§2 电子自旋与自旋轨道耦合 ☆

原子中的电子不但具有轨道角动量，
而且具有自旋角动量。

这一事实的经典模型是太阳系中地球的运动。
地球不但绕太阳运动具有轨道角动量，
而且由于围绕自己的轴旋转而具有自旋角动量。

正像不能用轨道概念来描述电子在原子核周围的运动一样，
也不能把经典的地球的自旋图像硬套在电子的自旋上。

电子的自旋和电子的电量及质量一样，是一种“内禀的”，
即本身固有的性质。

由于这种性质具有角动量的一切特征(例如参与角动量守恒)，
所以称为自旋角动量，也简称自旋。

1924年泡利(w．Pauli)
在解释氢原子光谱的精细结构时就
引入了量子数1／2，
但是未能给予物理解释。

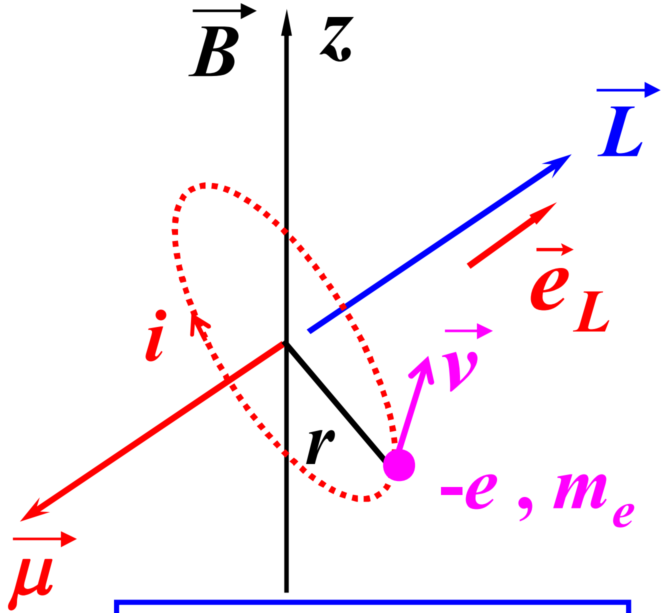
1925年乌伦贝克(G．E．uhlenbec：k)
和哥德斯密特(s．A．Goudsmit)
提出电子自旋的概念，
并指出自旋量子数为1／2。

1928年狄拉克(P．A．M．Dirac)
用相对论波动方程自然地得出了
电子具有自旋的结论。

一、施特恩 — 盖拉赫实验

☆

1、角动量与磁矩的关系　$\vec{L} \rightarrow \vec{\mu}$



$$\boxed{\vec{\mu} = -\frac{e}{2m_e}\vec{L}}$$

$$\vec{\mu} = -i \cdot \pi r^2 \cdot \vec{e}_L$$

$$= \frac{-v}{2\pi r} \cdot e \cdot \pi r^2 \cdot \vec{e}_L$$

$$= \frac{-e}{2m_e} \cdot m_e v r \cdot \vec{e}_L$$

$$= \frac{-e}{2m_e}\vec{L}$$

$$\boxed{\vec{\mu} = -\frac{e}{2m_e}\vec{L}}$$

由于轨道 取向量子化，

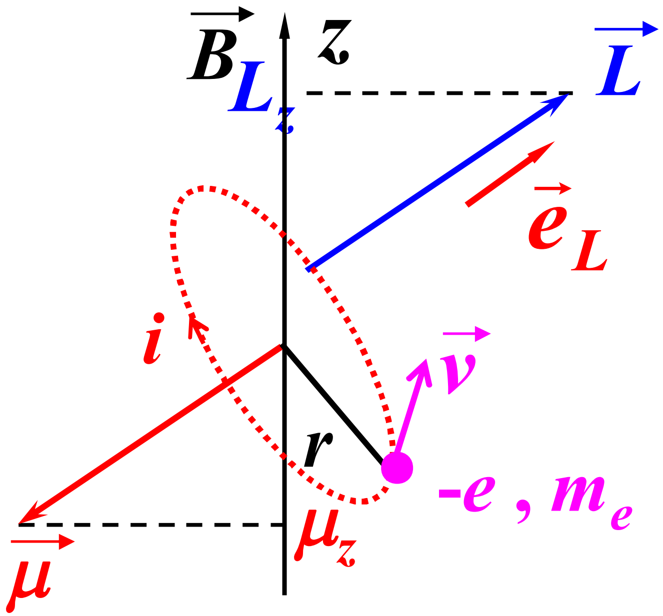
$$L_z = m_l \hbar,$$

$$m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots \pm l$$

磁矩在 Z 方向的投影为

$$\mu_z = -\frac{e}{2m_e} \cdot L_z$$

$$= -\frac{e\hbar}{2m_e} \cdot m_l$$



$$\boxed{\mu_z = -\frac{e\hbar}{2m_e}\cdot m_l \qquad m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots}$$

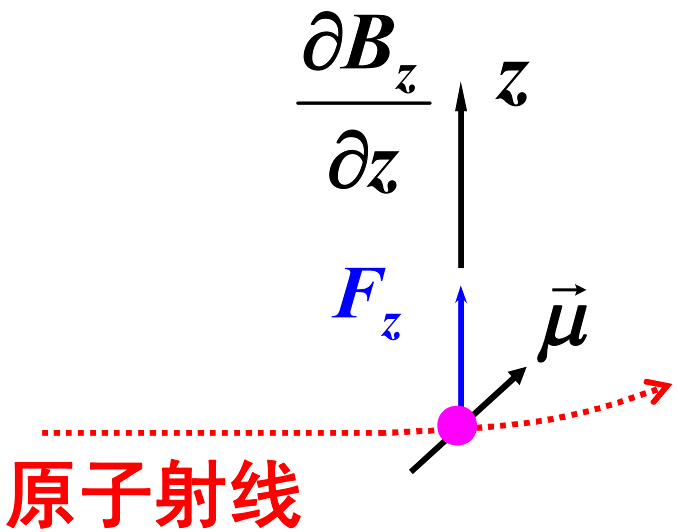
令 $$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9.27\times 10^{-24}\ \mathrm{J/T}$$

玻尔磁子

$$\boxed{\mu_z = -\mu_B \cdot m_l\ ,\quad m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots}$$

—— 电子轨道磁矩的取向是量子化的

2、磁矩在磁场中受力



磁矩在磁场中受力

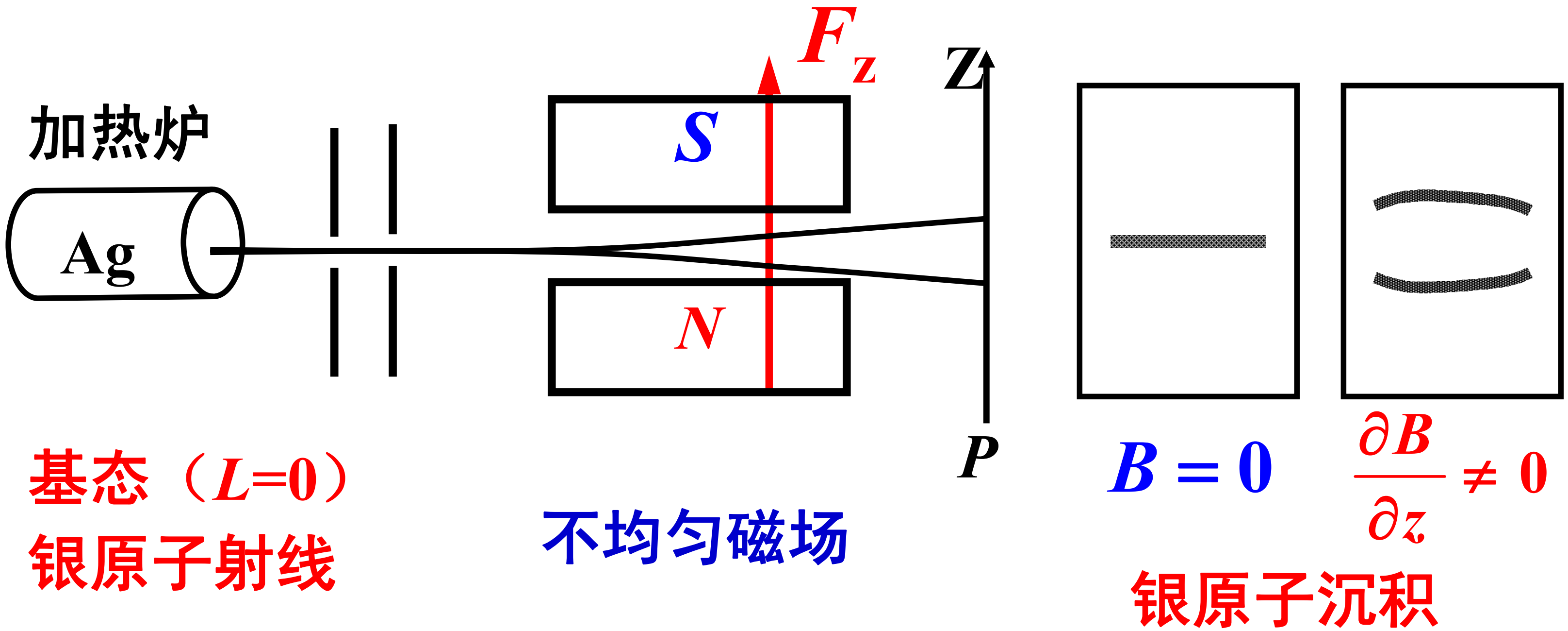
$$F_z = \mu_z \frac{\partial B_z}{\partial z}$$

$$= -m_l \cdot \mu_B \frac{\partial B_z}{\partial z}$$

$$\boxed{\begin{gathered} \mu_z = -\mu_B \cdot m_l \\ m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots \end{gathered}}$$

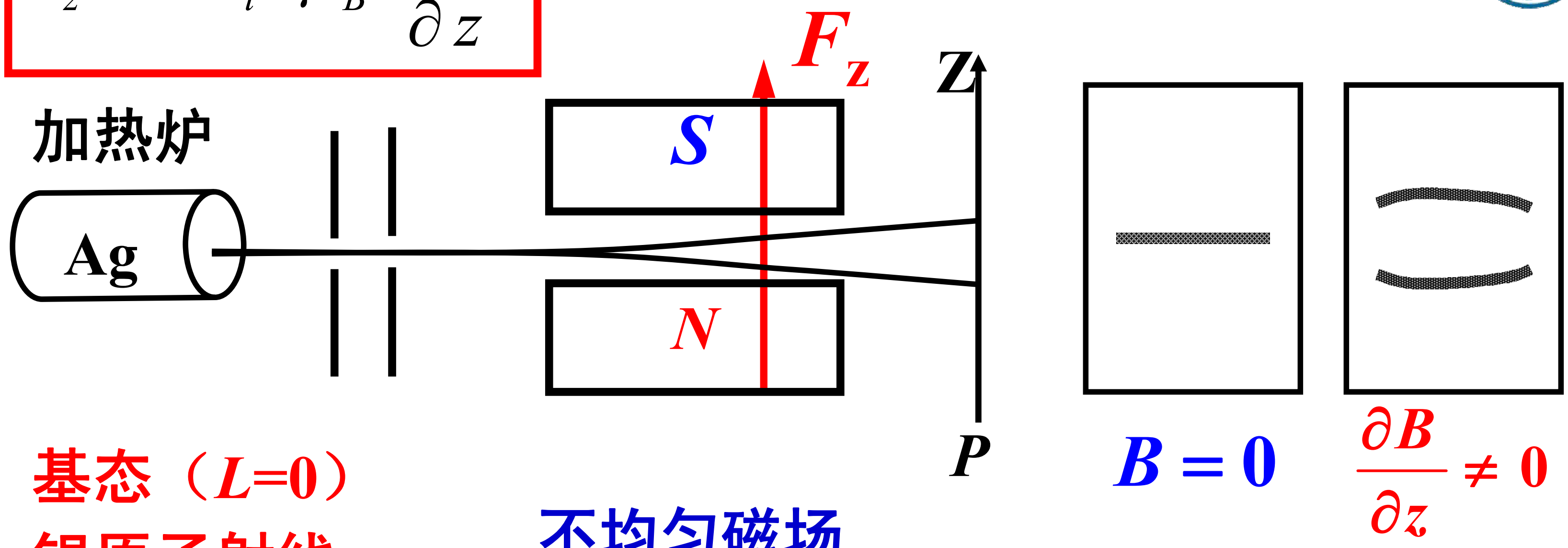
受力 F_z 也是分立的。

3、施特恩 — 盖拉赫实验



在高温炉中，银被加热成蒸气，
飞出的银原子经过准直屏后形成银原子束。
这一束原子经过异形磁铁产生的不均匀磁场后
打到玻璃板上淀积下来。
实验结果是在玻璃板上出现了对称的两条银迹。

$$F_z = -m_l \cdot \mu_B \frac{\partial B_z}{\partial z}$$



基态（L=0）
银原子射线

不均匀磁场

银原子沉积

基态，轨道 $l = 0; m_l = 0$

$$F_z = -m_l \cdot \mu_B \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0$$

银原子束
不应分裂。

$m_l = 0$?

难道电子还具有其它磁矩！

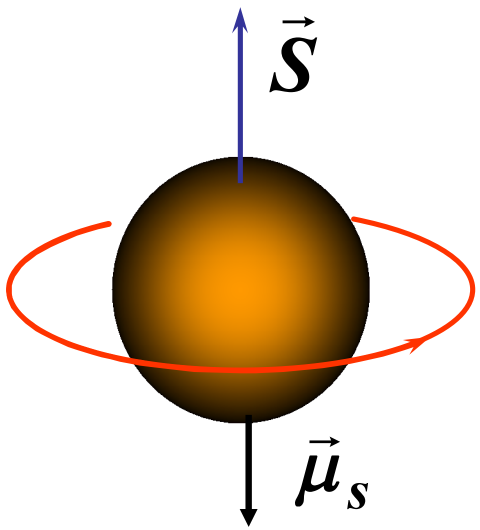
二、电子自旋 ☆

$m_{核} >> m_e \rightarrow \ \vec{\mu}_{核} << \vec{\mu}_e$ ➡ $\vec{\mu}_{核}$ 的影响很小

1925年乌伦贝克和古兹米特, 根据施特恩 — 盖拉赫的事实，提出了大胆的假设：

电子不是质点，有固有的自旋角动量 $\vec{S}$ 和相应的自旋磁矩 $\vec{\mu}_S$

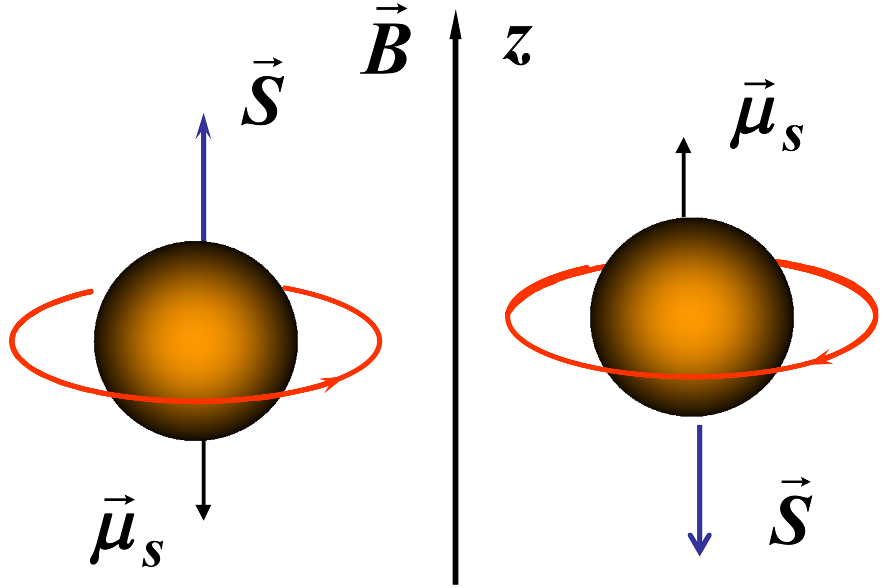
电子带负电，磁矩的方向与自旋的方向应相反。



☆

相对于外磁场方向（z），$\vec{S}$ 有朝上和朝下两种取向。

（两条沉积线）



自旋虽然不能用经典的图象来理解，
但仍然和角动量有关。
类比轨道角动量的量子化，
可给出自旋角动量的量子化：

轨道角动量 $L=\sqrt{l(l+1)}\hbar$， $L_z=m_l\hbar$

$$l=0,1,2,\ldots(n-1) \quad m_l=0,\pm 1,\pm 2,\cdots,\pm l$$

自旋角动量也应有 $S=\sqrt{s(s+1)}\hbar$， $S_z=m_s\hbar$

s 自旋量子数， m_s 自旋磁量子数

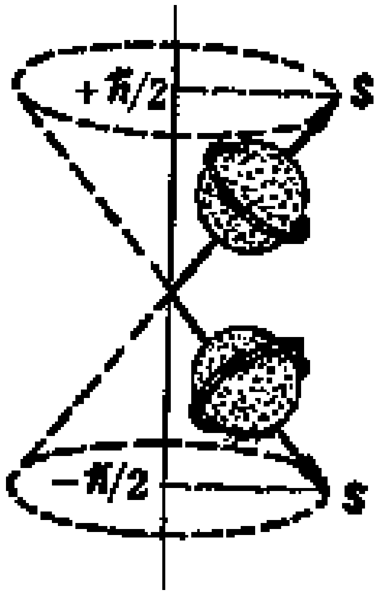
类似 l 有种 $2l+1$ 取法, 对 s 应有 $2s+1$ 种取法。

$$2s+1=2 \quad \rightarrow s=\frac{1}{2} \quad \rightarrow m_S=+\frac{1}{2},-\frac{1}{2}$$

$$S=\sqrt{s(s+1)}\,\hbar=\frac{\sqrt{3}}{2}\hbar \quad S_z=m_S\hbar=\pm\frac{1}{2}\hbar$$

施 — 盖实验表明： ☆

$$S=\frac{\sqrt{3}}{2}\hbar$$



$$S_z=\frac{1}{2}\hbar$$

$$S_z=-\frac{1}{2}\hbar$$

$$F_z=\mu_z\frac{\partial B_z}{\partial z}=-m_l\cdot\mu_B\frac{\partial B_z}{\partial z}$$ （LS 耦合）$m_l\sim m_l(0)+m_s(\pm\frac{1}{2})$

两条沉积线

注意：电子自旋是一种 “内禀”特性，不是小球自转。

描述电子状态的量子数应是 (n,l,m_l,m_s)

施特恩 — 盖拉赫实验的意义

（1） 证明了空间量子化的存在

原子沉积层不是连续一片，而是分开的线，

说明角动量空间量子化的存在。

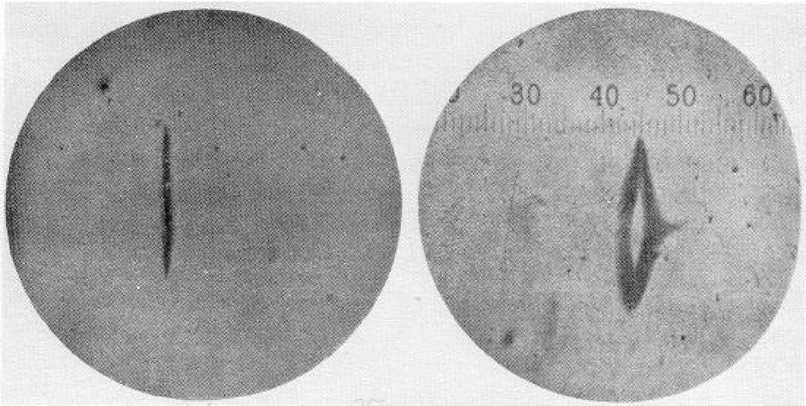
(2)发现了新的矛盾

$l = 0,$ 应有一条沉积线

实验结果却有两条沉积线

这说明原来对原子中电子运动

的描述是不完全的。



银原子束通过非均匀的磁场时，分裂成了两束

斯特恩正在观测

(Otto Stern, 1888–1969)
获得了**1943**年度诺贝尔物理学奖。 ☆

三　电子的自旋轨道耦合

☆

电子绕核运动时，

既有轨道角动量　$\vec{L}$

又有自旋角动量　$\vec{S}$

这时电子状态与总角动量　$\vec{J}$　有关。

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

这一角动量的合成，叫自旋轨道耦合。

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

由量子力学可知，J 也是量子化的，

相应的总角动量量子数用 j 表示，且有

$$\boxed{J=\sqrt{j(j+1)}\,\hbar}$$

$l=0$ 时，$\vec{J}=\vec{S}$，$j=s=1/2$;

$l\neq 0$ 时，$j=l+s=l+1/2$，或 $j=l-s=l-1/2$

（$\vec{L}$、$\vec{S}$平行） （$\vec{L}$、$\vec{S}$反平行）