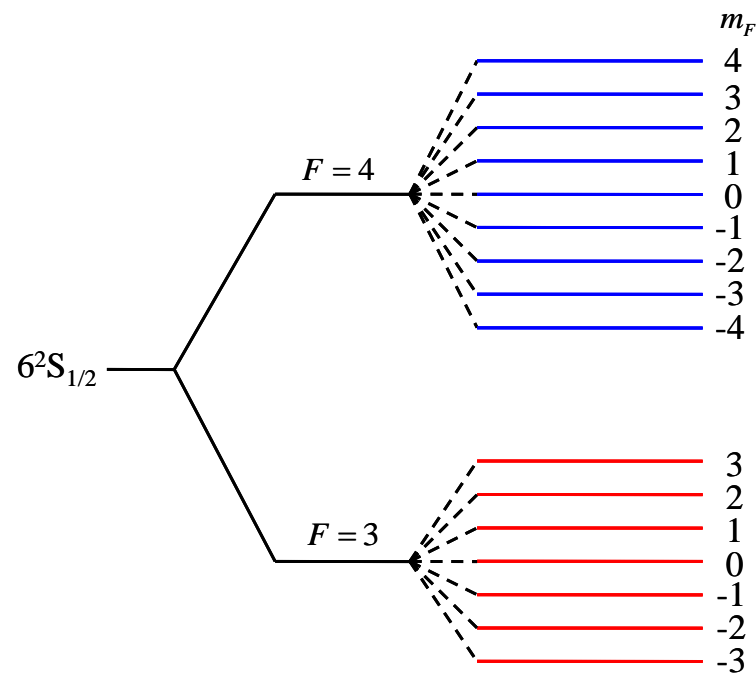
$$\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} = \left\{ \begin{array}{c} -\frac{4}{3} \\ -\frac{2}{3} \\ \frac{2}{3} \\ \frac{4}{3} \end{array} \right\} L$$

# 小知识：超精细结构的塞曼分裂

- 外磁场的强度远小于原子核感受到的电子磁矩产生的磁场强度时（对应于弱磁场情况）

$$U = m_F g_F \mu_B B$$

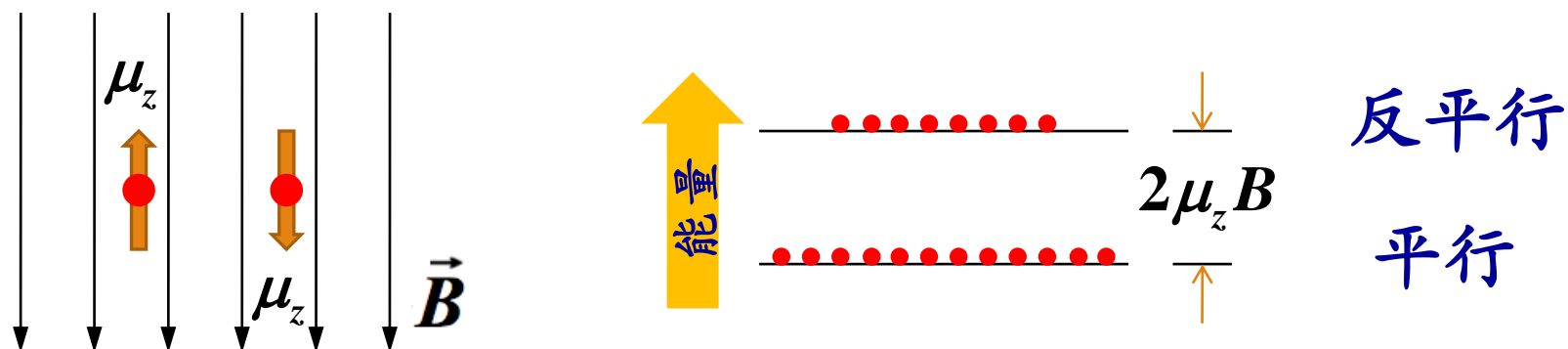
**铯-133原子：**



# 核磁共振(NMR)

# 均匀磁场中的质子能态

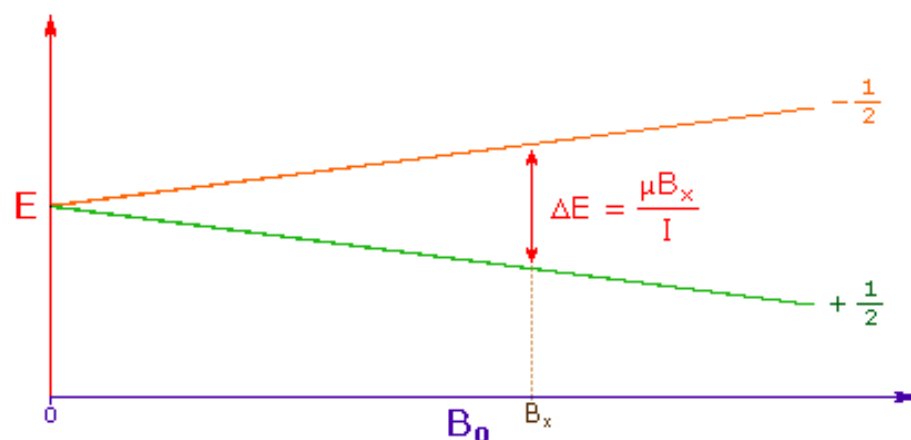
与电子类似，质子也有内禀自旋角动量和自旋磁偶极矩。因质子带正电，两者方向相同



在均匀磁场中的质子自旋磁偶极矩的  $z$  分量只能具有两个量子化的取向，能量差为

$$\Delta E = 2\mu_z B$$

核磁子  $\mu_z$  比电子的玻尔磁子  $\mu_B$  约小三个量级



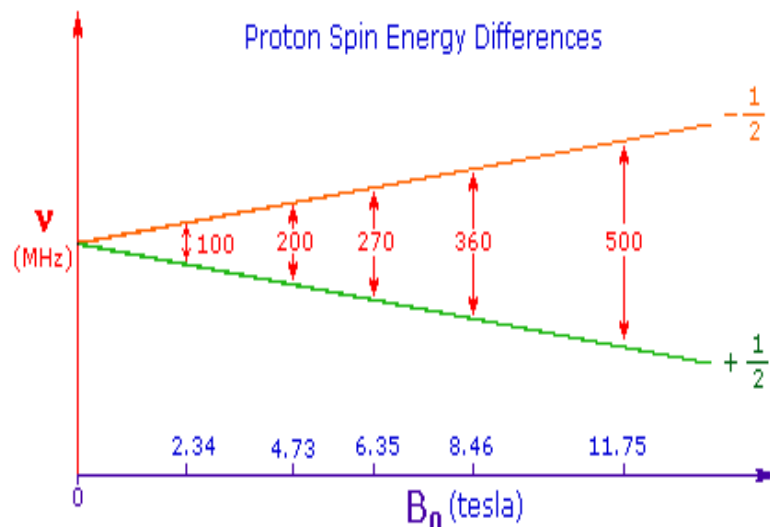
# 自旋－倒逆

在均匀磁场中处于低能态的质子，若被施加频率为  $f$  的交变电磁场，满足

$$hf = 2\mu_z B \quad \text{---(核)磁共振条件}$$

就会翻转质子的  $z$  分量的磁矩取向，造成自旋－倒逆。这意味着从交变电磁场中会有可测量的净的能量吸收。

质子自旋－倒逆到较高的能态，它可以通过辐射一个能量  $hf$  的相同光子回到较低能态。



# (核) 磁共振

---

对介质施加均匀磁场，(核) 磁共振条件成为

$$hf = 2\mu_z(B_{ext} + B_{local})$$

为了实现(核) 磁共振，可使

1. 电磁振荡的频率 $f$ 保持不变而改变外部磁场(扫场)；
2. 或改变频率而外场不变(扫频)，直到条件满足。

# 例：水中质子的扫频核磁共振条件

已知  $B_{\text{ext.}}=1.8\text{T}$ ，沿磁场方向  $\mu_z=1.41\times 10^{-26}\text{J/T}$ 。  
假定  $B_{\text{local}}=0$ 。

$$f = \frac{2\mu_z B}{h} = \frac{2 \times (1.41 \times 10^{-26} \text{ J/T})(1.8 \text{ T})}{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}} \\ = 76.6 \text{ MHz}$$

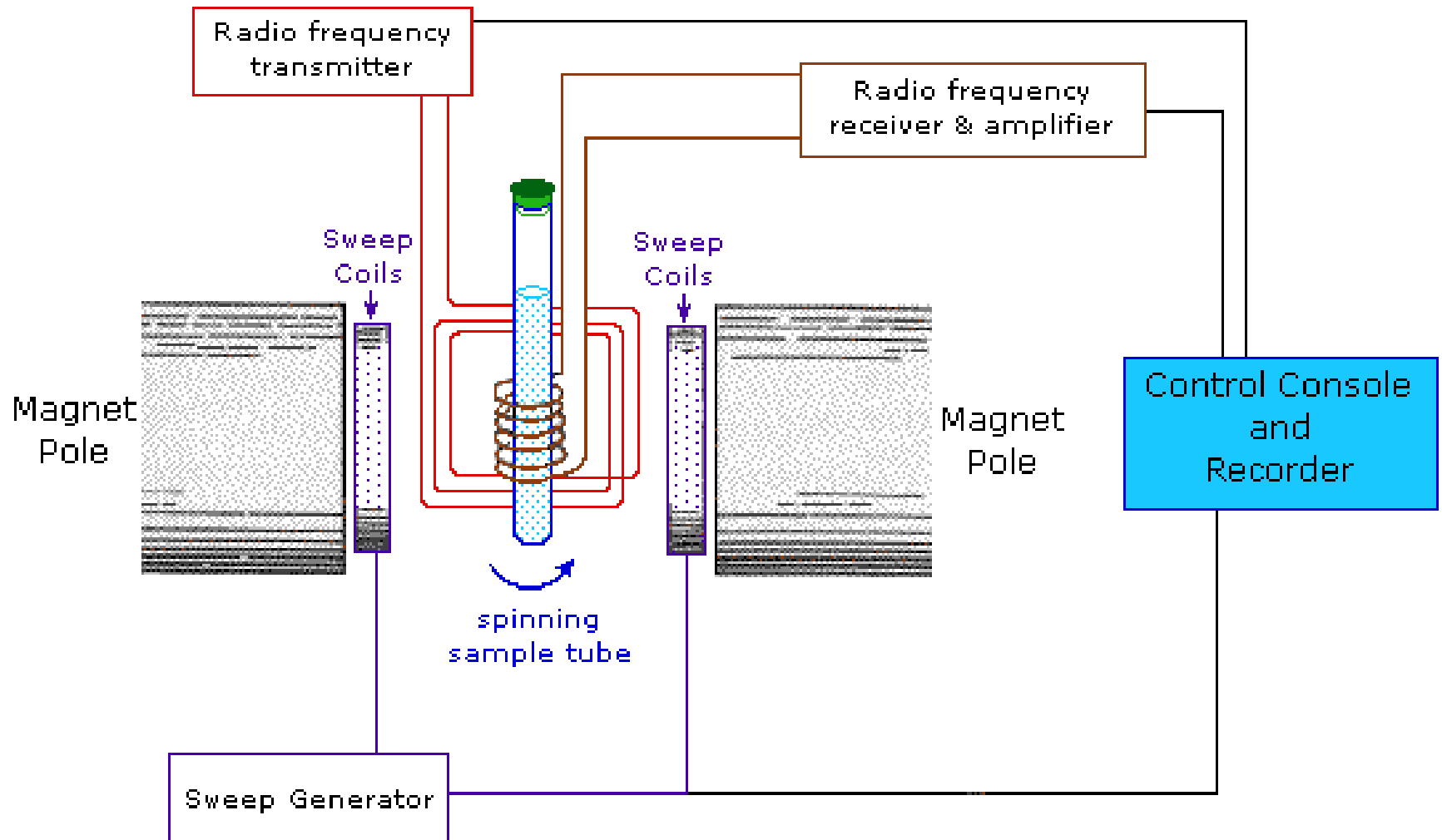
相应的波长为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{7.66 \times 10^7 \text{ Hz}} = 3.92 \text{ m}$$

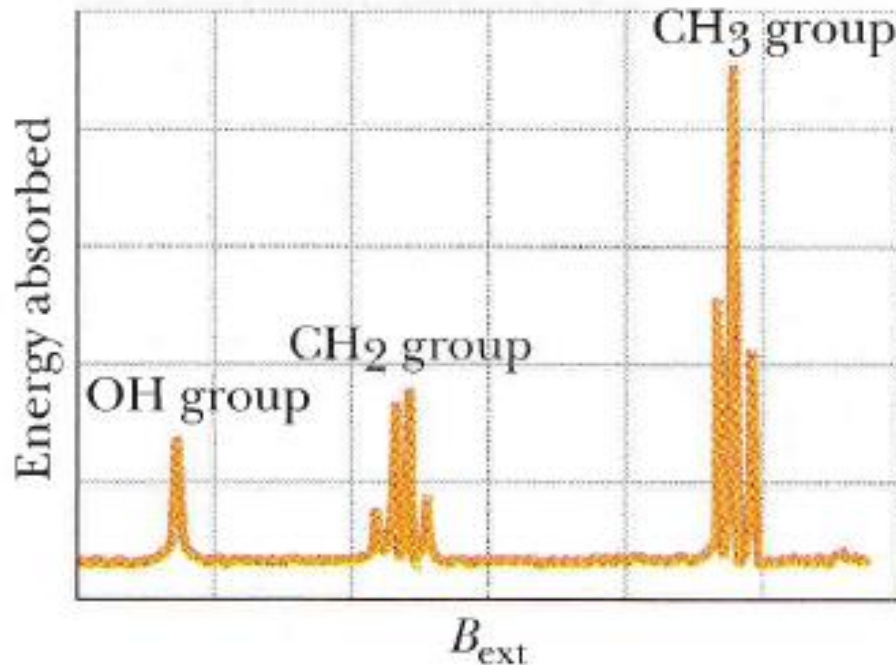
在电磁波谱的短波区。



# 核磁共振实验设置



# 乙醇样品的核磁共振谱



**思考：共振谱中为什么出现细微结构？**

- 电子屏蔽效应
- 化学集团鉴定

# 核磁共振医学成像装置



# (核) 磁共振成像

---

人体的不同组织内的质子各处在于许多不同的局部环境中，将其或其中的一部分放入强的外磁场中，可以利用自旋-倒逆技术并经过计算机处理转变成像。



# 本章小结

---

- 一个假设-电子的自旋
- 三个主要实验: 确立电子自旋
  - 史特恩-盖拉赫实验: 在外加非均匀磁场情况下原子束的分裂;
  - 碱金属双线: 在无外磁场情况下的谱线分裂;
  - 塞曼效应: 在外加均匀磁场情况下的谱线分裂;
- 四个描述原子核外电子状态的量子数  $(n, l, j, m_j)$

# 作业

1. 分析电子自旋可否看作为旋转着的牛顿球？  
提示：球的半径假设等于经典电子半径（见杨福家《原子物理学》第一章第五节）。若电子具有 $\hbar/2$ 量级的自旋角动量，比较牛顿球的周缘速率与光速大小。
2. 一束H原子以 $2 \times 10^5$  m/s的速度射入梯度为200 T/m,的磁场并分裂为两束，试求运动20cm后两束的裂距。
3. 由于自旋轨道耦合效应，氢原子的 $^2P_{3/2}$ 和 $^2P_{1/2}$ 的能级差为 $4.5 \times 10^{-5}$  eV.
  - 1) 求莱曼系最小频率的两条精细结构谱线的频率差和波长差；
  - 2) 氢原子处于 $n=2$ ,  $l=1$ 的状态时，电子感受到的磁场多大？
4. 在射电天文学中用波长21cm的这条谱线来描绘银河系的形状，这条谱线是当银河系中H原子的电子从自旋与该原子中质子自旋平行变为反平行时发出的。问这些电子受到多大的磁场作用？
5. 相应于 $J=1 \rightarrow J=0$ 跃迁的一条特定光谱线，在0.1T的磁场中分裂为三条，裂距为0.00016nm，无磁场时该谱线的波长为184.9nm.
  - 1) 研究朗德因子，给出 $J=1$ 态的总自旋；
  - 2) 激发态磁距是多少？
6. 杨福家《原子物理学》4-2题
7. 杨福家《原子物理学》4-14题