

## 第四章 原子结构与波粒二象性

### 第四节 氢原子光谱和波尔的原子模型

#### [核心素养·明目标]

核心素养	学习目标
物理观念	知道氢原子光谱的规律，理解波尔原子模型的三个假设
科学思维	能用能级图来分析光谱的规律，理解理论的局限性与不足
科学探究	通过波尔理论氢原子光谱的规律的解释培养学生分析能力，揭示物理现象的科学本质
科学态度与责任	从实验规律出发，实事求是，学习科学家艰苦奋斗的精神，激发学生热爱科学的热情

#### [基础知识深层理解提高]

##### 知识点一：光谱及氢原子光谱的实验规律

##### 1. 光谱

(1) 定义：用棱镜或光栅可以把物质发出的光按波长(频率)展开，获得波长(频率)和强度分布的记录，即光谱。

(2) 分类 ①线状谱：有些光谱是一条条的亮线，叫作谱线，这样的光谱叫作线状谱。

②连续谱：有的光谱看起来不是一条条分立的谱线，而是连在一起的光带，叫作连续谱。

③特征谱线：气体中中性原子的发射光谱都是线状谱，且不同原子的亮线位置不同，故这些亮线称为原子的特征谱线。

(4) 光谱分析：①定义：利用原子的特征谱线来鉴别物质和确定物质的组成成分。②优点：灵敏度高。

**温馨提示：**同一种原子可以发射和吸收同一种频率的谱线。

##### 知识点二：氢原子光谱的实验规律和经典理论的困难

##### (1) 氢原子光谱的实验规律

①巴耳末公式 
$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n=3, 4, 5, \dots$$

②意义：巴耳末公式以简洁的形式反映了氢原子的线状光谱的特征。

## (2) 经典理论的困难

(1) 用经典电磁理论在解释原子的稳定性时遇到了困难。

(2) 用经典电磁理论在解释原子光谱是分立的线状谱时遇到了困难。

**温馨提示：**氢原子光谱是线状谱，只有一系列特定波长的光。

## 知识点三：玻尔原子理论的基本假设

### 1. 轨道量子化

(1) 原子中的电子在库仑引力的作用下，绕原子核做圆周运动。

(2) 电子运行轨道的半径不是任意的，也就是说电子的轨道是量子化的(填“连续变化”或“量子化”)。

(3) 电子在这些轨道上绕核的运动是稳定的，不产生电磁辐射。

### 2. 定态

(1) 当电子在不同的轨道上运动时，原子处于不同的状态，具有不同的能量。电子只能在特定轨道上运动，原子的能量只能取一系列特定的值。这些量子化的能量值叫作能级。

(2) 原子中这些具有确定能量的稳定状态，称为定态。能量最低的状态称为基态，其他的状态叫作激发态。

### 3. 频率条件

当电子从能量较高的定态轨道(其能量记为  $E_n$ ) 跃迁到能量较低的定态轨道(能量记为  $E_m$ ,  $m < n$ ) 时，会放出能量为  $h\nu$  的光子，该光子的能量  $h\nu = E_n - E_m$ ，该式称为频率条件，又称辐射条件。

### 4. 能量量子化

(1) 不同轨道对应不同的状态，在这些状态中，尽管电子做变速运动，却不辐射能量，因此这些状态是稳定的，原子在不同状态有不同的能量，所以原子的能量也是量子化的。

(2) 基态：原子最低的能量状态称为基态，对应的电子在离核最近的轨道上运动，氢原子基态能量  $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ 。

(3) 激发态：除基态之外的其他能量状态称为激发态，对应的电子在离核较远的轨道上运动。

氢原子各能级的关系为： $E_n = \frac{1}{n^2} E_1$  ( $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ ,  $n=1, 2, 3, \dots$ )

### 5. 跃迁

原子从一种定态跃迁到另一种定态时，它辐射或吸收一定频率的光子，光子的能量由这两种定态的能量差决定，即高能级  $E_m$  发射光子  $h\nu = E^m - E^n$  吸收光子  $h\nu = E^m - E^n$

低能级  $E_n$ .

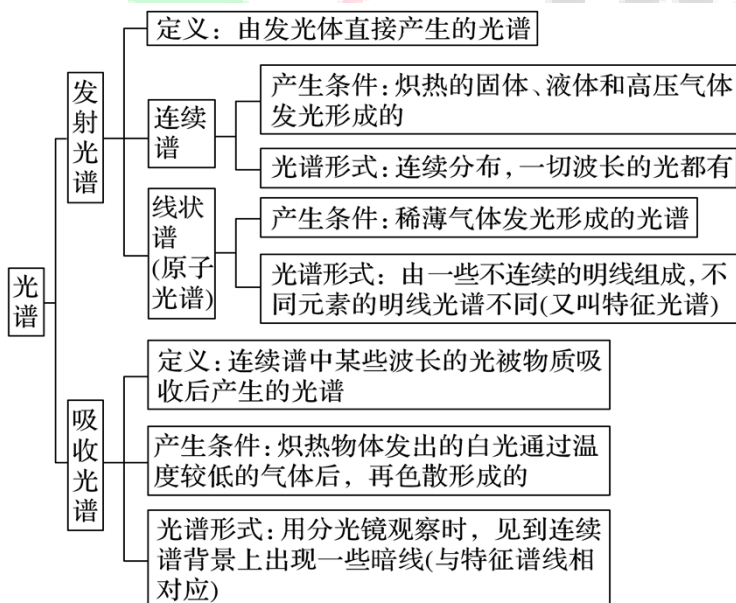
#### [典型例题、易错易混点剖析]

#### 易错易混点 1 对光谱及氢原子光谱的分析及总结

#### 易错易混点辨析:1. 太阳光谱:

特点	在连续谱的背景上出现一些不连续的暗线，是一种吸收光谱
生原因	阳光中含有各种颜色的光，但当阳光透过太阳的高层大气射向地球时，太阳高层大气中含有的元素会吸收它自己特征谱线的光，然后再向四面八方发射出去，到达地球的这些谱线看起来就暗了，这就形成了明亮背景下的暗线

光谱的分类:



2. 氢原子光谱的特点: 在氢原子光谱图中的可见光区内，由右向左，相邻谱线间的距离越来越小，表现出明显的规律性。

3. 巴耳末公式: (1) 巴耳末对氢原子光谱的谱线进行研究得到公式:  $\frac{1}{\lambda} = R_\infty \left( \frac{1}{2^2} \right)$



$\frac{1}{n^2}$  ( $n=3, 4, 5, \dots$ ), 该公式称为巴耳末公式. 式中  $R$  叫作里德伯常量, 实验值为  $R_\infty = 1.10 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ .

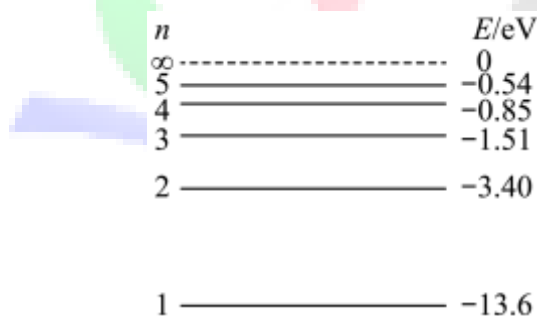
(2) 公式中只能取  $n \geq 3$  的整数, 不能连续取值, 波长是分立的值。

例题 1. 关于原子光谱, 下列说法正确的是 ( )

- A. 原子光谱是不连续的
- B. 由于原子都是由原子核和电子组成的, 所以各种原子的原子光谱是相同的
- C. 各种原子的原子结构不同, 所以各种原子的原子光谱也不相同
- D. 分析物质发光的光谱, 可以鉴别物质中含有那些元素

解析: 选 ACD, 原子光谱为线状谱, 选项 A 正确; 各种原子都有自己的特征谱线, 故选项 B 错误, 选项 C 正确; 对各种原子的特征谱线进行光谱分析可鉴别物质组成, 选项 D 正确。故选 ACD。

例题 2. 如图所示为氢原子的能级图, 巴耳末系是吸收光子能量的原子进入激发态 ( $n \geq 3$ ) 后返回  $n=2$  的量子状态时释放出的谱线, 下列说法正确的是 ( )



- A. 巴耳末系中的最小频率与最大频率之比 5:36
- B. 处于  $n=1$  能级的氢原子可以吸收能量为 13.8eV 的光子
- C. 一个氢原子从  $n=4$  能级向基态跃迁时, 可发出 6 种不同频率的光子
- D. 氢原子由  $n=2$  能级跃迁到  $n=1$  能级时, 原子的电势能增加, 产生的电磁波的波长最长

解析: 选 B, A. 由巴耳末公式  $\frac{1}{\lambda} = R(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2})(n=3,4,5,\dots)$

当  $n=\infty$  时, 有最小波长  $\lambda_1, \frac{1}{\lambda_1} = \frac{R}{2^2} = \frac{R}{4}$ ; 当  $n=3$  时, 有最长波长  $\lambda_2$  则  $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{5}{9}$

根据  $c = \lambda\nu$  则巴耳末系中的最小频率与最大频率之比 5:9, A 错误;

B. 氢原子的能级中能量值最小为-13.6eV, 处于 n=1 能级的氢原子可以吸收能量为13.8eV 的电子的能量, 从而发生电离现象, B 正确;

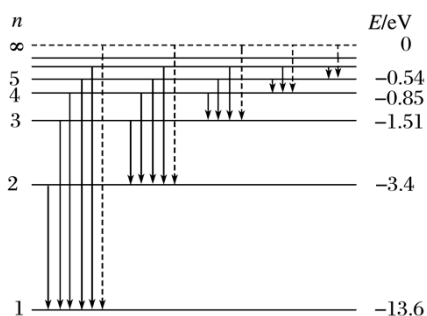
C. 一个处于 n=4 能级的氢原子向低能级跃迁时, 最多能发出 3 种不同频率的光, 即为 n=4→n=3, n=3→n=2, n=2→n=1, C 错误;

D. 氢原子由 n=2 能级跃迁到 n=1 能级后, 其轨道半径减小, 电势能减小, 能级差最小, 放出光子的能量最小, 根据  $E = h\frac{c}{\lambda}$  产生的电磁波的波长最长, D 错误。

故选 B。

易错易混点 2: 玻尔理论对氢光谱的解释

易错易混点辨析:1. 氢原子能级图



2. 能级跃迁: 处于激发态的原子是不稳定的, 它会自发地向较低能级跃迁, 经过一次或几次跃迁到达基态. 所以一群氢原子处于量子数为 n 的激发态时, 可能辐射出的光谱线条数为  $N = C_n^2 = \frac{n(n-1)}{2}$ .

3. 光子的发射: 原子由高能级向低能级跃迁时以光子的形式放出能量, 发射光子的频率由下式决定.

$h\nu = E_m - E_n$  ( $E_m$ 、 $E_n$  是始末两个能级且  $m > n$ ),  
能级差越大, 发射光子的频率就越高.

4. 光子的吸收: 原子只能吸收一些特定频率的光子, 原子吸收光子后会从较低能级向较高能级跃迁, 吸收光子的能量仍满足  $h\nu = E_m - E_n$  ( $m > n$ ).

例题 3. 如图所示是氢原子的能级图, 大量处于 n=4 激发态的氢原子向低能级跃迁时, 可以辐射出多种不同频率的光子, 其中巴耳末系是指氢原子由高能级向 n=2 能级跃迁时释放的光子. 下列说法正确的是 ( )

例题 3. 如图所示是氢原子的能级图, 大量处于 n=4 激发态的氢原子向低能级跃迁时, 可以辐射出多种不同频率的光子, 其中巴耳末系是指氢原子由高能级向 n=2 能级跃迁时释放的光子. 下列说法正确的是 ( )

$n$	$E/\text{eV}$
$\infty$	0
4	-0.85
3	-1.51
2	-3.40
1	-13.60

- A. 最多可放出 6 种频率不同的光子，全部属于巴耳末系
- B. 放出的光子中波长最长的是  $n=4$  激发态跃迁到  $n=3$  激发态时产生的
- C. 放出的光子可能使逸出功为  $13\text{eV}$  的金属发生光电效应
- D. 用能量为  $2.56\text{eV}$  的光子照射处于  $n=2$  能级的氢原子，可以使它跃迁到  $n=4$  能级

解析：选 B，A. 最多可放出 6 种频率不同的光子，属于巴尔末系的只有两种。

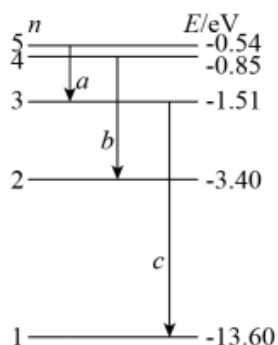
A 错误；

B. 光子波长最长时，其频率最小，即光子能量最小，所以放出的光子中波长最长的是  $n=4$  激发态跃迁到  $n=3$  激发态时产生的。B 正确；

C. 放出的光子能量最大的是  $12.75\text{eV}$ ，故不能使逸出功为  $13\text{eV}$  的金属发生光电效应。C 错误；

D. 处于  $n=2$  能级的氢原子，跃迁到  $n=4$  能级需要吸收  $2.55\text{eV}$  能量的光子，D 错误。故选 B。

例题 4. 如图所示，为氢原子的能级示意图：a 表示从能级  $n=5$  跃迁到  $n=3$  时辐射的光子；b 表示从能级  $n=4$  跃迁到  $n=2$  时辐射的光子；c 表示从能级  $n=3$  跃迁到  $n=1$  时辐射的光子。则以下说法正确的是（ ）



- A. 玻尔的原子能级模型可以解释所有原子辐射光子的规律
- B. 若 b 光可使某金属发生光电效应，则 a 光也一定可以
- C. 若有一个处于  $n=5$

能级的氢原子向低能级跃迁，则该氢原子只能发出 a、b、c 三种光子的其中一种

D. 若有一群处于  $n=5$  能级的氢原子向低能级跃迁，则这些氢原子最多可辐射出 10 种不同频率的光子

解析：选 D， A. 玻尔的原子能级模型只能解释氢原子的光谱规律，选项 A 错误；

B. a 光的能量比 b 光的能量小，不一定能使该金属发生光电效应，选项 B 错误；

C. 一个  $n=5$  能级的氢原子向低能级跃迁，最多能辐射出 4 种光子，选项 C 错误；

D. 从  $n=5$  跃迁到  $n=1$ ，最多可辐射出 10 种不同频率的光子，选项 D 正确。故选 D。

### 易错易混点 3 能级跃迁的几种情况的对比

#### 易错易混点辨析：1. 自发跃迁与受激跃迁的比较

(1) 自发跃迁：

①由高能级到低能级，由远轨道到近轨道. ②释放能量，放出光子(发光)： $h\nu = E_{初} - E_{末}$ .

③大量处于激发态为  $n$  能级的原子可能的光谱线条数： $\frac{n(n-1)}{2}$ .

(2) 受激跃迁：

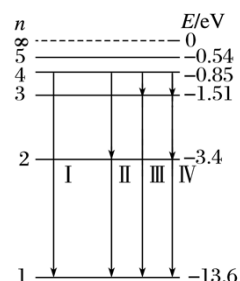
①由低能级到高能级，由近轨道到远轨道. ②吸收能量  $\begin{cases} \text{a. 光照射} \\ \text{b. 实物粒子碰撞} \end{cases}$

2. 使原子能级跃迁的两种粒子——光子与实物粒子

(1) 原子若是吸收光子的能量而被激发，则光子的能量必须等于两能级的能量差，否则不被吸收，不存在激发到  $n$  能级时能量有余，而激发到  $n+1$  能级时能量不足，则可激发到  $n$  能级的问题.

(2) 原子还可吸收外来实物粒子(例如，自由电子)的能量而被激发，由于实物粒子的动能可部分地被原子吸收，所以只要入射粒子的能量大于或等于两能级的差值，就可使原子发生能级跃迁.

3. 一个氢原子跃迁和一群氢原子跃迁的区别





(1) 一个氢原子跃迁的情况分析



①确定氢原子所处的能级，画出能级图。

②根据跃迁原理，画出氢原子向低能级跃迁的可能情况示意图。

例如：一个氢原子最初处于  $n=4$  激发态，它向低能级跃迁时，有 4 种可能情况，如图，情形 I 中只有一种频率的光子，其他情形为：情形 II 中两种，情形 III 中两种，情形 IV 中三种。

注意：上述四种情形中只能出现一种，不可能两种或多种情形同时存在。

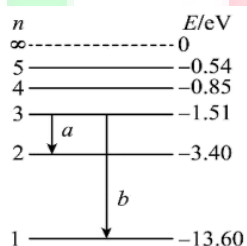
(2) 一群氢原子跃迁问题的计算

①确定氢原子所处激发态的能级，画出跃迁示意图。

②运用归纳法，根据数学公式  $N=C_n^2 = \frac{n(n-1)}{2}$  确定跃迁时辐射出几种不同频率的光子。

③根据跃迁能量公式  $h\nu = E_m - E_n (m > n)$  分别计算出各种光子的频率。

例题 5. 氢原子的能级图如图所示，现有大量的氢原子处于  $n=3$  的激发态，当氢原子从  $n=3$  能级跃迁到  $n=2$  能级时，辐射出光子 a；当氢原子从  $n=3$  能级跃迁到  $n=1$  能级时，辐射出光子 b。下列说法正确的是 ( )



- A. 大量氢原子处于  $n=3$  的激发态最多可放出 2 种光子
- B. 光子 a 的能量大于光子 b 的能量
- C. 光子 a 能使处于  $n=3$  能级的氢原子电离
- D. 处于  $n=3$  激发态的氢原子可吸收能量是  $0.76\text{eV}$  的光子

解析：选 C，A. 根据公式  $C_3^2 = 3$  可知大量氢原子能发出三种频率不同的光，故 A 错误；

B. 氢原子从  $n=3$  的能级跃迁到  $n=2$  的能级的能级差为  $-1.51\text{eV} - (-3.40)\text{eV} = 1.89\text{eV}$ ，小于从  $n=3$  的能级跃迁到  $n=1$  的能级时的能级差  $-1.51\text{eV} - (-13.6)\text{eV} = 12.09\text{eV}$ ，根据公式  $E = h\nu = E_m - E_n$  可知光子 a 的能量小于光子 b 的能量，故 B 错误；

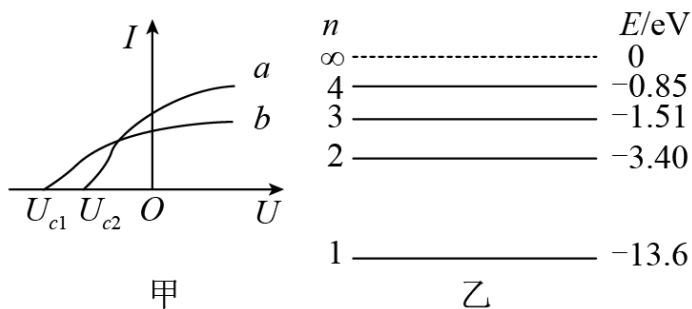
C. 氢原子从  $n=3$  的能级跃迁到  $n=2$  的能级的能极差为  $E=h\nu=-1.51\text{eV}-(-3.40)\text{eV}=1.89\text{eV}$ ，因为  $1.89\text{eV}$  大于  $1.51\text{eV}$ ，所以光子 a 能使处于  $n=3$  能级的氢原子电离，故 C 正确；

D. 用光子能量是  $E=0.76\text{eV}$  的光照射处于  $n=3$  的激发态的氢原子，根据公式  $E=h\nu=E_m-E_3$  可得  $E_m=-0.81\text{eV}$

由氢原子的能级图可知不可被吸收，故 D 错误。

故选 C。

例题 6. a、b 两种可见光在同一光电效应装置中测得的光电流和电压的关系如图甲所示，图乙为氢原子能级图。已知可见光的光子能量在  $1.62\text{eV}$  到  $3.11\text{eV}$  之间，下列说法正确的是 ( )



- A. a 光的波长比 b 光的小
- B. 单色光 a 的光子动量比单色光 b 的光子动量大
- C. 若 a 光是从  $n=4$  跃迁到  $n=2$  能级时发出的光，则 b 光是从  $n=3$  跃迁到  $n=2$  能级时发出的光
- D. 用  $E=12.8\text{eV}$  的电子去轰击基态的氢原子，可以得到两种可见光

解析: 选 D, A. 根据  $h\nu - W = eU$  可知，频率越大的截止电压越大，所以 a 光的频率比 b 光的小，根据

$\lambda = \frac{c}{\nu}$  可知，频率越大时波长越小，所以 a 光的波长比 b 光的大，则 A 错误；

B. 根据  $p = \frac{h}{\lambda}$  可知，单色光 a 的光子动量比单色光 b 的光子动量小，所以 B 错误

C. 根据  $E = h\nu$  因为 a 光的频率比 b 光的小，则 a 光是从  $n=4$  跃迁到  $n=2$  能级时发出的光，则 b 光不可能是从  $n=3$  跃迁到  $n=2$  能级时发出的光，所以 C 错误；

D. 用  $E=12.8\text{eV}$  的电子去轰击基态的氢原子，有

$$\Delta E = E_4 - E_1 = -0.85 - (-13.6) = 0.75\text{eV} < 0.80\text{eV}$$

可以跃迁到第四个能级,所以能得到两种可见光,  $n=4$  跃迁到  $n=2$ ,  $n=3$  跃迁



到  $n=2$ ，则 D 正确；

故选 D。

**易错易混点 4：原子的能量及变化规律**

**易错易混点辨析：** 1. 原子的能量： $E_n = E_{kn} + E_{pn}$ 。

2. 电子绕氢原子核运动时： $k\frac{e^2}{r^{n2}} = m\frac{v^{n2}}{r^n}$ ，故  $E_{kn} = \frac{1}{2}mv_n^2 = \frac{ke^2}{2r^n}$ ；电子轨道半径越大，

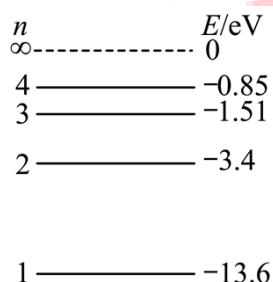
电子绕核运动的动能越小。

3. 当电子的轨道半径增大时，库仑引力做负功，原子的电势能增大，反之，电势能减小。

4. 电子的轨道半径增大时，说明原子吸收了能量，从能量较低的轨道跃迁到了能量较高的轨道。即电子轨道半径越大，原子的能量  $E_n$  越大。

例题 5. 如图为氢原子的能级图，已知可见光的光子能量范围约为 1.62~

3. 11eV，以下说法正确的是（ ）



A. 原子跃迁到低能级后系统的势能减小

B. 氢原子从高能级向基态跃迁时可能发射  $\gamma$  光子

C. 处于  $n=2$  能级的氢原子可以吸收任意频率的紫外线，并且使氢原子电离

D. 用能量为 11.0eV 的光子激发处于基态的氢原子，可使其跃迁到激发态

**解析：** 选 A，A. 氢原子由较高能级跃迁到较低能级时，能量减小，轨道半径

减小，根据  $k\frac{e^2}{r^2} = m\frac{v^2}{r}$

知电子动能增大，则电势能减小，故 A 正确；

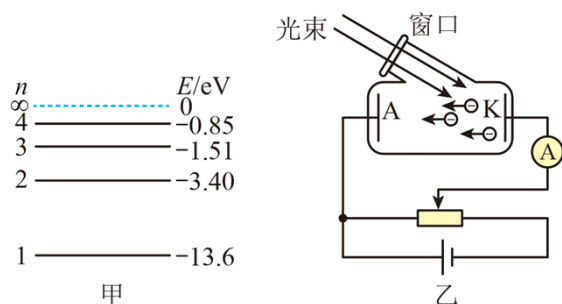
B. 从能量为 0 跃迁到基态，放出的光子能量也就是 13.6eV。小于  $\gamma$  光子的能量，故 B 错误；

C. 紫外线的能量大于 3.11eV，处于  $n=2$  能级的氢原子吸收紫外线后，能量不一定大于 0，不一定能电离，故 C 错误；

D. 11.0eV 的能量不等于基态与其它能级间的能级差，所以不会发生跃迁，故

D 错误。故选 A。

例题 6. 氢原子能级示意图如图所示，已知大量处于基态的氢原子，当它们受到某种频率的光线照射后，可辐射出 6 种频率的光。下列说法正确的是 ( )



- A. 基态的氢原子受到照射后跃迁到  $n=3$  能级
- B. 用这些光照射逸出功为  $3.34\text{eV}$  的金属锌，能使金属锌逸出光电子的光子频率有 4 种
- C. 氢原子向低能级跃迁后核外电子的动能减小
- D. 氢原子由  $n=4$  能级跃迁到  $n=3$  能级产生的光的波长最大

解析：选 D， A. 基态的氢原子受到照射后跃迁到  $n=4$  能级，可辐射 6 种频率的光，A 错误；

B. 这 6 种频率光子的能量分别为：4 跃迁到 1，3 跃迁到 1，2 跃迁到 1，产生的光子的能量分别为  $12.75\text{eV}$ ， $12.09\text{eV}$ ， $10.2\text{eV}$ ，都大于  $3.34\text{eV}$ ，都能使金属锌产生光电效应；4 跃迁到 2，3 跃迁到 2，4 跃迁到 3，产生的光子的能量分别为  $2.55\text{eV}$ ， $1.89\text{eV}$ ， $0.66\text{eV}$ ，都小于  $3.34\text{eV}$ ，都不能使金属锌产生光电效应；所以用这些光照射逸出功为  $3.34\text{eV}$  的金属锌，能使金属锌逸出光电子的光子频率有 3 种，B 错误；

C. 根据动能定理得  $k\frac{e^2}{r^2} = m\frac{v^2}{r}$ ， $E_k = \frac{1}{2}mv^2$  解得  $E_k = \frac{ke^2}{2r}$  氢原子向低能级跃迁后  $r$  变小，核外电子的动能增大，C 错误；

D. 光子的能量为  $E = h\nu$  波长为  $c = \lambda\nu$  解得  $\lambda = \frac{hc}{E}$  氢原子由  $n=4$  能级跃迁到  $n=3$  能级产生的光子能量最小，波长最长，D 正确。故选 D。

【针对训练】

一、单选题

1. 一个氢原子从  $n=2$  能级跃迁到  $n=3$  能级，也就是氢原子核外电子从半径较

小的轨道跃迁到半径较大的轨道，该原子（ ）

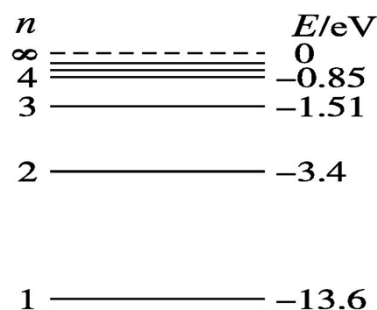
- A. 吸收光子，能量增大 B. 吸收光子，能量减小  
C. 放出光子，能量增大 D. 放出光子，能量减小

解析：选 A，氢原子从低能级向高能级跃迁时，吸收光子，能量增大。

故选 A。

2. 如图所示为氢原子能级图。大量处于  $n=4$  能级的氢原子向低能级跃迁时发出不同频率的光。用这些光照射金属钙。已知金属钙的逸出功为  $3.20 \text{ eV}$ 。能够从金属钙的表面照射出光电子的光共有（ ）

- A. 2 种 B. 3 种 C. 4 种 D. 5 种



解析：选 B，根据组合公式，可知，大量的处于  $n=4$  能级的氢原子向低能级跃迁时，能发出 6 种不同频率的光电子，它们的能量分别是  $E_1 = -0.85\text{eV} - (-1.51$

$\text{eV}) = 0.66 \text{ eV}$ ； $E_2 = -0.85\text{eV} - (-3.40\text{eV}) = 2.55\text{eV}$ ；

$E_3 = -0.85\text{eV} - (-13.6\text{eV}) = 12.75\text{eV}$ ； $E_4 = -1.51 \text{ eV} - (-3.40\text{eV}) = 1.89\text{eV}$ ；

$E_5 = -1.51\text{eV} - (-13.6\text{eV}) = 12.0 \text{ eV}$

$E_6 = -3.40\text{eV} - (-13.6\text{eV}) = 10.2\text{eV}$  可见有三种光电子的能量大于  $3.20\text{eV}$ ，故能够从金属钙的表面照射出光电子的光共有三种，故 B 正确。

3. 关于光谱和光谱分析，下列说法正确的是（ ）

- A. 太阳光谱和白炽灯光谱是线状谱  
B. 霓虹灯和煤气灯火焰中燃烧的钠蒸气产生的光谱是线状谱  
C. 进行光谱分析时，可以利用线状谱，也可以利用连续谱  
D. 观察月亮光谱，可以确定月亮的化学组成

解析：选 B，A. 太阳光谱是吸收光谱，白炽灯是连续光谱，所以 A 错误；

B. 煤气灯火焰中钠蒸气产生的光谱属稀薄气体发光，是线状谱，所以 B 正确

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。  
如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/767046114011006154>

