



# 第七章 原子的壳层结构

---

一、元素性质的周期性变化

二、原子的电子壳层结构

三、电子组态的能量—壳层的次序

四、电子的壳层排列与元素周期表

五、满壳层的总角动量

六、原子基态光谱项的确定



## 二、原子的电子壳层结构

---

各种元素原子的性质为什么会有周期性呢？这就要涉及到本节讲的**电子的壳层结构**。

前已讲过，在多电子原子中，决定电子所处状态的准则有两条：

1. **泡利不相容原理**；
2. **能量最小原理**(即体系能量最低时，体系最稳定)。

**应用时这两条都要兼顾！**



## 二、原子的电子壳层结构

---

需要说明的是：以上所说的标志电子态用  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$ ,  $m_s$ （相当于一个矢量四个分量）。

同时等效还有

$$n=1, 2, 3, \dots$$

$$l=0, 1, 2, \dots, n-1 \text{（相当于坐标变换）}$$

$$j=l \pm 1/2$$

$$m_j=j, j-1, \dots, -j$$



## 二、原子的电子壳层结构

---

状态由什么来定？已知原子中电子状态由四个量子数  $(n, l, m_l, m_s)$  或  $(n, l, j, m_j)$  来确定，故泡利不相容又可表达为：

在同一原子中，不能有两个或更多个电子具有完全相同的四个量子数。

可以想见，由于Pauli原理，对每个壳层容纳电子的数目给出了一个很强的限制，即每个壳层包含多少个独立量子态（独立状态数），它就能容纳多少个电子。



## 二、原子的电子壳层结构

如氦原子：最外层电子排列



但实际上 ${}^3S_1$ 不存在。这是由于Pauli原理的限制。

前已讲过，原子一个壳层由主量子数 $n$ 相同的电子构成的。

通常用大写字母K、L、M、N、O、P、Q等代表  
 $n=1、2、3、4、5、6、7\cdots$ 壳层



## 二、原子的电子壳层结构

---

而同一  $n$ ,  $l$  可取  $l=0, 1, 2, \dots, n-1$ ; 故对同一  $n$ , 不同  $l$ , 又构成支壳层, 仍用  $s, p, d, f, g, h, \dots$  代表  $l=0, 1, 2, \dots$

例如:

K壳层  $n=1, l=0$  只有一个支s支壳层

L壳层  $n=2, l=0$  s支壳层  
 $l=1$  p支壳层



## 二、原子的电子壳层结构

---

M壳层  $n=3,$   $l=0$  s支壳层

$l=1$  p支壳层

$l=2$  d支壳层

N壳层  $n=4,$   $l=0$  s支壳层

$l=1$  p支壳层

$l=2$  d支壳层

$l=3$  f支壳层

## 二、原子的电子壳层结构

为了计算每个壳层中所容纳的电子数，我们首先要计算出每个支壳层中最多可容纳的电子数  $N_l = ?$  Pauli 原理可以帮助我们来解决

由于给定  $l$  后， $m_l = -l \cdots 0 \cdots l$ ，共  $2l+1$  个取值。

每  $m_l$  值，又可配上  $m_s = \pm 1/2$  中的一个。

故  $(m_l, m_s)$  取不同值个数为：

$$2(2l+1)$$

## 二、原子的电子壳层结构

即 $l$ 支壳层可容纳 $2(2l+1)$ 个电子， $N_l = 2(2l+1)$ ，故对s、p、d、f…支壳层，分别最多可容纳2、6、10、14…个电子 ( $l=0、1、2…$ )

又由于对给定 $n$ ， $l=0、1、2…n-1$ 共 $n$ 个，故主量子数为 $n$ 的壳层中最多可容纳电子数为

$$N_n = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2(1+2n-1) \cdot \frac{n}{2} = 2n^2$$

即具有量子数为 $n$ 的壳层中最多只能容纳 $2n^2$ 个电子。

## 二、原子的电子壳层结构

填满这个数的电子壳层（或支壳层）称满壳层（支壳层）或闭合壳层（闭合支壳层），参见图表7.2。

利用以上知识可以初步解释元素体系的周期性。

从氢开始，设想电子一个一个地被填到壳层中去，从量子数最小，即最内层填起，见表7.2。

表 7.2 各壳层可以容纳的最多电子数

壳层, $n$	1	2	3	4	5	6
最多电子数 $2n^2$	2	8	18	32	50	72
次壳层, $l$	0	0 1	0 1 2	0 1 2 3	0 1 2 3 4	0 1 2 3 4 5
最多电子数 $2(2l + 1)$	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 14 18	2 6 10 14 18 22

## 二、原子的电子壳层结构

	K		L			M						N																		
$n$	1		2			3						4																		
$l$	0	0	1			0	1			2			0	1			2				3									
	s	s	p			s	p			d			s	p			d				f									
$m_l$	0	0	-1	0	1	0	-1	0	1	-2	-1	0	1	2	0	-1	0	1	-2	-1	0	1	2	-3	-2	-1	0	1	2	3
$m_s$	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓
	K	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>		M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>		M <sub>3</sub>				N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>		N <sub>3</sub>				N <sub>4</sub>											
状态数	2	2	6		2	6		10				2	6		10				14											
		8			18						32																			



## 二、原子的电子壳层结构

---

两个电子填满了 $n=1$ 壳层，完成第一周期，即为氦。

Li：有三个电子，第三电子只能填在 $n=2$ 壳层。

直到氖10个电子，填满了 $n=1$ ， $n=2$ 壳层。

Na ( $z=11$ )：第十一个电子只能填到 $n=3$ 壳层，照这样下去， $n=3$ 应填18个电子， $n=4$ 应填32个电子。

到此，已有 $2+8+18+32=60$ 个元素，但只填到 $n=4$ ，剩下 $z=61$ 的钷 (Pm) 到 $z=109$ 的Uue (未命名) 共48个，还填不满 $n=5$ 壳层 ( $n=5$ 壳层要50个)。

表 7.1 元素周期系

第一 周期	1 H																2 He	
第二 周期	3 Li	4 Be							5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne				
第三 周期	11 Na	12 Mg							13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar				
第四 周期	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
第五 周期	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
第六 周期	55 Cs	56 Ba	57 ~71 *	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
第七 周期	87 Fr	88 Ra	89 ~103 * *															

稀土 元素	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

锕系 元素	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lw
----------	----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

但实际周期表不是5个周期，而是7个周期，每一个周期从左边碱金属开始到右边惰性气体结束，各周期元素数为2、8、8、18、18、32。

表 7.1 元素周期系

第一 周期	1 H																2 He	
第二 周期	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
第三 周期	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
第四 周期	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
第五 周期	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
第六 周期	55 Cs	56 Ba	57 ~71 *	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
第七 周期	87 Fr	88 Ra	89~ 103 * *															

除8和18各重复一次外，其余数字都与表7.2相合。

为什么除8和18各重复一次？

我们首先看看表7.2是怎么来的

稀土 元素	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

锕系 元素	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lw
----------	----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

## 二、原子的电子壳层结构

表7.2是由泡利不相容原理来的，实际电子填充不仅要满足泡利原理，而且还要满足最小能量原理。

表 7.2 各壳层可以容纳的最多电子数

壳层, $n$	1	2	3	4	5	6
最多电子数 $2n^2$	2	8	18	32	50	72
次壳层, $l$	0	0 1	0 1 2	0 1 2 3	0 1 2 3 4	0 1 2 3 4 5
最多电子数 $2(2l + 1)$	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14	2 6 10 14 18	2 6 10 14 18 22



# 第七章 原子的壳层结构

---

一、元素性质的周期性变化

二、原子的电子壳层结构

三、电子组态的能量—壳层的次序

四、电子的壳层排列与元素周期表

五、满壳层的总角动量

六、原子基态光谱项的确定

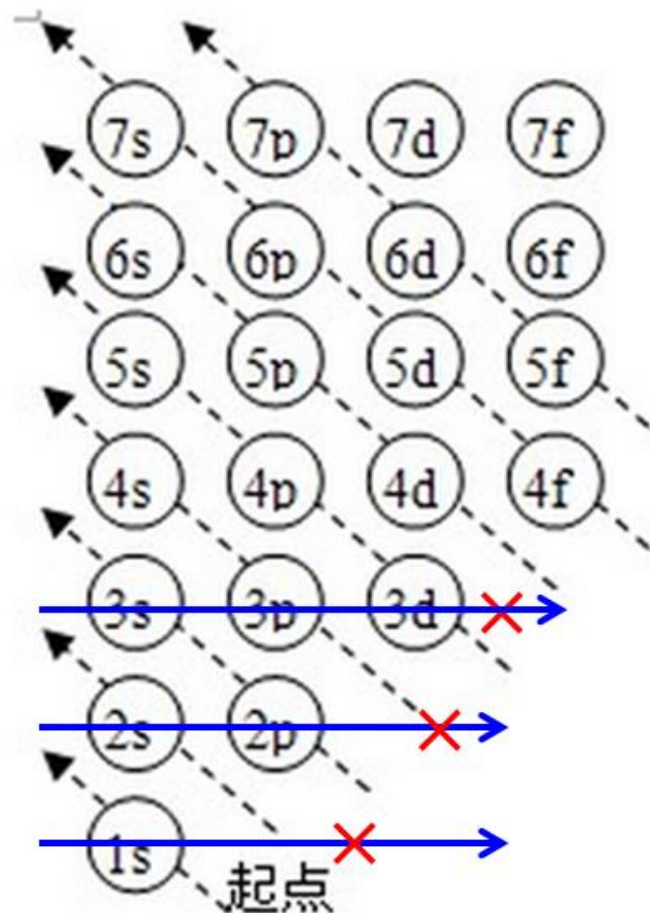
### 三、电子组态的能量—壳层的次序

还有一条经验规律：

原子中电子按 $n+0.7l$ 值大小依次填入 $n$   $l$ 支壳层，该值小的先被填。

如： 4s 和 3d  
 $n+0.7l$ : 4 和 4.4

=>先填4s。见上图，两种方法所得结果完全一致





# 第七章 原子的壳层结构

---

一、元素性质的周期性变化

二、原子的电子壳层结构

三、电子组态的能量—壳层的次序

**四、电子的壳层排列与元素周期表**

五、满壳层的总角动量

六、原子基态光谱项的确定



## 四、电子的壳层排列与元素周期表

通过上面分析，我们可以看出：

元素周期性是电子组态周期性的反映，而电子组态的周期性又联系于特定轨道的可容性和轨道能级的交错性。

我们的物理性质取决于原子最外层和内层未满足壳层的电子组态，而化学性质则取决于原子最外层电子组态。

这样，化学性质的周期性用原子结构的物理现象得到了说明。从而使化学概念“物理化”，使得化学和物理学不再是一门互不相通的学科。在这里，将化学性质在原子领域内物理化了。



# 第七章 原子的壳层结构

---

一、元素性质的周期性变化

二、原子的电子壳层结构

三、电子组态的能量—壳层的次序

四、电子的壳层排列与元素周期表

**五、满壳层的总角动量**

六、原子基态光谱项的确定



## 五、满壳层的总角动量

每一满壳层或满支壳层的总角动量为0，这一结论我们已引用过几次了，现加以论证。

### 1. K层两个电子（满的）

K层 $n=1$ ， $l$ 只能取 $l=0$ ， $m_l$ 只能取 $m_l=0$ ， $m_s=\pm 1/2$ 。

填满 $n=1$ 壳层的两个电子的状态为  $(1. 0. 0. 1/2)$   
 $(1. 0. 0. -1/2)$ ，它们的总轨道量子数在Z轴投影：

$$M_L = \sum m_l = 0$$

总自旋在Z轴投影： $\sum m_s = 1/2 - 1/2 = 0$

由于Z轴是任意的，故总轨道量子数 $L=0$ 和总自旋量子数 $S=0$   $\Rightarrow$ 结果： $J=L+S=0$ 。

## 五、满壳层的总角动量

2、2p支壳层，满时应填六个电子

2p:  $n=2$ ,  $l=1$ ,  $m_l=0, \pm 1$ ,  $m_s=\pm 1/2$

六个电子状态为

(2. 1. 1. 1/2) (2. 1. 1. -1/2) (2. 1. 0. 1/2)  
(2. 1. 0. -1/2) (2. 1. -1. 1/2) (2. 1. -1. -1/2)

它们的 $M_L=\sum m_l=0$ ,  $M_S=\sum m_s=0$ , 因此

$J=M_L+M_S=0 \Rightarrow P_L=0, P_S=0, P_J=0$

## 五、满壳层的总角动量

3、推广：对原子闭合主壳层或闭合支壳层，由于 $m_l$ 和 $m_s$ 对称性（泡利不相容原理限制）

$$M_L = \sum m_l = 0, \quad M_S = \sum m_s = 0,$$

而 $M_L$ 和 $M_S$ 为总轨道角动量 $L$ 和总自旋角动量 $S$ 在 $Z$ 轴投影。而 $Z$ 轴是任意的，这表明 $L$ ， $S$ 在任何方向投影都等于0： $L=0$ ， $S=0$   $J=0$ ，从而 $P_L=0$ ， $P_S=0$ ， $P_J=0$ 。

正是由于上述原因，当原子处于基态时，它的状态就完全由外层未满足主壳层或未满足支壳层中电子组态来决定，而不必考虑满主壳层或满支壳层中电子状态。



# 第七章 原子的壳层结构

---

一、元素性质的周期性变化

二、原子的电子壳层结构

三、电子组态的能量—壳层的次序

四、电子的壳层排列与元素周期表

五、满壳层的总角动量

六、原子基态光谱项的确定

# 六、原子基态光谱项的确定

在元素周期表中列出了原子的基态，但并未说明是怎样由电子组态得到的。

基态原子的电子组态(第一周期)

序号	符号	名称		电子组态	原子基态	电离能(eV)
1	H	Hydrogen	氢	1s	$^2S_{1/2}$	13.589 4
2	He	Helium	氦	1s <sup>2</sup>	$^2S_0$	24.587 4

基态原子的电子组态(第二周期)

序号	符号	名称		电子组态	原子基态	电离能(eV)
3	Li	Lithium	锂	(He)2s	$^2S_{1/2}$	5.391 7
4	Be	Beryllium	铍	(He)2s <sup>2</sup>	$^1S_0$	9.322 7
5	B	Boron	硼	(He)2s <sup>2</sup> 2p	$^2P_{1/2}$	8.298 0
6	C	Carbon	碳	(He)2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>	$^3P_0$	11.260 3
7	N	Nitrogen	氮	(He)2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup>	$^4S_{3/2}$	14.534 1
8	O	Oxygen	氧	(He)2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup>	$^3P_2$	13.618 1
9	F	Fluorine	氟	(He)2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup>	$^2P_{3/2}$	17.422 8
10	Ne	Neon	氖	(He)2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup>	$^1S_0$	21.564 6

## 六、原子基态光谱项的确定

因我们知道，由同一电子组态，可以得到一系列的原子态，哪个为能量最低的原子态—基态呢？

一种笨办法是先由电子组态找出可能的原子态，如  $d^8 (l=2)$ 。

按这种方法，先两个两个相加（按以前角动量的合成规则），但这样很麻烦的。有无其它办法？

前讲，基态由原子外层电子组态确定，我们就可以根据泡利原理与洪特定则由原子基态时电子组态直接确定该原子的基态。

# 六、原子基态光谱项的确定

## 一、用洪特规则：

A. 总自旋角动量取泡利原理所允许的最大值，即：  
 $S = (\sum m_{s_i})_{\max}$  时原子能量最低。

B. 按A确定S后，再让总轨道角动量L取泡利原理所允许最大值，即  $L = (\sum m_{l_i})_{\max}$  时原子能量最低。

C. J值分两种情况。

(1) 如果  $l$  支壳层上填充电子数小于  $2l+1$  时，则总角动量取值  $J = |L-S|$  时 (正序)，原子能量最低。

(2) 若达到或大于  $2l+1$ ，则  $J = L+S$  时 (倒序)，原子能量最低。



## 六、原子基态光谱项的确定

### 二、下面介绍一种具体方法：

由于满支壳层 $S=L=J=0$ . 故计算时只需考虑不满的支壳层 $l$ ，设在 $l$ 支壳层中有 $A$ 个电子。

#### 1. 总自旋角动量 $S$ 的求法：

要使 $\sum m_{s_i}$ 最大，电子自旋应尽量同向排列。但在同一支壳层中(最多有 $2(2l+1)$ 个电子)，自旋可以同向排列的电子至多有 $2l+1$ 个(因 $m_l$ 最多可以有 $2l+1$ 个不同取值)。如前讲过 $2p$ 中6个电子，超过3个者自旋必须反向排列。

## 六、原子基态光谱项的确定

由此可以得到  $m_s$  的取值次序为：

$(\underbrace{1/2, 1/2 \cdots 1/2, 1/2}_{2l+1 \text{ 个}}, \underbrace{-1/2, -1/2 \cdots -1/2}_{2l+1 \text{ 个}})$

$2l+1$  个

$2l+1$  个

取前A个相加

即：从左往右依次取A个值相加得：

$$S = (M_s)_{\max} = \left( \sum m_{s_i} \right)_{\max}$$



## 六、原子基态光谱项的确定

### 2. 总轨道角动量L的求法:

i)  $A \leq 2l+1$ 时, 由于A个电子自旋都同向。能保证 $m_l$ 值一定各不相同; 为得到最大L值, 应该使电子 $m_l$ 按

$$l, (l-1), \dots, 0, -1, \dots, -l$$

次序取A个值相加。

ii)  $A > 2l+1$ 时, 其中前 $2l+1$ 个自旋同向; 这 $2l+1$ 个电子由 (i) 其 $\sum m_{l_i} = 0$ ; 故L值实际取决于自旋反向的 $A - (2l+1)$ 个电子的 $\sum m_{l_j} = ?$

## 六、原子基态光谱项的确定

综合：

此时 $m_l$ 取值应按次序：

$$\frac{(l, (l-1), \dots, 0, -1, \dots, -l)}{2l+1 \text{ 个}} \quad \frac{l, (l-1), \dots, 0, -1, \dots, -l)}{2l+1 \text{ 个}}$$

取A个值相加

依次取A个值相加，得：

$$L = (M_L)_{\max} = (\sum m_l)_{\max}$$



## 六、原子基态光谱项的确定

---

### 3. J值取法,

i)  $A \leq 2l+1$ ,  $J = |L-S|$  (正序)

ii)  $A \geq 2l+1$   $J = L+S$  (反序)

下面以d壳层可能出现的各种基态光谱项为例

# 六、原子基态光谱项的确定

d电子数	d	d <sup>2</sup>	d <sup>3</sup>	d <sup>4</sup>	d <sup>5</sup>	d <sup>6</sup>
对应元素	<sup>21</sup> Sc	<sup>22</sup> Ti	<sup>23</sup> V	<sup>74</sup> W	<sup>25</sup> Mn	<sup>26</sup> Fe
Ms: ↑ 1/2 ↓ -1/2	↑	↑↑	↑↑↑	↑↑↑↑	↑↑↑↑↑	↑↑↑↑↑↓
m <sub>li</sub>	2	2,1	2,1,0	2,1,0,-1	2,1,0,-1,-2	2,1,0,-1,-2,2
S=∑m <sub>si</sub>	1/2	1	3/2	2	5/2	2
L=∑m <sub>li</sub>	2	3	3	2	0	2
J	3/2	2	3/2	0	5/2	4
基态光谱项	<sup>2</sup> D <sub>3/2</sub>	<sup>3</sup> F <sub>2</sub>	<sup>4</sup> F <sub>3/2</sub>	<sup>5</sup> D <sub>0</sub>	<sup>6</sup> S <sub>5/2</sub>	<sup>5</sup> D <sub>4</sub>



## 六、原子基态光谱项的确定

---

### 三、非同科电子基态光谱项的确定

以上是对同科电子来说的，当两个支壳层都有未  
满电子时：

- 1) 应按照上述求出每个支壳层的最大 $M_s$ 和 $M_l$ ，然后分别相加 ( $L=M_{l1}+M_{l2}$ ,  $S=M_{s1}+M_{s2}$ )
- 2) 对 $J$ 的求法：
  - i) 如两支壳层电子数都未半满时，则 $J=|L-S|$
  - ii) 如其中有一个支壳层电子半满以上，则 $J=L+S$ 。

# 六、原子基态光谱项的确定

例1: Rh原子 ( $Z=45$ , 铑), 不满壳层电子组态 $4d^85s$

总自旋  
角动量

$$\left. \begin{array}{l}
 d^8 \quad \uparrow\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow\downarrow \quad M_{s1} = 1 \\
 s \quad \uparrow \quad M_{s2} = \frac{1}{2}
 \end{array} \right\} S = \frac{3}{2}$$

总轨道  
角动量

$$\left. \begin{array}{l}
 d^8 : 2, 1, 0, -1, -2 \Rightarrow M_{L1}=3 \\
 s : 0 \Rightarrow M_{L2}=0
 \end{array} \right\} \Rightarrow L=3$$

$J=9/2$  (都达半满)  $\Rightarrow$  基态光谱项为:  ${}^4F_{9/2}$

45	Rh	Rhodium	铑	(Kr)4d <sup>8</sup> 5s	${}^4F_{9/2}$	7.458 9
----	----	---------	---	------------------------	---------------	---------

## 六、原子基态光谱项的确定

例2: U (Z=92) 不满壳层电子组态为 $5f^3 6d$ .

$$\begin{array}{l}
 \text{总自旋} \\
 \text{角动量}
 \end{array}
 \left\{ \begin{array}{ll}
 f^3 & \uparrow \uparrow \uparrow \\
 d & \uparrow
 \end{array} \right.
 \left. \begin{array}{l}
 M_{s1}=3/2 \\
 M_{s2}=1/2
 \end{array} \right\} \Rightarrow S=2$$

$$\begin{array}{l}
 \text{总轨道} \\
 \text{角动量}
 \end{array}
 \left\{ \begin{array}{ll}
 f^3 & 3, 2, 1 \\
 d & 2
 \end{array} \right.
 \left. \begin{array}{l}
 M_{l1}=6 \\
 M_{l2}=2
 \end{array} \right\} \Rightarrow L=8$$

$$J = |L - S| = 6 \quad (\text{都未达到半满})$$

基态光谱项为 $^5L_6$

92

U

Uranium

铀

$(Rn)5f^3 6d 7s^2$

$^5L_6$

6.194 1

## 六、原子基态光谱项的确定

例3：试确定镍 ( $^{28}\text{Ni}$ ) 原子的基态光谱项； $^{28}\text{Ni}$  基态电子组态为  $[\text{Ar}]3d^84s^2$ 。因4s支壳层已满，故该原子基态仅由8个3d电子耦合。

$$d^8: \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \downarrow \downarrow \downarrow \quad M_s=1$$

$$2, 1, 0, -1, -2, 2, 1, 0 \quad M_l=3$$

$$\therefore L=3, S=1, J=L+S=4 \text{ (达半满)}。$$

故 $^{28}\text{Ni}$ 原子基态为 $^3F_4$

28	Ni	Nickel	镍	$(\text{Ar})3d^84s^2$	$^3F_4$	7.639 8
29	Cu	Copper	铜	$(\text{Ar})3d^{10}4s$	$^2S_{1/2}$	7.726 4