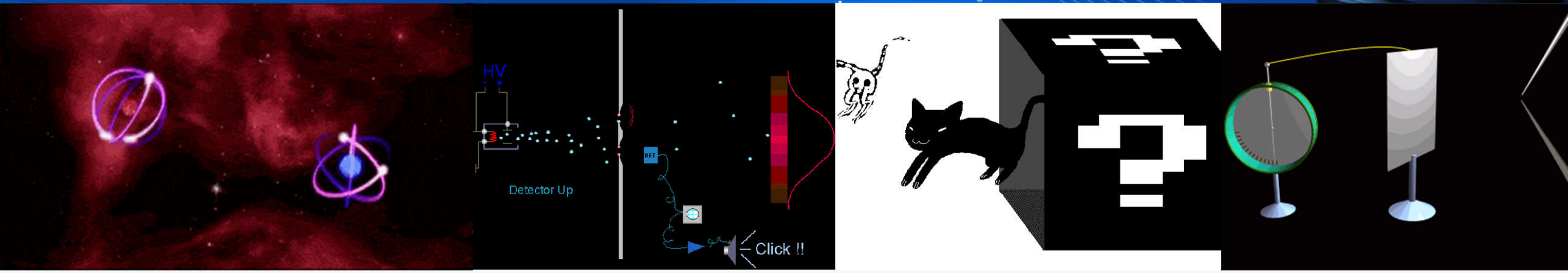
大学物理



第六篇　量子物理

第15章 量子力学基础-3

尹 航

华中科技大学 物理学院

1 电子的自旋

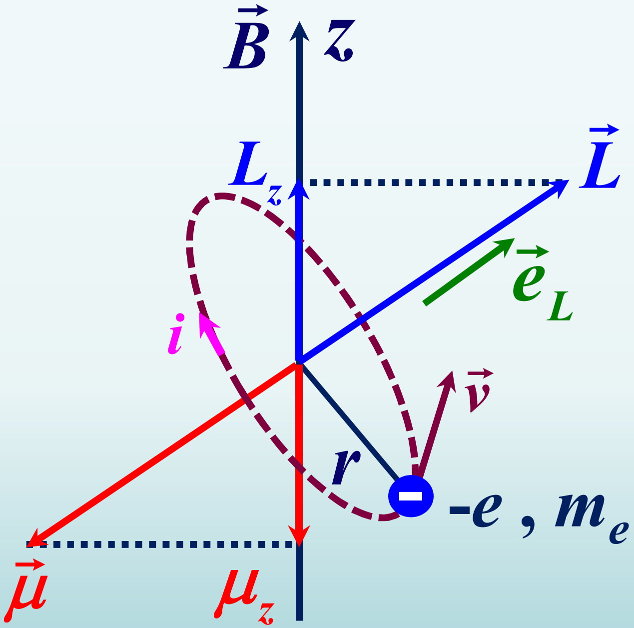
2 原子的电子壳层结构

电子的自旋

□ **斯特恩——盖拉赫实验（1921）** 为验证角动量空间量子化

(利用角动量与磁矩的关系)

- **角动量和磁矩的关系**



磁矩：$\vec{\mu} = IS\vec{e}_\mu = \dfrac{-v}{2\pi r}\cdot e\cdot \pi r^2 \cdot \vec{e}_L = -\dfrac{evr}{2}\vec{e}_L$

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

磁矩在z轴分量方向上的分量：

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

玻尔磁子$\mu_B = 9.27\times 10^{-24}\ \mathrm{J/T}$

电子的自旋

$\mu_z = -\mu_B \cdot m_l$ ， $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots$ 电子轨道磁矩的取向是量子化的

与角动量取向对应

- **磁矩在磁场中受力**

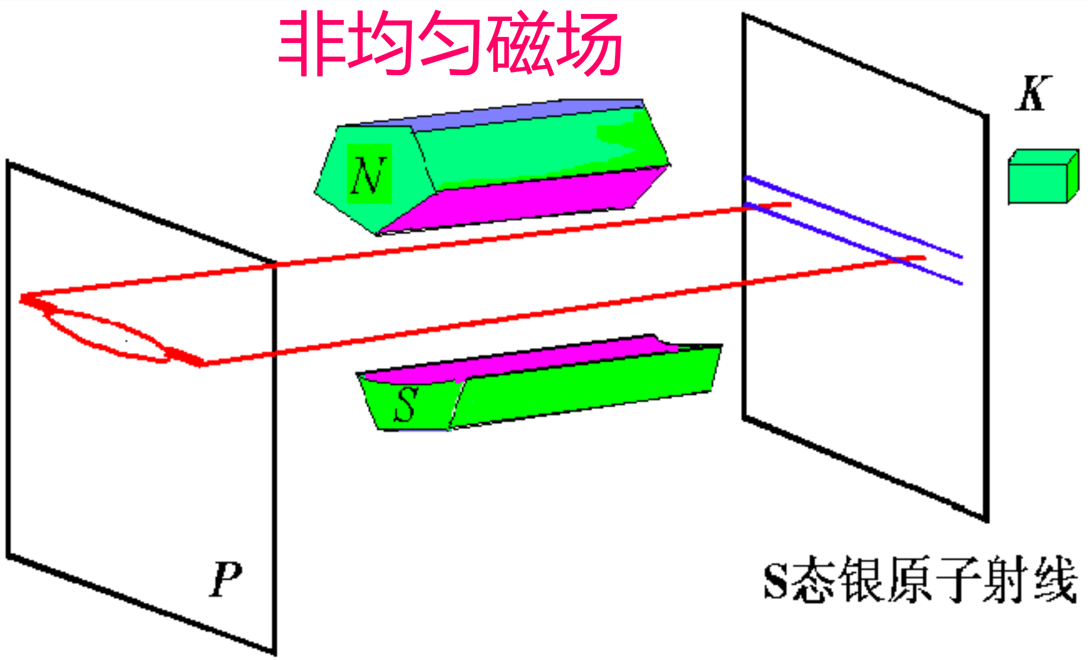
磁矩在磁场中的能量 $E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$

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

受力F_z也是分立的。

电子的自旋

- **斯特恩——盖拉赫实验**



原子在磁场中受力

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

均匀磁场或无磁场 $F_z = 0$

非均匀磁场 $F_z \neq 0$

实验现象

无磁场：原子束沉积为直线；有磁场：原子束呈现分立直线

有磁场：基态银原子束分裂成两条

电子的自旋

无磁场：原子束沉积为直线；

有磁场：基态银原子束分裂成两条

$\downarrow$

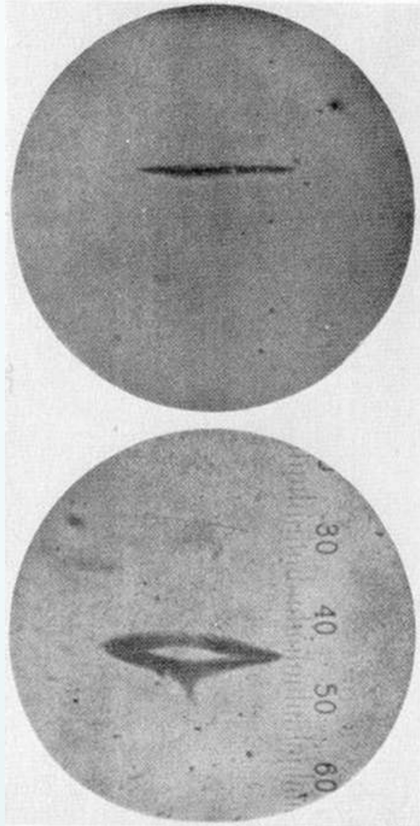
轨道 $l=0$，$m=0$

$\downarrow$

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

$\downarrow$

理论上基态银原子束不应分裂



电子还具有其它磁矩！

电子的自旋

- **施特恩 — 盖拉赫实验的意义**

① 证明了角动量空间量子化的存在

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

$l = 0$，应只有一条沉积线。

实验结果却有两条沉积线。

说明对原子中电子运动的描述不完备

③ 提供了原子的"态分离"技术，至今仍适用。

Otto Stern

1888-1969

1943 诺贝尔奖

电子的自旋

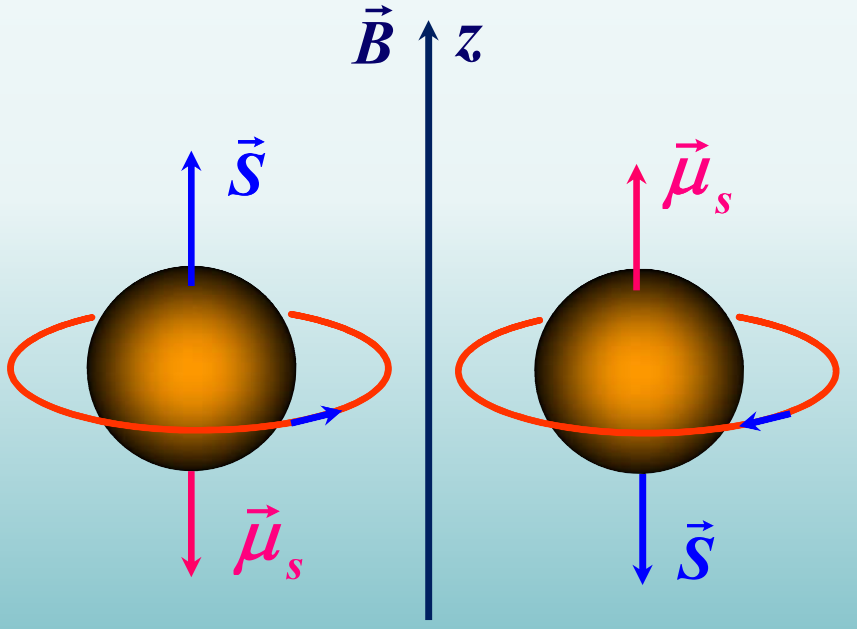
□ 电子的自旋

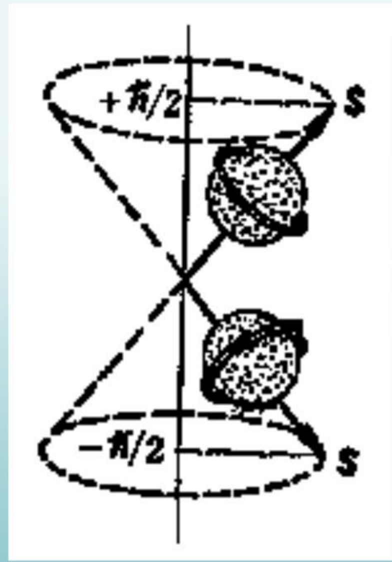
1925年乌伦贝克和古兹密特提出电子自旋假设，

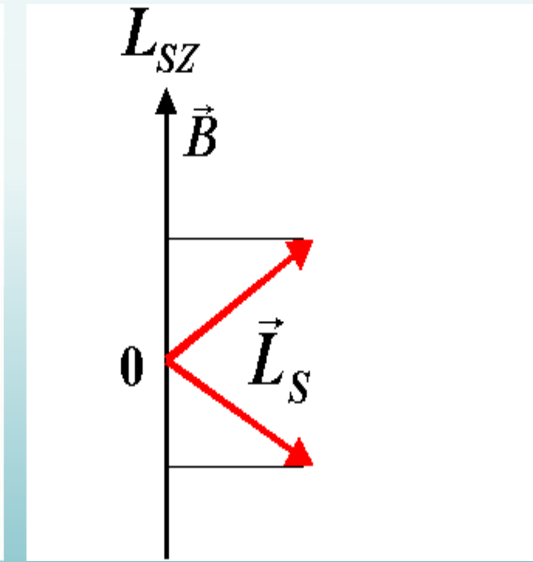
认为电子不是质点：

- 有固有的自旋角动量 $\vec{S}$
- 有自旋磁矩 $\vec{\mu}_S$

自旋角动量和自旋磁矩如何表示？　施特恩 — 盖拉赫实验表明







电子的自旋

- **电子自旋角动量的表示**

轨道角动量：$L=\sqrt{l(l+1)}\hbar$　　$L_z=m_l\hbar$　　m_l可取$2l+1$个值

（大小）　　（方向）

类比轨道角动量，电子自旋角动量表示为 $L_s=\sqrt{s(s+1)}\hbar$

自旋量子数

自旋角动量的取向用其在外磁场中的分量表示：

$L_{s,z}=m_s\hbar$　　m_s为自旋磁量子数　可取$2s+1$个值

结论：$2s+1=2$⟶自旋量子数$s=1/2$ ⟶自旋磁量子数 $m_s=\pm\dfrac{1}{2}$

可得 $L_{s,z}=\pm\dfrac{\hbar}{2}$

不是表现在外的运动

注 意： 电子自旋是一种 “内禀” 运动，不是小球自转。

无经典对应，是一种相对论效应。

电子的自旋

□ 四个量子数

原子中电子的一个运动状态可用四个量子数n, l, m_l, m_s完全描述。

① 主量子数n=1, 2, 3,...... 决定电子能量的主要部分。

$$E_n = -\frac{me^4}{32\pi^2\varepsilon_0^2\hbar^2}\cdot\frac{1}{n^2}$$ 能 级

② 角量子数l=0, 1, 2, ... n-1决定电子的轨道角动量大小。

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$$ 还影响能量的次要部分

③ 轨道磁量子数m_l=0, ±1, ±2, ... ±l决定轨道角动量的空间取向。

$$L_z = m_l\hbar.$$

④ 自旋磁量子数m_s=±1/2，决定自旋角动量的空间取向 $L_{s,z} = m_s\hbar.$

为负时，称为自旋向下。　为正时，称为自旋向上。

1 电子的自旋

2 原子的电子壳层结构

原子的电子壳层结构

□ 多电子原子体系电子状态的描述

多电子原子中核外电子的运动状态可用四个量子数来描述。

n, l, m_l, m_s

电子能量与主量子数 n 和角量子数 l 有关。

□ 原子的电子壳层结构

主量子数相同的电子分布在同一壳层上~**主壳层**

n	1	2	3	4	5	6	7
主壳层名称	K	L	M	N	O	P	Q

同一壳层上，电子的能量基本相同，但 l 不同略有差异

原子的电子壳层结构

□ 原子的电子壳层结构

主量子数相同的电子分布在同一壳层上~**主壳层**

n	1	2	3	4	5	6	7
主壳层名称	K	L	M	N	O	P	Q

同一壳层上，电子的能量基本相同，但 l 不同略有差异

同一角量子数 l 的电子组成一个**支壳层**

l	0	1	2	3	4	5
支壳层名称	s	p	d	f	g	h

原子的电子壳层结构

□ 电子的分布准则及规律

每一主壳层和支壳层上电子如何分布及分布多少由两个原理确定。

- **泡利不相容原理**

在原子中，不可能有四个量子数 $n, l, m_l,$ m_s 完全相同的两个或两个以上的电子。

*原子中的每个电子都拥有专属的四个量子数

如基态氢原子：$(n、l、m_l) = (1, 0, 0)$

考虑电子自旋，其量子态表示为

$$(n、l、m_l、m_s) = \begin{cases} (1,\ 0,\ 0, +1/2) \\ (1,\ 0,\ 0, -1/2) \end{cases}$$

最多允许容纳2个电子

Wolfgang Pauli

1900-1958

1945 诺贝尔奖

原子的电子壳层结构

如基态氢原子：$(n、l、m_l)=(1, 0, 0)$

考虑电子自旋，其量子态表示为

$$(n、l、m_l、m_s)=\begin{cases}(1, 0, 0, +1/2)\\(1, 0, 0, -1/2)\end{cases}$$ 最多允许容纳2个电子

若氢原子处在第一激发态?

泡利不相容原理决定了壳层中最多允许的电子数：

某支壳层l 中最多能容纳的电子数为：$x_l=\underbrace{2}_{m_s\text{的取值个数}}\overbrace{\boxed{(2l+1)}}^{m_l\text{的取值个数}}$

主壳层n中最多能容纳的电子数为：$Z_n=\sum_0^{n-1}2(2l+1)=2n^2$

原子的电子壳层结构

电子组态的表示方法

$nl^{2(2l+1)}$ → 该支壳层的电子个数

l：名称 → 支壳层名称：*s, p, d, f, g, h*

$n=1 \quad l=0 \quad 1s^2$

$n=2 \begin{cases} l=0 & 2s^2 \\ l=1 & 2p^6 \end{cases}$

$n=3 \begin{cases} l=0 & 3s^2 \\ l=1 & 3p^6 \\ l=2 & 3d^{10} \end{cases}$

$n=4 \begin{cases} l=0 & 4s^2 \\ l=1 & 4p^6 \\ l=2 & 4d^{10} \\ l=3 & 4f^{14} \end{cases}$

						主壳层电子数
$n=4$	N	$4s^2$	$4p^6$	$4d^{10}$	$4f^{14}$	32
$n=3$	M	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10}$		18
$n=2$	L	$2s^2$	$2p^6$			8
$n=1$	K	$1s^2$				2

$2n^2$

原子的电子壳层结构

- **能量最小原理**

由于能量最低的状态总是最稳定的，所以：

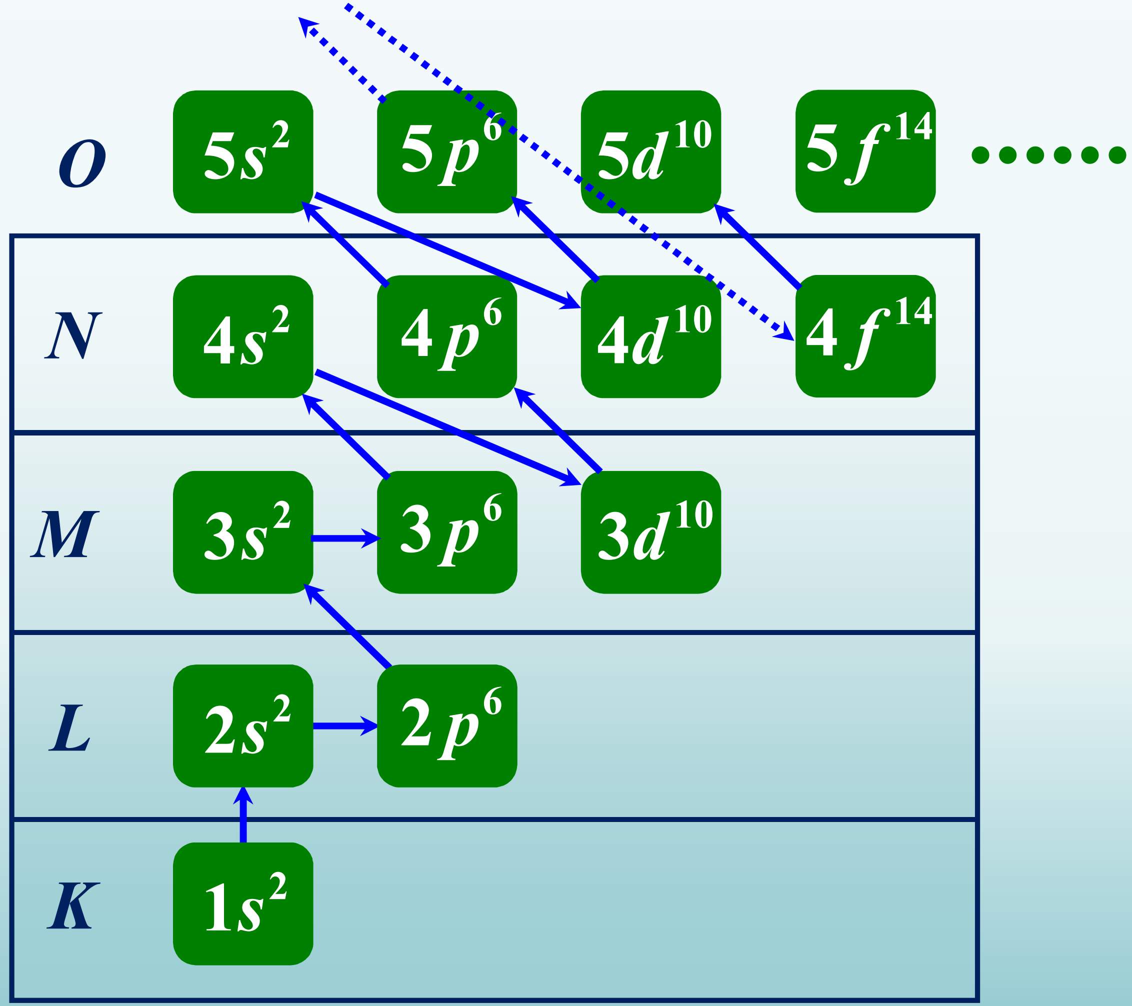
电子填充壳层的原则是，

优先填充低能级。

能级高低判断标准：

$n+0.7l$

能级高低的不完全由n决定，故电子填充次序与主壳层的次序并不完全一致。



原子的电子壳层结构

例. 氢原子中处于2p 状态的电子。描述其量子态的四个量子数可能取的值为：

A. (3, 2, 1, 1/2)　　B. (2, 1, -1, -1/2)

C. (2, 0, 0, 1/2)　　D. (1, 0, 0, 1/2)

例. 原子内电子的量子态由(n, l, m_l, m_s) 四个量子数描述。处于基态的氦原子内两个电子的量子态为 $(1,0,0,\frac{1}{2})$ 和 $(1,0,0,-\frac{1}{2})$ 。

原子的电子壳层结构

例.若角量子数l=2，则氢原子中电子的角动量分量L_z可能的取值为__$0, \pm\hbar, \pm 2\hbar$__。

例.原子内电子的量子态由(n, l, m_l, m_s)四个量子数描述。当n, l, m_l一定时，不同的量子态数目为__2__；当n, l一定时，不同的量子态数目为__$2(2l+1)$__；当n一定时，不同的量子态数目为__$2n^2$__。

作业：15T15 ~T16

作业要求

1. 独立完成作业。
2. 图和公式要有必要的标注或文字说明。
3. 作业纸上每次都要写学号(或学号末两位)。
4. 课代表收作业后按学号排序，并装入透明文件袋。
5. 每周四交上周的作业。迟交不改。
6. 作业缺交三分之一及以上者综合成绩按零分计。