

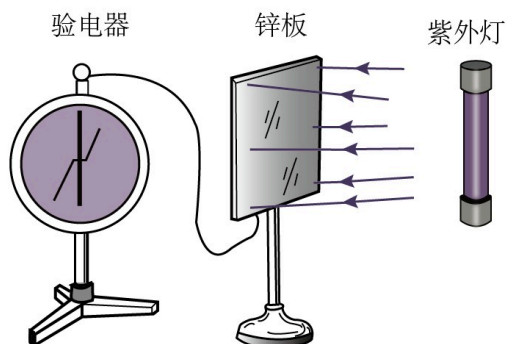
## 第16章 原子物理学

### 一、光电效应

“光究竟是什么？”似乎不应再是一个问题。因此从19世纪初开始，托马斯·杨、菲涅耳、马吕斯等分别观察到了光的干涉、衍射和偏振现象，这等于对微粒说宣判了死刑。19世纪60年代和80年代，麦克斯韦和赫兹先后从理论上和实验上确定了光的电磁波本质，光的波动理论似乎已经完美了。

#### 1. 光电效应现象

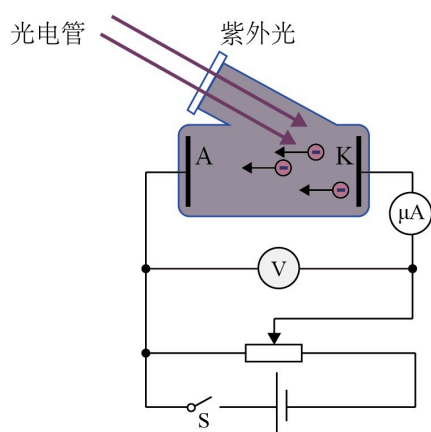
1887年德国科学家赫兹在研究电磁波的实验中偶然发现了光电现象。如图所示，把一块锌板连接在验电器上，手触锌板使验电器指示归零。用紫外线照射锌板，发现验电器的指针张开一定角度，撤去紫外灯，发现验电器的指针仍然指在该角度处，再用毛皮摩擦过的橡胶棒与验电器接触一下，观察到验电器的指针偏转角度减小，说明经过紫外灯照射后的锌板带正电了。



物理学家赫兹（德国）、勒纳德（德国）、汤姆孙（英国）等相继进行了实验研究，证实了这样一个现象：**照射到金属表面的光，能使金属表面的电子从表面逸出。这个现象称为光电效应，这种电子常被称为光电子。**

#### 2. 光电效应的规律

可以用如下图所示的电路研究光电效应中电子发射的情况与照射光的强弱、光的频率等物理量间的关系。阴极 $K$ 和阳极 $A$ 是密封在真空玻璃管中的两个电极，阴极 $K$ 在受到光照时能够发射光电子。 $K$ 与 $A$ 之间的电压的大小可以调整。电源按图示连接时，阳极 $A$ 吸收阴极 $K$ 发出的光电子，在电路中形成光电流。

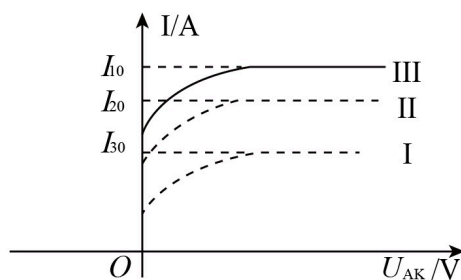


实验发现以下规律。

### ①入射光越强，单位时间内发射的光电子数越多

在图中，如果光电管两端电压为0，则从锌板K发射出的光电子是朝四面八方的。如果发射出的所有光电子都被A板接收，则灵敏电流表 $\mu A$ 的示数（此时的电流叫作饱和电流）就能反映单位时间内发射出的光电子数的多少。调节滑动变阻器的滑片，使A、K板之间的电势差增大到足够大，就能达到上述目标。

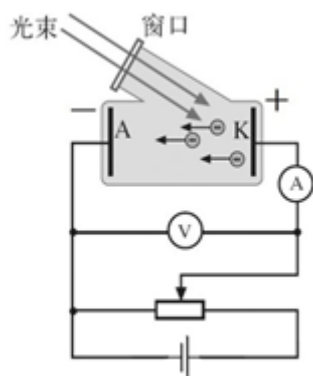
我们采用三种频率相同、强度依次增加的紫外光来做实验，结果如图所示。



从图可以看出，当入射光的频率一定时，入射光越强，饱和电流越大，即单位时间内发射的光电子数就越多。

### ②光电子的最大初动能与光强无关，随入射光的频率的增大而增大

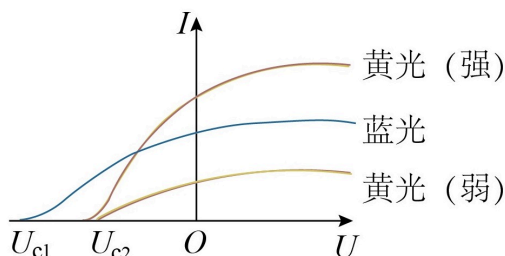
从上图中我们也可以看出，当 $U_{AK} = 0$ 时，灵敏电流表的示数 $I \neq 0$ 。这说明，在AK之间没有电场加速的情况下，还有光电子到达A板，也就是说从锌板K出来的光电子是有初动能的。有些光电子是来自金属表面的自由电子，有些光电子是来自金属内部的自由电子，所以不同的光电子的初动能应该是不同的。我们可能会想，从锌板“飞出”的光电子的最大初动能与光强有关。是不是这样的呢？



在电路图中，若将电源反向接入电路，即让A板电势低，K板电势高，这时电场力对光电子做负功，动能较小的光电子就不能打在A板上。调节滑动变阻器的滑片，使得K、A板间的电势差为 $U_c$ 时，灵敏电流表的示数刚好为0（电压 $U_c$ 叫作截止电压），这时，没有光电子到达A板。考虑动能最大的、方向朝着KA方向飞出的光电子，它刚好不能到达A板，对其应用动能定理，有 $-eU_c = 0 - E_{km}$ 。可见，光电子的最大初动能可以通过观察截止电压 $U_c$ 的大小来获得。 $U_c$ 越大，对应的光电子的最大初动能 $E_{km}$ 就越大。

结果显示，相同频率不同强度的光对应的遏制电压 $U_c$ 相同。也就是说，**光电子的最大初动能 $E_{km}$ 与光强无关。**

光强相同不同频率的光对应的遏制电压不同，频率增高，截止电压增大。这说明，**光电子的最大初动能随入射光频率的增大而增大。**



光电流与电压的关系



### ③金属都存在极限频率

既然减小入射光的频率，对应的光电子的最大初动能就减小，那么，当入射光的频率减小到很小时，还会有光电子飞出锌板吗？

用一束绿光照射锌板K，发现无论怎样调节滑动变阻器的滑片，灵敏电流表也没有示数。换用强度更大的绿光照射K板，灵敏电流表还是没有示数。说明绿光不能使锌板K发生光电效应。若改用强度非常小的紫外光照射锌板，也能发生光电效应。

将电源按 $K$ 负 $A$ 正连接，将 $K$ 处的锌板换成钾板，用绿光照射钾板 $K$ ，灵敏电流表有示数，说明绿光能使钾板发生光电效应。这说明能否发生光电效应，除了取决于入射光的频率，还取决于被照射的金属。

大量事实表明：**每种金属都对应一个极限频率（又称截止频率） $\nu_c$ ，当入射光的频率 $\nu$ 大于金属的极限频率 $\nu_c$ 时，才能发生光电效应，与入射光的强度无关。**



#### ④光电效应具有瞬时性

当入射光频率超过金属的截止频率时，无论光强多弱，几乎在照到金属时立即产生光电流。精确测量表明产生光电流的时间不超过 $10^{-9}s$ ，即光电效应几乎是瞬间发生的。

### 3. 波动理论在解释光电效应时遇到的困难

光的电磁波理论只能部分解释光电效应。

我们知道，金属中原子外层的价电子会脱离原子而做无规则的热运动。但在温度不很高时，电子并不能大量逸出金属表面，这表明金属表面层内存在一种力，阻碍电子的逃逸。电子若能从金属中挣脱出来，必须克服这种阻碍作用而做功。使电子脱离某种金属所做功的最小值，叫作这种金属的逸出功，用 $W_0$ 表示。不同金属的逸出功不同（见下表）。当光照射金属表面时，电子吸收能量。若电子吸收的能量与原有的热运动能量之和超出逸出功，电子就从表面逸出，这就是光电子。光越强，逸出的电子数越多，光电流就越大。这些结论都与实验相符。

几种金属的逸出功和极限频率					
金属	钨	钙	钠	钾	铷
$\nu_c / 10^{14} \text{ Hz}$	10.95	7.73	5.53	5.44	5.15
$W_0 / \text{eV}$	4.54	3.20	2.29	2.25	2.13

但是，按照光的电磁理论，还应得出如下结论：①光越强，光电子的初动能应越大；②不管光的频率如何，只要光足够强，电子都应获得足够能量而出表面，不应存在截止频率；③如果光很弱，按经典电磁理论估算，电子要很长的时间才能获得逸出表面所需的能量，这时间应远远大于。所有这些结论都与光电效应的规律相矛盾。

### 4. 爱因斯坦的光子说

1905年，爱因斯坦提出了光子说：

①光是由一个个不可分割的能量子组成的，频率为 $\nu$ 的光的能量子为 $h\nu$ ，为普朗克常量，大小约为 $6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$ ，这些能量子后来被称为**光子**。

②在光电效应中，金属中的一个电子只能吸收一个光子，获得的能量是 $h\nu$ ，这些能量的一部分用来克服金属的逸出功 $W_0$ ，剩下的表现为逸出后电子的最大初动能 $E_k$ ，即

$$h\nu = E_k + W_0$$

这就是**爱因斯坦的光电效应方程**。

## 5. 光子说对光电效应的解释

①爱因斯坦光电效应方程表明，光电子的初动能 $E_k$ 与入射光的频率 $\nu$ 呈线性关系，与光强无关。只有当 $h\nu > W_0$ 时，才有光电子逸出， $\nu_c = \frac{W_0}{h}$ 是光电效应的截止频率。

②电子一次性吸收光子的全部能量，不需要积累能量的时间，这就能解释为什么光电流几乎是瞬时发生。

③光强较大时，包含的光子数较多，照射金属时产生的光电子多，因而饱和电流大。所以饱和电流与光强成正比。

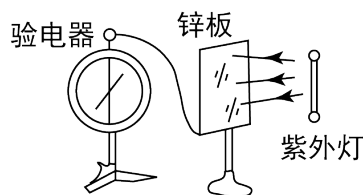
爱因斯坦提出光电效应的解释时，实验测量尚不精确，加上这种观点与以往的观点大相径庭，因此并未立即得到承认。从1907年起，美国物理学家密立根开始以精湛的技术测量光电效应中几个重要物理量，这成了爱因斯坦光电效应方程在很小误差范围内的直接实验证据。由于爱因斯坦提出了光子假说，成功地解释了光电效应的实验规律，因此获得1921年的诺贝尔物理学奖。

光子像其他粒子一样，也具有能量。光电效应显示了光的粒子性。

### 例题精讲

1 光电效应显示了光的粒子性，光子像其他粒子一样，也具有能量。爱因斯坦由于发现了光电效应规律而获得1921年的诺贝尔物理学奖。

(1) 如图所示为演示光电效应的实验装置，用导线将验电器与洁净锌板连接，触摸锌板使验电器指示归零。



- ① 用紫外线照射锌板，验电器指针发生明显偏转，说明锌板带电，锌板带 \_\_\_\_\_ 电（选填“正”或“负”）；
- ② 若改用红外线照射锌板，结果发现验电器指针不偏转，说明金属锌的极限频率 \_\_\_\_\_ 红外线的频率（选填“大于”、“等于”或“小于”）。

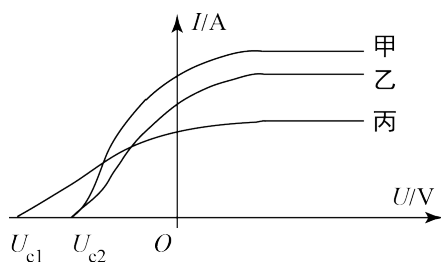
(2) 在光电效应实验中，用单色光照射某种金属，金属表面有光电子逸出，则光电子的最大初动能取决于入射光的（ ）

- A. 频率                      B. 强度                      C. 照射时间                      D. 光子数目

(3) 关于光电效应，下列说法正确的是（ ）

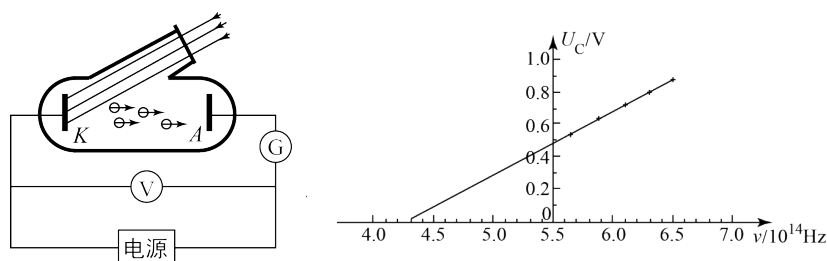
- A. 只要光照射的时间足够长，任何金属都能产生光电效应
- B. 从金属表面出来的光电子的最大初动能越大，金属的逸出功越小
- C. 极限频率越大的金属材料，逸出功越大
- D. 入射光的强度一定时，频率越高，单位时间内逸出的光电子数就越多

(4) 在光电效应实验中，某同学用同一光电管在不同实验条件下得到了三条光电流与电压之间的关系曲线（甲光、乙光、丙光），如图所示，则可判断出（ ）



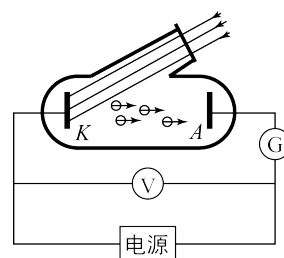
- A. 甲光的光强大于乙光的光强
- B. 甲光的频率大于乙光的频率
- C. 乙光的波长大于丙光的波长
- D. 甲光对应的光电子最大初动能大于丙光的光电子最大初动能

(5) 从1907年起，密立根就开始测量金属的遏止电压 $U_c$ （即图甲所示的电路中电流表G的读数减小为零时夹在电极K、A之间的反向电压）与入射光的频率 $\nu$ ，由此算出普朗克常量 $h$ ，并与普朗克根据黑体辐射得出的 $h$ 相比较，以检验爱因斯坦光电效应方程的正确性。按照密立根的方法我们利用图甲所示的装置进行实验，得到了某金属的 $U_c - \nu$ 图像如图乙所示。已知元电荷 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{C}$ ，下列说法正确的是（ ）



- A. 该金属的截止频率约为  $5.50 \times 10^{14} \text{ Hz}$
- B. 该金属的截止频率约为  $4.27 \times 10^{14} \text{ Hz}$
- C. 该图线的斜率为普朗克常量
- D. 该图线的斜率为这种金属的逸出功

- (6) 以往我们认识的光电效应是单光子光电效应，即一个电子在极短时间内只能吸收到一个光子而从金属表面逸出。强激光的出现丰富了人们对于光电效应的认识，用强激光照射金属，由于其光子密度极大，一个电子在极短时间内吸收多个光子成为可能，从而形成多光子电效应，这已被实验证实。光电效应实验装置示意如图所示。用频率为  $\nu$  的普通光源照射阴极 K，没有发生光电效应。换用同样频率为  $\nu$  的强激光照射阴极 K，则发生了光电效应；此时，若加上反向电压  $U$ ，即将阴极 K 接电源正极，阳极 A 接电源负极，在 KA 之间就形成了使光电子减速的电场，逐渐增大  $U$ ，光电流会逐渐减小；当光电流恰好减小到零时，所加反向电压为  $U_0$ 。若普朗克常量为  $h$ ，电子电量为  $e$ ，则阴极板金属的逸出功可能是下列的 ( )



- A.  $W = h\nu - eU_0$
- B.  $W = 2h\nu - U_0$
- C.  $W = 2h\nu - eU_0$
- D.  $W = 2.5h\nu - eU_0$

- (7) 根据光电效应和康普顿效应可知：光子既有能量也有动量，光子的能量  $E$  和动量  $p$  之间的关系是  $E = pc$ ，其中  $c$  为光速。由于光子有动量，照到物体表面的光子被物体吸收或被反射时都会对物体产生一定的冲量，也就对物体产生了一定的压强。根据动量定理可近似认为：当动量为  $p$  的光子垂直照到物体表面，若被物体反射，则物体受到的冲量大小为  $2p$ ；若被物体吸收，则物体受到的冲量大小为  $p$ 。某激光器发出激光束的功率为  $P_0$ ，光束的横截面积为  $S$ 。当该激光束垂直照射到某物体表面时，物体对该激光的反光率为 60%，求激



光束对此物体产生的压强为多少？

答案

- (1) ① 正  
② 大于
- (2) A
- (3) C
- (4) AC
- (5) B
- (6) C
- (7)  $\frac{1.6P_0}{cS}$

解析

- (1) ① 用毛皮摩擦过的要橡胶棒带负电，当其接触锌板时，发现验电器指针张角减小，这说明锌板带电量减小，故锌板一定带正电，部分电量被橡胶棒所带负中和。
- ② 若用红外线照射，发现验电器指针根本不会发生偏转，这说明没有发生光电效应，故金属锌的频率大于红外线的频率。
- (2) 根据爱因斯坦的光电效应方程， $h\nu - W = \frac{1}{2}mv^2$ 。光子具有粒子性，光电效应打出光电子的最大初动能与入射光的频率相关，而与光强，照射时间和光子数目无光。故A正确。
- 故选A。
- (3) A．发生光电效应的条件是入射光的频率大于极限频率，与入射光照射的时间无关，故A错误；
- B．根据光电效应方程  $E_{km} = h\nu - W_0$  知，最大初动能与入射光的频率成一次函数关系，与金属的逸出功无关。故B错误；
- C．根据  $W_0 = h\nu_0$  知，极限频率越大的金属材料逸出功越大，故C正确；
- D．光的强度影响的是单位时间发出光电子数目，入射光强一定时，频率越高，则光子数目越少，单位时间内逸出的电子数就减少，故D错误。
- 故选C。
- (4) A．光强越强，光饱和电流越大，故A正确；



B. 甲、乙光截止电压相同，故它们的频率相同，故B错误；

C. 乙光截止电压比丙低，故乙光频率比丙低，波长比丙长，故C正确；

D. 甲光截止电压比丙低，根据  $U = \frac{1}{2}mv_m^2 = h\nu - W$  . 甲光对应的光电子最大初动能小于丙光电子最大初动能，故D错误 .

故选AC .

(5) AB. 当  $U_C = 0$  时，可解得  $\nu - \frac{W_0}{h} = \nu_C$  . 此时读图可知  $\nu_C \approx 4.3 \times 10^{14} \text{Hz}$  . 即金属的截止频率约为  $4.3 \times 10^{14} \text{Hz}$  . 在误差允许范围内，故A错误B正确；

CD. 设金属的逸出功为  $W_0$  截止频率为  $\nu_C$  . 则有  $W_0 = h\nu_C$  . 光电子的最大初动能  $E_{km}$  与遏止电压  $U_C$  的关系是  $E_{km} = eU_C$  . 光电效应方程  $E_{km} = h\nu - W_0$  . 联立两式可得  $U_C = \frac{h}{e}\nu - \frac{W_0}{e}$  . 故  $U_C$  与  $\nu$  图象的斜率为  $\frac{h}{e}$  . 故CD错误 .

故选B .

(6) 由题可知，用强激光照射发生光电效应时有  $E_k = nh\nu - W$  ( $n = 2, 3, 4, 5, 6 \dots$ ) 在  $KA$  之间逐渐增大  $U$  . 当光电充恰好减小到零时，由动能定理可得：

$-eU = 0 - E_k$  . 联立可得  $W = 2h\nu - eU$  ( $n = 2, 3, 4, 5, 6 \dots$ )，故C正确 .

故选C .

(7) 时间  $t$  内释放光子的能量  $E_{\text{总}} = P_0 t$  .

光子的总动量  $P = \frac{E_{\text{总}}}{c} = \frac{P_0 t}{c}$  .

根据题意由动量定理得： $60\% \cdot 2P + 40\% \cdot P = Ft$  .

激光束对物体产生的压强： $P = \frac{F}{S}$  . 解得压强为： $P = \frac{1.6P_0}{cS}$  .

### 照猫画虎

2 用光照射某种金属，有光电子从金属表面逸出 . 如果换一种频率更大、强度较弱的光照射该金属，则 ( )

A. 不能发生光电效应

B. 单位时间内逸出的光电子数增大

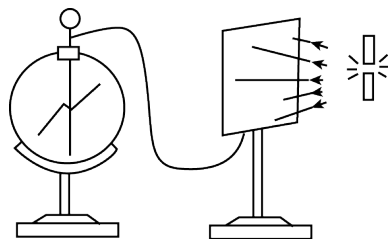
C. 经长时间照射后才发生光电效应

D. 光电子的最大初动能增大

答案 D

解析 略

- 3 如图所示，擦亮的锌板与验电器上的金属球相连，验电器上的铝箔原来是不张开的。现让紫外线照射到锌板，观察到验电器的铝箔张开。下列说法正确的是（ ）

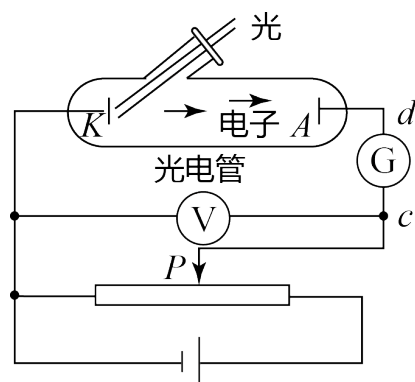


- A. 验电器的铝箔带负电
- B. 此实验可以说明光具有粒子性
- C. 锌板上的电子吸收了光子的能量后，从锌板表面逸出的最大初动能小于光子的能量
- D. 若改用X光（其频率高于紫外线的频率）照射锌板，则观察到验电器的铝箔会张开
- E. 若改用激光器发出高亮度的红光（其频率低于紫外线的频率）照射锌板，则观察到验电器的铝箔一定会张开

答案 BCD

- 解析
- A. 弧光灯照射锌板发生光电效应现象，电子从锌板上飞出，锌板带上正电，铝箔张角变大，说明其原来带正电。故A错误；
  - B. 光电效应说明光具有粒子性，故B正确；
  - C. 锌板上的电子吸收了光子的能量后，根据光电效应方程， $E_{km} = h\nu - W$ ，因此从锌板表面逸出的最大初动能小于光子的能量。故C正确；
  - D. 若改用X光（其频率高于紫外线的频率）照射锌板时，依据光电效应发生条件，一定能使锌板发生光电效应，故其夹角一定会变得更大。故D正确；
  - E. 若改用激光器发出高亮度的红光（其频率低于紫外线的频率）照射锌板，依据光电效应发生条件，则观察到验电器的铝箔不会张开。故E错误。
- 故选BCD。

- 4 用如图所示的光电管研究光电效应的实验中，用某种频率的单色光a照射光电管阴极K，电流计G的指针发生偏转。而用另一频率的单色光b照射光电管阴极K时，电流计G的指针不发生偏转，那么（ ）



- A.  $a$ 光的波长一定大于 $b$ 光的波长
- B. 增加 $b$ 光的强度可能使电流计G的指针发生偏转
- C. 只增加 $a$ 光的强度可使通过电流计G的电流增大
- D. 用 $a$ 光照射光电管阴极K时通过电流计G的电流是由 $d$ 到 $c$

答案 C

**解析** A. 用一定频率的 $a$ 单色照射光电管时，电流表指针会发生偏转，知 $\nu_a > \nu_0$ ， $a$ 光的波长小于 $b$ 光的波长，故A错误；

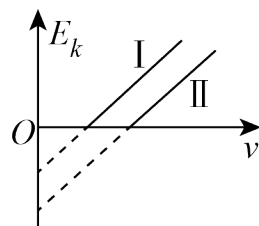
B. 发生光电效应的条件： $\nu > \nu_0$ ，增加 $b$ 光的强度不能使电流计G的指针发生偏转，故B错误；

C. 增加 $a$ 光的强度可使通过电流G的电流增大，故C正确；

D. 发生光电效应时，电子从光电管左端运动到右端，而电流的方向与电子定向移动的方向相反，所以流过电流G的电流方向是 $c$ 流向 $d$ ，故D错误。

故选C。

- 5 甲、乙两种金属发生光电效应时，光电子的最大初动能与入射光频率间的函数关系分别如图中的I、II所示。下列判断正确的是（ ）



- A. I 与II不一定平行
- B. 乙金属的极限频率大

- C. 图像纵轴截距由入射光强度决定  
D. I 与 II 的斜率是定值，与入射光金属材料均无关系

答案 BD

解析 A. 根据光电效应方程  $E_{km} = h\nu - W_0 = h\nu - h\nu_0$  知，图线的斜率表示普朗克常量，根据图线斜率可得出普朗克常量，因此 I 与 II 一定平行，且两斜率是固定值，与入射光和金属材料皆无关系，故 A 错误，D 正确；  
B. 横轴截距表示最大初动能为零时的入射光频率，此时的频率等于金属的极限频率，由图可知乙金属的极限频率大，故 B 正确；  
C. 纵截距对应  $\nu = 0$  的时候，此时纵截距就是逸出功的相反数，根据  $W_0 = h\nu_0$  可求出，与入射光强度无关，故 C 错误。  
故选 BD。

- 6 某半导体激光器发射波长为  $1.5 \times 10^{-6} \text{m}$ ，功率为  $5.0 \times 10^{-3} \text{W}$  的连续激光。已知可见光波长的数量级为  $10^{-7} \text{m}$ ，普朗克常量  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ，该激光器发出的（ ）  
A. 是紫外线  
B. 是红外线  
C. 光子能量约为  $1.3 \times 10^{-18} \text{J}$   
D. 光子数约为每秒  $3.8 \times 10^{16}$  个

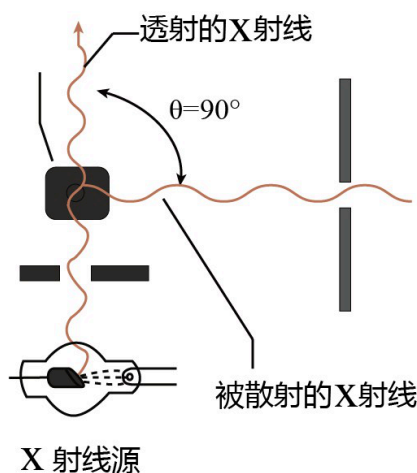
答案 BD

解析 波长大于可见光的是红外线，故答案 A 错误，B 正确。光子能量  $E = \frac{hc}{\lambda} = 1.326 \times 10^{-19} \text{J}$ ，故答案 C 错误，每秒钟发出的光子数  $n = \frac{Pt}{E} = 3.8 \times 10^{16}$ ，D 正确。  
故选 BD。

## 二、康普顿散射

光在介质中与物质微粒相互作用，因而传播方向发生变化，这种现象叫做**光的散射**。1918-1922 年，美国物理学家康普顿在研究石墨对 X 射线的散射时，发现在散射的 X 射线中，除了与入射波长  $\lambda_0$  相同

的成分外，还有波长大于 $\lambda_0$ 的成分，这个现象称为康普顿效应。康普顿的学生，中国留学生吴有训测试了多种物质对X射线的散射，证明了康普顿效应的普遍性。



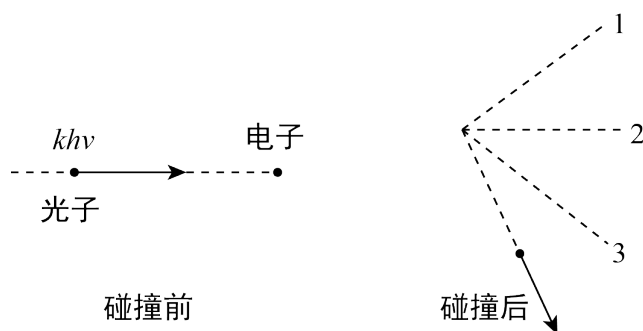
按照经典物理学的理论，由于光是电磁振动的传播，入射光引起物质内部带电微粒的受迫振动，振动着的带电微粒从入射光吸收能量，并向四周辐射，这是散射光。散射光的频率应该等于带电粒子受迫振动的频率，也就是入射光的频率，因而散射光的波长与入射光的波长应该相同，不会出现 $\lambda > \lambda_0$ 的散射光。经典理论与实验事实又一次出现了矛盾。

康普顿用光子的模型成功地解释了这种效应。他的基本思想是： $\alpha$ 射线的光子不仅具有能量，也像其他粒子那样具有动量， $\alpha$ 射线的光子与晶体中的电子碰撞时要遵循能量守恒定律和动量守恒定律，在碰撞中光子将一部分能量传递给电子，光子的能量减少，波长变长。列出两个守恒方程，求解可以得出散射波长的变化值 $\Delta\lambda$ 。理论结果与实验符合得很好。

光电效应和康普顿效应深入地揭示了光的粒子性的一面。前者表明光具有能量，后者表明光子除了能量之外还具有动量。康普顿因此获得了1927年的诺贝尔物理学奖。

### 例题精讲

- 7 康普顿效应证实了光子不仅具有能量，也有动量。图给出了光子与静止电子碰撞后，电子的运动方向，则碰后光子（ ）



- A. 可能沿1方向，且波长变小                      B. 可能沿2方向，且波长变小  
C. 可能沿1方向，且波长变长                      D. 可能沿3方向，且波长变长

答案 C

解析 略。

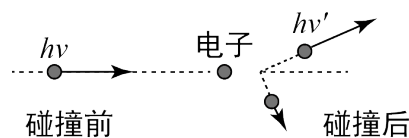
### 照猫画虎

- 8 频率为 $\nu$ 的光子，具有的能量为 $h\nu$ ，动量为 $h\nu/c$ ，将这个光子打在处于静止状态的电子上，光子将偏离原来的运动方向，这种现象称为光的散射。散射后的光子（ ）
- A. 改变原来的运动方向，但频率保持不变  
B. 光子将从电子处获得能量，因而频率将增大  
C. 散射后的光子运动方向将与电子运动方向在一条直线上，但方向相反  
D. 由于电子受到碰撞时会吸收光子的一部分能量，散射后的光子频率低于入射光的频率

答案 D

解析 由于电子的能量增加，根据能量守恒可以知道，光子的能量应当减少，频率降低。  
故选D。

- 9 普顿在研究石墨对X射线的散射时，发现在散射的X射线中，除了与入射波长 $\lambda_0$ 相同的成分外，还有波长大于 $\lambda_0$ 的成分。这个现象称为康普顿效应，如图所示。康普顿用光子模型成功地解释了这种效应。他的基本思想是：X射线的光子不仅具有能量，也像其他粒子那样具有动量，X射线的光子与晶体中的电子碰撞时要遵守能量守恒定律和动量守恒定律。下列分析正确的是（ ）



- A. 散射的光子波长大了，说明该光子的能量增大了
- B. 散射的光子波长大了，说明该光子的能量减小了
- C. 根据能量守恒定律，电子动能增大，光子能量一定减小
- D. 根据动量守恒定律，电子动量发生了改变，说明光子一定有动量

答案 BCD

解析 略

### 三、波粒二象性

#### 1. 光的波粒二象性

荷兰物理学家惠更斯是光的波动说的代表，他认为光是某种振动以波的形式向周围传播。英国科学家托马斯·杨用光的波动理论解释了光的干涉现象，并成功地通过实验实现了两束光的干涉，为光的波动理论提供了实验证据。法国科学家菲涅耳进一步发展了光的波动理论，定量计算了光通过狭窄物体和小缝隙所产生的衍射光强分布，结论与实验结果一致。麦克斯韦提出的光是一种电磁波的学说，将光的波动说发展到了相当完美的地步。

光电效应和康普顿效应并没有否定光的波动性。爱因斯坦提出光子能量与光的频率有关，光子仍有波的特征。康普顿效应涉及散射光的波长变化、光子的动量与光的波长有关等内容，也体现了光的波动性。

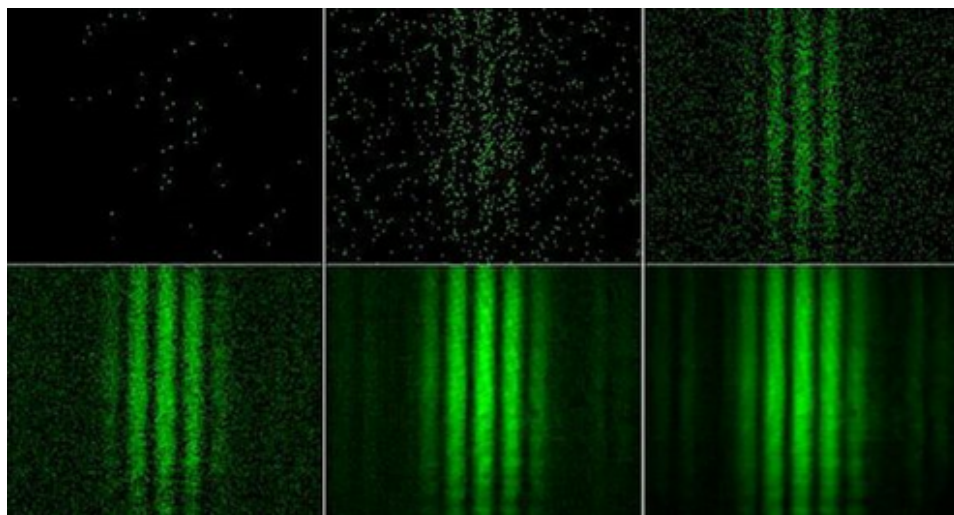
光的波动说和光的粒子说都只能解释光的部分现象，单独应用时均不能解释光的所有现象。事实上，光子既有粒子的特征，又有波的特征，即**光具有波粒二象性**。

#### 2. 概率波

玻恩用概率波很好地解释了光的波粒二象性。通过双缝实验可以解释概率波。下图是用很弱的光做双缝干涉实验得到的图片，随着曝光时间逐渐增长的依次干涉图样。前两幅图中一个一个无分布规律的光点，体现了光的粒子性；经过较长时间的曝光，后几幅图片中出现了明显的明暗条纹，波动性比较明



显。



上述现象可以这样解释：光波是一种概率波，光的强度表示光子出现概率的大小。光子出现在哪个位置，受概率支配。单个光子出现在哪个位置是随机的，因此少量光子形成的光点是无规律的。当有大量光子时，概率大的位置出现的光子多，形成亮条纹；概率小的位置出现的光子少，形成暗条纹。

光的波动性和粒子性不是均衡表现的，有时波动性表现得比较明显，有时粒子性表现得比较明显：

- ①大量光子的集体行为，往往显示出波动性，个别粒子的行为，往往体现出粒子性；
- ②光的波长越长，波动性越明显；波长越短（频率越大），粒子性越明显；
- ③光在传播过程中更多地表现为波动性，在与电子相互作用时更多地表现为粒子性。

#### 例题精讲

10 下列哪一组实验能说明光具有波粒二像性（ ）

- A. 光的双缝干涉和光的单缝衍射现象
- B. 泊松亮斑和光电效应现象
- C. 光的反射和光的薄膜干涉现象
- D. 光电效应和光的直进现象

答案 B

**解析** A. 光的干涉和衍射是波特有的现象，能说明光具有波动性，不能说明粒子性，故A错误；  
 B. 泊松亮斑是由于光的衍射形成的，说明光具有波动性。而光电效应说明光具有粒子性，故B正确；  
 C. 光的薄膜干涉现象说明光具有波动性。而光的反射不能说明具有粒子性，波也能反射，故C错误；

D. 光电效应能说明光具有粒子性，而光的直进现象不能说明波动性，粒子也能直进，故D错误。

故选B。

11 关于光的波粒二象性的理解正确的是（ ）

- A. 大量光子的效果往往表现出粒子性，个别光子的行为往往表现出波动性
- B. 光在传播时是波，而与物质相互作用时就转变成粒子
- C. 高频光是粒子，低频光是波
- D. 波粒二象性是光的根本属性，有时它的波动性显著，有时它的粒子性显著

答案 D

解析 A. 大量光子的效果往往表现出波动性，个别光子的行为往往表现出粒子性，故A错误；  
B. 光在传播时有时看成粒子有时可看成波，故B错误；  
C. 高频光波长短光的粒子性显著，低频光波长长的光波动性显著，故C错误；  
D. 波粒二象性是光的根本属性，有时它的波动性显著，有时它的粒子性显著，故D正确。  
故选D。

### 照猫画虎

12 用很弱的光做单缝衍射实验，改变曝光时间，在胶片上出现的图像如图所示，该实验表明（ ）



时间较短      时间稍长      时间较长

- A. 光的本质是波
- B. 光的本质是粒子
- C. 光的能量在胶片上分布不均匀
- D. 光到达胶片上不同位置的概率相同

答案 C

解析 根据图中判断，曝光时间较短时胶片只有少量的分布不均匀的光点，而曝光时间较长时可看到明显的衍射条纹，说明单个光子表现出粒子性，大量光子表现波动性，故A、B错误；

根据衍射条纹看出，落在中心亮条纹处的光子较多，两边较暗处光子较少，所以光到达胶片上不同位置概率不同，而光子具有能量，所以光的能量在胶片上分布不均匀，故D错误，C正确。

故选C。

13 下列关于光的波粒二象性的论述中，正确的是（ ）

- A. 光子说完全否定了光的电磁说
- B. 光的波粒二象性说的是光与机械波和实物粒子很相似
- C. 大量光子的行为波动性显著，个别光子的行为粒子性显著
- D. 随着电磁波频率的增大其波动性越不显著，粒子性越显著

答案 CD

解析

- A. 光与机械波不相似，机械波没有粒子性，故A错误；
  - B. 光在传播时有时看成粒子有时可看成波，故B错误；
  - C. 大量光子的效果往往表现出波动性，个别光子的行为往往表现出粒子性，故C正确；
  - D. 高频光波长短，光的粒子性显著，低频光波长长，光的波动性显著，故D正确。
- 故选CD。

14 物理学家做了一个有趣的实验：在双缝干涉实验中，在光屏处放上照相底片，若减弱光的强度，使光子只能一个一个地通过狭缝。实验结果表明，如果曝光时间不太长，底片上只出现一些不规则分布的点；如果曝光时间足够长，底片上就出现了规则的干涉条纹。对这个实验结果有下列认识，其中正确的是（ ）

- A. 曝光时间不长时，光的能量太小，底片上的条纹看不清楚，故出现不规则分布的点
- B. 单个光子的运动没有确定的轨迹
- C. 干涉条纹中明亮的部分是光子到达机会较多的地方
- D. 只有大量光子的行为才表现出波动性
- E. 光的波动性不是光子之间的相互作用引起的

答案 BCDE

解析 光的波动性不是光子之间相互作用引起的，而是光子自身固有的性质。  
故选BCDE。

## 四、德布罗意波（选读）

1923年，受到光的波粒二象性的启发，法国物理学家德布罗意提出电子既具有粒子性又具有波动性，并在1924年进一步指出，一切物质都具有波粒二象性。

### 1. 德布罗意公式

质量为 $m$ 、速度为 $v$ 的自由粒子，一方面可以用能量 $E$ 和动量 $p$ 来描述它的粒子性；另一方面可以用频率 $\nu$ 和波长 $\lambda$ 来描述它的波动性，其波粒二象性的关系为

$$E = h\nu$$

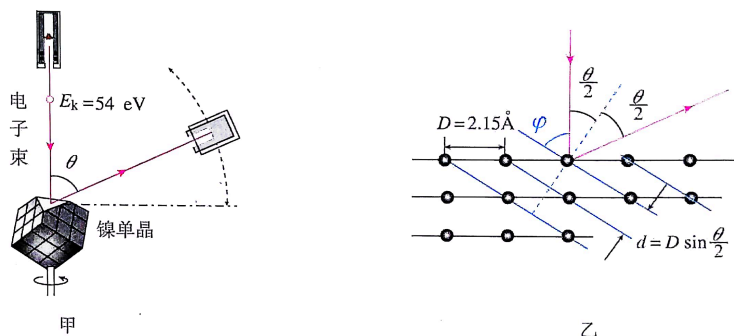
$$p = \frac{h}{\lambda}$$

这种与物质粒子联系的波称为德布罗意波（或物质波）。

### 2. 电子的德布罗意波

通过上面的计算可知，电子的物质波长达到纳米量级，要验证电子的波动性，可以让电子通过纳米量级的小孔，看是否发生衍射现象即可

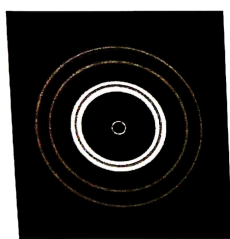
1927年，戴维孙和革末用已知动能 $E_k = 54\text{eV}$ 的电子束替代X射线，在已知原子间隔 $D = 0.215\text{nm}$ 的晶体上做衍射实验，如图所示



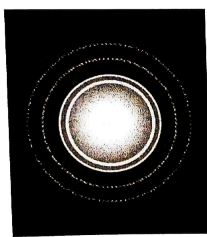
实验结果表明：电子束也能产生衍射现象，并测得第一级极强的衍射角 $\theta = 50^\circ$ 。根据晶体衍射的布拉格公式 $2d \sin \varphi = k\lambda$ ，即 $D \sin \theta = k\lambda$ ，当 $k = 1$ 时，实验结果为： $\lambda = D \sin \theta = 1.65 \times 10^{-10}\text{m}$ ，与德布罗

意波长 $1.67 \times 10^{-10} \text{m}$ 相符。

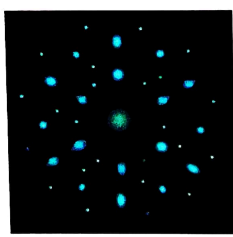
后来，中子衍射、原子和分子束在晶体表面散射所产生的衍射实验，都获得了成功，如图所示。微观粒子具有波粒二象性的理论得到了公认。



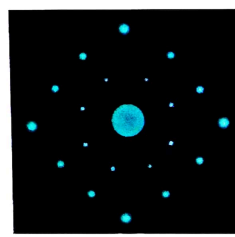
X射线衍射



电子衍射



UO<sub>2</sub>晶体的电子衍射



NaCl晶体的中子衍射

1961年，电子的双缝干涉实验更进一步的证实了电子的物质波本质。

### 3. 海森堡不确定关系

现代量子力学认为，我们可以描述的是粒子在空间各点出现的几率，及其动量在某一范围内的几率。而且对于微观粒子而言，量子力学证明位置与动量无法同时精确测量，测量精确度受到海森堡关系的限制：

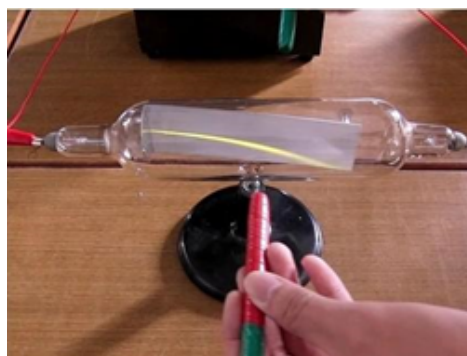
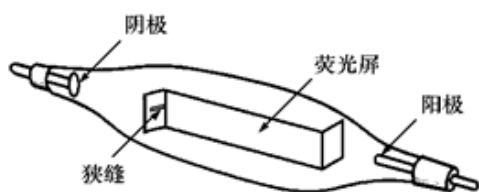
$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}$$

## 五、电子的发现

我们已经学习过物质是由分子组成的，分子是由原子组成的，原子又是由原子核和绕核电子组成的，对于现代人这已经成为了基本的常识。然而这种简单的模型也是历经了20多个世纪，先贤们一步步总结出来的。时至今日，对原子结构的认知又有了新的发展，如更小的粒子夸克和绕核电子存在的真实形式电子云，这些并不在课程的讨论范围内。

### 1. 阴极射线

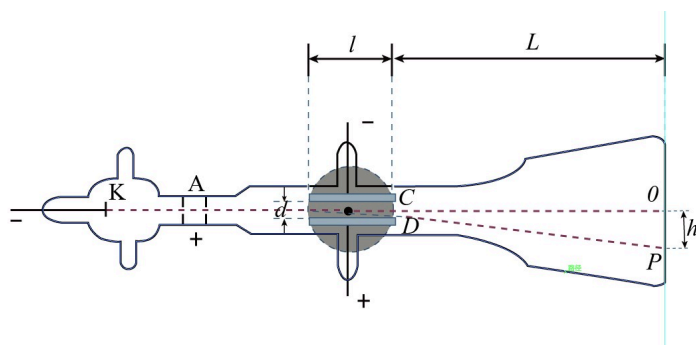
1858年，德国物理学家尤里乌斯·普吕克在进行低压气体放电研究过程中发现，放电管内的空气被抽到相当稀薄的时候，从高压电极的阴极会发出一种射线，使放电管壁产生荧光。这种射线称为**阴极射线**。对于阴极射线的本质是什么，当时的物理学界发生了很大的分歧，有人认为它是一种电磁波，也有人认为它是一种粒子流。



## 2. 电子的发现

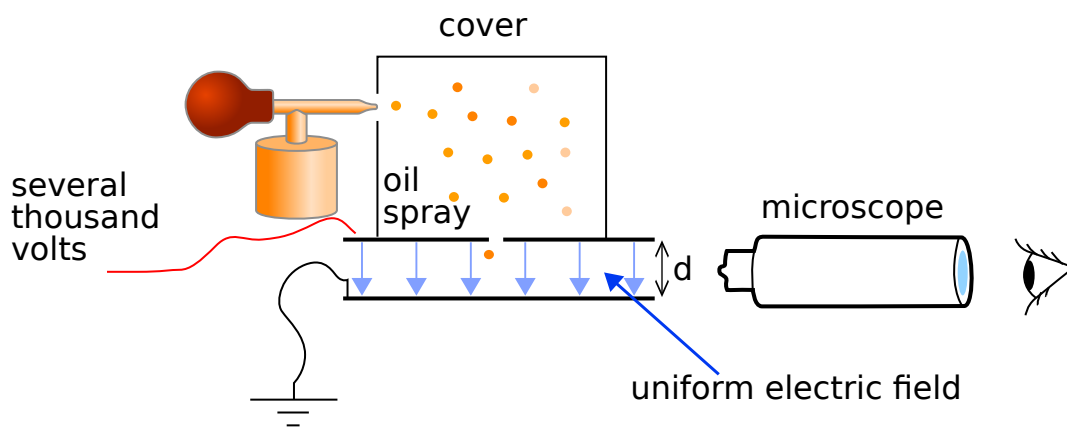


物理学家对阴极射线的本质进行了大量的研究。在1897年，剑桥大学卡文迪许实验室主任J.J.汤姆孙（1856-1940）确认阴极射线的本质是带负电的粒子数，并将其命名为**电子（electron）**。



上图为汤姆孙测量电子荷质比使用的装置，大家可以尝试用学过的电磁场知识再现当时的实验过程。

测量结果表明，阴极射线的比荷是当时已知的氢离子的1700多倍，汤姆孙利用威尔逊云室粗略地测出射线微粒的电荷量与氢离子的大致相同，由此发现电子是一种十分轻的粒子。1909年，密立根通过著名的“油滴实验”更加精确的测得电子的电荷，并获得1923年诺贝尔物理学奖。



例题精讲

- 15 汤姆孙对阴极射线的探究，最终发现了电子，由此被称为“电子之父”。关于电子的说法正确的是（ ）
- A. 任何物质中均有电子  
B. 不同的物质中具有不同的电子  
C. 电子质量是质子质量的1836倍  
D. 电子是一种粒子，是构成物质的基本单元

答案 AD

解析 略

- 16 下列实验现象中，支持阴极射线是带电微粒观点的是（ ）

- A. 阴极射线可以透过薄铝片  
B. 阴极射线通过电场或磁场时，要产生相应偏转  
C. 阴极射线透过镍单晶时，产生衍射现象  
D. 阴极射线轰击荧光物质，发出荧光

答案 B

解析 A. x射线有较强的穿透能力，可以透过薄铝片，不能确定阴极射线，故A错误；  
B. 阴极射线是电子流，电子带负电，因此可通过电场或磁场偏转来确定是否阴极射线。而 $\gamma$ 射线是光子流，故B正确；



C. 只要具有波的特性，就能产生衍射现象，故C错误；

D. 紫外线轰击荧光物质时发出荧光，故D错误。

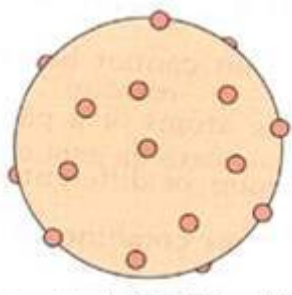
故选B。

## 六、原子结构模型

19世纪末到20世纪初，由于电子的发现，对原子内部结构的研究成为最热门的方向。一般来说，原子是电中性的，然而正电荷和电子的分布仍是一个谜，各国的物理学家都分别提出各自的原子结构模型，其中汤姆孙在1904年提出的“实心带电球模型”影响最为广泛，因此造型又被称为“枣糕模型”。

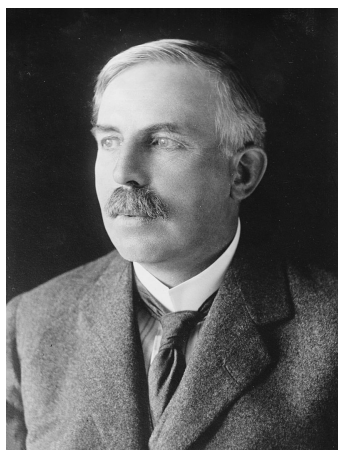
### 1. 汤姆孙模型——“枣糕模型”

定义：原子是一个球体，正电荷均匀分布在整個球内，如同蛋糕，电子镶嵌在球的不同位置，如同一粒粒芝麻，在各自的平衡位置上做简谐振动。

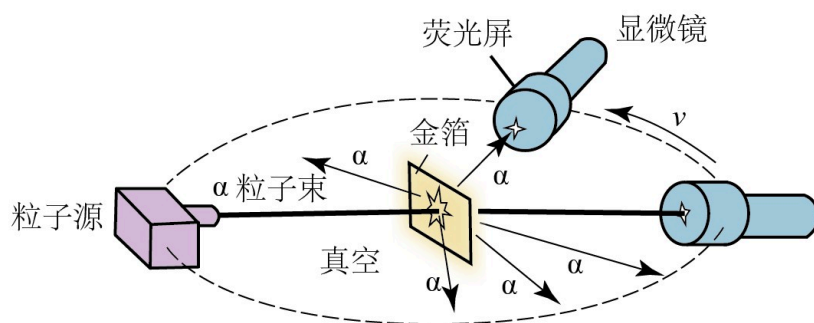


汤姆孙作为电子的发现和命名者，在学术界享有很大威望，他的模型被广泛认可，但同时也有很多人注意到一些不可调和的问题。如德国物理学家勒纳德（1862-1947）在1902年进行的高速电子穿过金属箔的实验，高速电子可以轻松穿透金属中的原子，并不像与实心球体碰撞的结果。

### 2. $\alpha$ 粒子散射实验



$\alpha$ 粒子  
散射实



## 验装置

真正彻底否定汤姆孙模型的是英国物理学卢瑟福（1871-1937）所做的 $\alpha$ 粒子散射实验（盖革-马斯顿实验）。

由粒子源产生的 $\alpha$ 粒子束持续轰击金箔，在不同角度通过显微镜和荧光屏对散射粒子进行记数，得到单位时间散射到屏上的 $\alpha$ 粒子束，从而推测原子内部结构的信息，整个实验装置密封在真空盒中。

## $\alpha$ 粒子

放射性元素衰变产生的粒子束， $\alpha$ 粒子带电量 $2e$ ，质量约为电子的7300倍，现代科学已经知道 $\alpha$ 粒子的实质是 $He$ 原子核。

## 金箔

金原子的延展性非常好，薄金箔的厚度可接近几个原子，因此可近似看成是单层原子稀疏排列的结构。

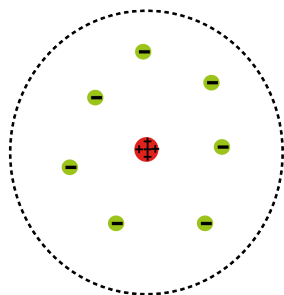
## 汤姆孙模型对实验结果的预测

正电荷在原子中均匀分布，因此原子中的电场分布很弱（电荷的分布越分散，电荷附近电场越弱）， $\alpha$ 粒子质量很大，因此很难被金原子散射。经过精确计算可得， $\alpha$ 粒子从中心入射时不会偏转，从边缘入射时有最大散射角度，仅为 $0.0186^\circ$ 。

## 实际实验结果

- ①大量的 $\alpha$ 粒子几乎没有受到影响，只有少数粒子发生大角度偏振。
- ② $\alpha$ 粒子向各个方向散射，一些粒子发生偏转，一些粒子甚至反弹向粒子源。
- ③入射靠近原子中心的粒子反而发生大角度偏转。

### 3. 卢瑟福核式结构模型

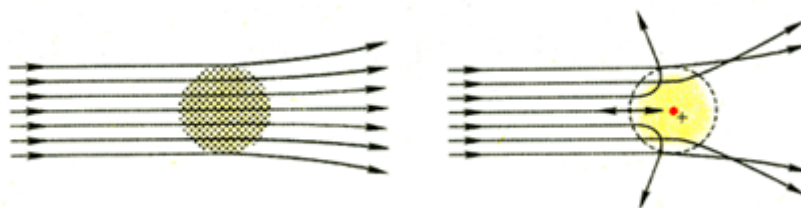


卢瑟福对 $\alpha$ 粒子散射的实验结果进行了分析，于1911年提出了新的原子结构的猜测，即原子的核式结构模型。

- ①原子的中心有一个很小的区域，叫作原子核（nucleus）；
- ②原子的全部正电荷和几乎全部质量都集中在原子核里；
- ③带负电的电子在核外空间绕着原子核旋转。



#### 散射实验的解释



按照这一模型， $\alpha$ 粒子穿过原子时，电子对 $\alpha$ 粒子运动的影响很小，影响 $\alpha$ 粒子运动的主要是带正电的原子核。金属晶格结构中原子间距离远大于原子的大小，因此绝大多数的 $\alpha$ 粒子穿过空隙，受到的库仑斥力很小，运动方向几乎没有改变，只有极少数 $\alpha$ 粒子与核十分接近，受到较大的库仑斥力，发生大角度的偏转乃至反弹。



#### 核式结构的隐患

按照麦克斯韦的经典电磁理论，电子绕核运动时，会辐射一定频率电磁波，因此电子的能量会逐渐减少，运动的轨道半径逐步减小并最终塌缩向原子核。理论计算得出原子的寿命仅有 $10^{-11}s$ ，这显然与事实不符。

这一问题一直困扰着物理学家，直到玻尔提出的量子轨道假说才得到初步解决，最终催生出量子力学这个全新领域。

#### 例题精讲

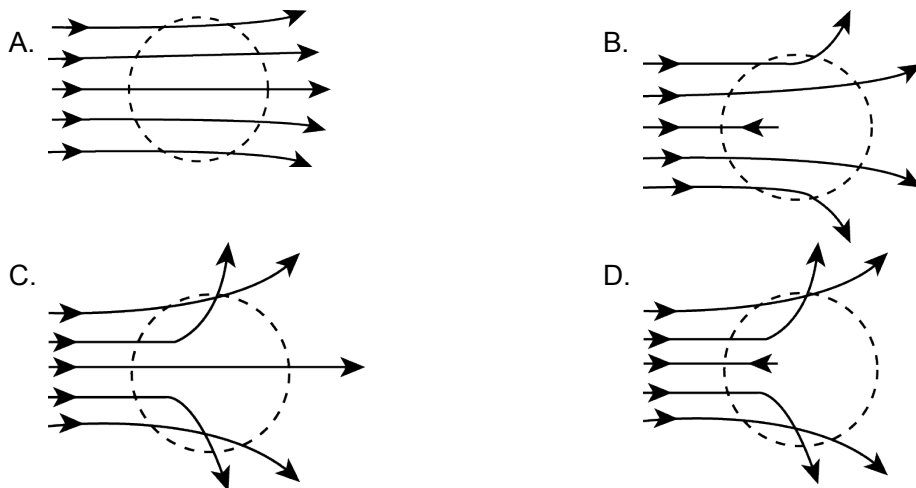
17 对 $\alpha$ 粒子散射实验装置的描述正确的有 ( )

- A. 实验器材有：放射源、金箔、荧光屏、显微镜
- B. 金箔的厚度对实验结果无影响
- C. 如果不用金箔改用铂箔，就不会发生散射现象
- D. 实验装置放在空气中和真空中都可以

答案 A

**解析** 实验所用的金箔的厚度极小，如果金箔的厚度过大， $\alpha$ 粒子穿过金箔时必然受到较大的阻碍作用而影响实验效果，B项错；如果改用铝箔，由于铝核的质量仍远大于 $\alpha$ 粒子的质量，散射现象仍然会发生，C项错；空气的流动以及空气中漂浮的微粒，会对 $\alpha$ 粒子的运动产生影响，故实验装置要放在真空中，D项错；正确选项为A。  
故选A。

18 卢瑟福利用 $\alpha$ 粒子轰击金箔的实验研究原子结构，正确反映实验结果的示意图是（图中虚线表示近原子核区域）( )



答案 D

**解析** 实验结果表明，绝大多数 $\alpha$ 粒子穿过金箔后仍沿原来的方向前进，但有少数 $\alpha$ 粒子发生了较大的偏转，并有极少数 $\alpha$ 粒子的偏转超过 $90^\circ$ ，有的甚至几乎达到 $180^\circ$ 而被反弹回来。  
故选D。

照猫画虎

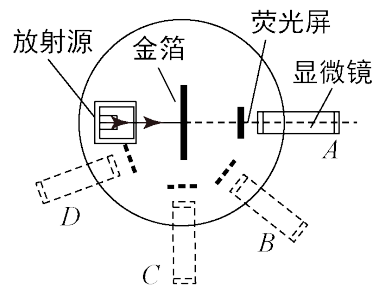
19 下列对原子结构的认识中，错误的是（ ）

- A. 原子中绝大部分是空的，原子核很小
- B. 电子在核外绕核旋转，向心力为库仑力
- C. 原子的全部正电荷都集中在原子核里
- D. 原子核的直径大约为 $10^{-10}\text{m}$

答案 D

**解析** 卢瑟福 $\alpha$ 粒子散射实验的结果否定了汤姆生提出的原子结构模型，提出了关于原子的核式结构学说，并估算出原子核直径的数量级为 $10^{-15}\text{m}$ ，而原子直径的数量级为 $10^{-10}\text{m}$ ，是原子核直径的十万倍，所以原子内部是十分“空旷”的。核外带负电的电子由于受到带正电的原子核的库仑引力而绕核旋转，所以本题应选D。  
故选D。

20 卢瑟福 $\alpha$ 粒子散射实验装置如图所示，荧光屏和显微镜一起转至图中的A、B、C、D四个位置时，相同时间在荧光屏上观察到的闪光次数（ ）



- A. 在A位置最多
- B. 在B位置最多
- C. 在C位置最少
- D. 在D位置观察不到闪光

答案 A

**解析** A. 放在A位置时，相同时间内观察到屏上的闪光次数最多，说明大多数射线基本不偏折，可知金箔原子内部很空旷，故A正确；  
B. 放在B位置时，相同时间内观察到屏上的闪光次数较少，说明较少射线发生偏折，可知原子内部带正电的体积小，故B错误；

C. 放在C位置时，屏上仍能观察一些闪光，但次数极少．说明极少数射线较大偏折，可知原子内部带正电的体积小且质量大．故C错误；

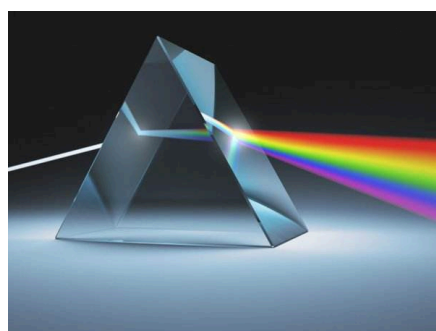
D. 放在D位置时，屏上可以观察到闪光，只不过很少很少．说明很少很少射线发生大角度的偏折．故D错误．

故选A．

## 七、氢原子光谱

### 1. 光的色散

我们在光学部分已经学过，英国物理学家牛顿发现，太阳光经过三棱镜的折射会变为一条彩色光带，这个现象称为**光的色散**。光的色散关系仅和发射光和散射材料有关，因此通过色散来研究复色光成为一种可行的方法。



### 2. 发射光谱和吸收光谱



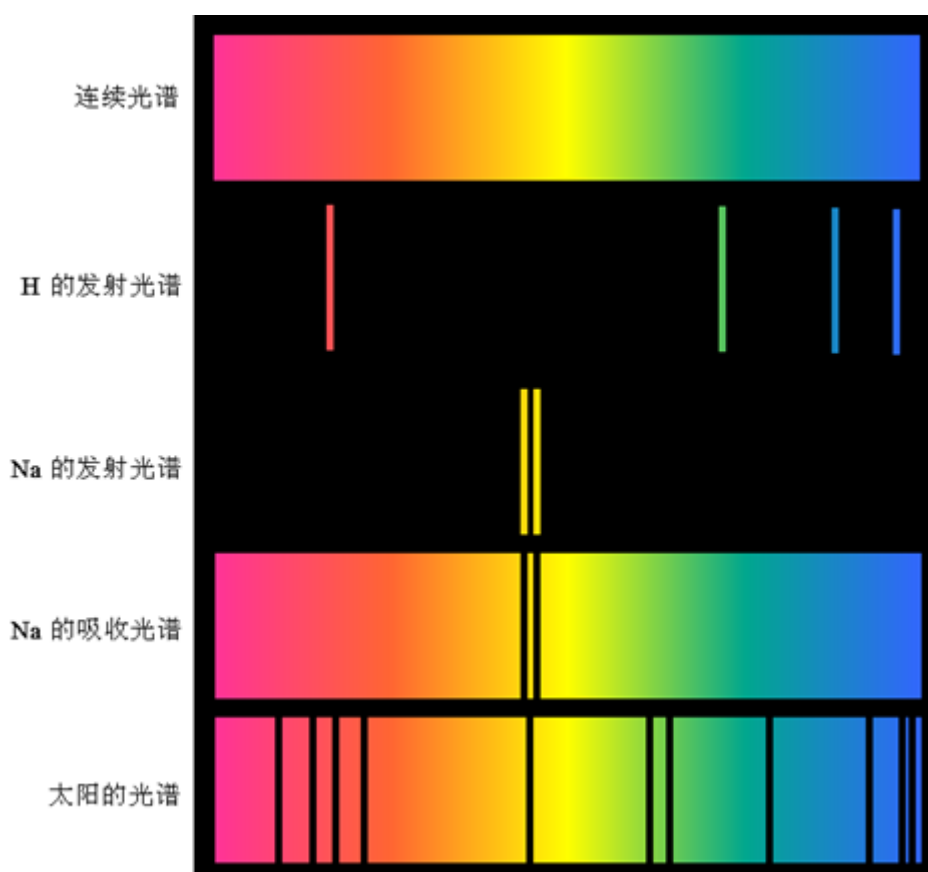
定义

发射光谱：光源发出的光直接通过摄谱仪形成的光谱称为发射光谱。

吸收光谱：连续波长的光通过某些物体后，再进入摄谱仪，一部分光会被物体吸收，在连续谱上留下暗线产生的光谱。

线状光谱：一系列分立的明（暗）线构成的光谱，如钠灯，氢灯的发射光谱。

连续光谱：光谱连在一起形成光带，通常叫作连续光谱或带状光谱，如白炽灯的发射光谱。



## 性质

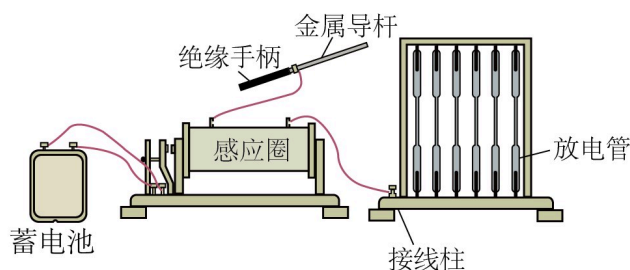
人们发现不同光源产生的吸收谱和发射谱是不同的，如日光的发射谱是连续的光谱，钠灯的发射谱则是分立的线状谱。实验上发现，光源的发射谱和吸收谱永远是互补的（这点用之前学到的基尔霍夫热辐射定律容易解释）。

各种原子的发射光谱都是线状谱，说明原子只能发出几种特定频率的光。不同原子的亮线位置不同，说明不同原子的发光频率不同，因此这些亮线就像原子的指纹一样标识了原子的身份，这些亮线称为原子的**特征谱线**。

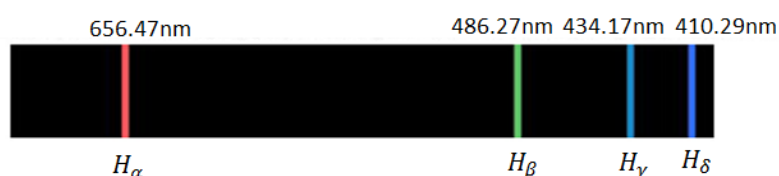
## 3. 氢原子光谱

光谱分析出现以后，很多物理学家试图找出原子光谱的规律。而氢气是分子结构最简单的气体，所以很多物理学家都开始研究氢光谱的规律性。





如图所示，在放电管（通常由玻璃管构成）中存放稀薄的氢气，外加强电场，这些氢气分子在强电场的作用下会电离，称为自由移动的正负电荷，于是气体变成导体，导电时会发光，进而得到氢光谱。



1885年，巴耳末（J.J.Balmer）首先将观测到的4条氢原子光谱线的波长用经验公式表示为

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

这个公式称为**巴耳末公式**，其中 $B$ 为恒量，其值为 $364.57nm$ ， $n$ 为一系列常数。当 $n = 3, 4, 5, 6$ 时，上式分别给出4条氢光谱线 $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\delta$ 的波长值，如图所示，巴耳末公式给出的一系列谱线叫作巴耳末线系，简称巴耳末系。

尽管巴耳末给出光谱的经验公式，却无法通过电磁学理论解释这个现象。根据麦克斯韦的经典电磁理论，电子做变速运动会向外辐射电磁波，辐射电磁波的频率等于电子绕核运动的频率。随着运行轨道半径的变化，电子的周期在连续地发生变化，所以辐射的电磁波应该是包含各种波长的光，即原子光谱应该是连续的，而非我们看到的线状谱。这个谜题直到1913年才被丹麦物理学家玻尔解开。

## 八、玻尔的原子模型

### 1. 玻尔模型

在解释原子的稳定性和氢原子光谱时，麦克斯韦的电磁理论已经行不通了，此时新的理论正在酝酿，这就是玻尔理论。1913年，玻尔（N.Bohr）在普朗克关于黑体辐射的量子论、爱因斯坦关于光电效应的光子学说以及巴耳末公式等的启发下，把微观世界物理量取分立值的观念应用到原子系统，提出了自己的原子结构模型，很好地解释了氢原子光谱。其理论包括以下几点内容：

（1）**定态假设** 原子系统只能处在一系列不连续的能量状态，即能量量子化。

电子的轨道半径只能取某些分立的数值，电子在这些轨道上绕核的转动是稳定的，不产生电磁辐射。电子处在不同的轨道上运动时，原子处于不同的状态，在不同的状态下原子具有的能量也不同。这些状态叫作原子系统的稳定状态，简称定态，相应的能量分别为 $E_1, E_2, E_3, \dots$ ，这些量子化的能量值，叫做能级（ $E_n$ ）。

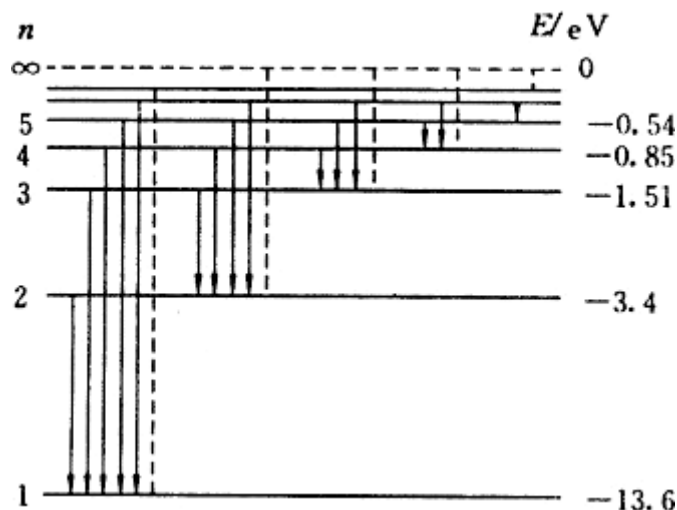
## （2）跃迁假设

当原子从一个能量为 $E_n$ 的定态跃迁到能量为 $E_k$ 的定态时，就要发射或吸收一个频率为 $\nu_{nk}$ 的光子，其中 $\nu_{nk}$ 满足  $h\nu_{nk} = |E_n - E_k|$ （公式中 $h$ 为普朗克常数）。当 $E_n > E_k$ 时，发射光子；当 $E_n < E_k$ 时，吸收光子。

## 2. 氢原子能级图

（1）氢原子的第 $n$ 个稳定轨道半径满足  $r_n = n^2 a_0$ ，其中 $n$ 是正整数，当 $n = 1$ 时， $r_1 = 0.523 \times 10^{-10} m$ ，为氢原子核外电子的最小轨道半径，成为波尔半径；

（2）氢原子系统的能量等于原子核与核外电子这一带电系统的静电势能和电子的动能之和。电子在第 $n$ 个稳定轨道上时氢原子系统的能量为  $E_n = \frac{E_1}{n^2} = -\frac{13.6}{n^2} eV (n = 2, 3, \dots)$ ，能量是量子化的，能级图如图所示。



①当 $n = 1$ 时， $E_1 = -13.6 eV$ ，这是氢原子的最低能级，称为基态；

②当 $n > 1$ 时， $E_n > E_1$ ，并随着量子数 $n$ 的增大而增大，这种状态称为激发态；

③当 $n \rightarrow \infty$ 时， $E_n \rightarrow 0$ 。当 $E > 0$ 时，电子已经脱离原子系统，这个过程叫作电离，电离过程需要的能量叫作电离能，显然，处于基态的氢原子的电离能为 $13.6 eV$ 。这与用实验方法测得的氢原子电离能符合得很好。原子处于电离状态，能量可连续变化。

### 3. 波尔理论的局限性

玻尔原子理论成功地解释了氢原子和类氢原子（如 $\text{He}^+$ 、 $\text{Li}^{++}$ 、 $\text{Be}^{+++}$ 等只剩一个电子的离子结构）的光谱，从理论上算出了里德伯常量，但是也有一些缺陷。对于解释具有两个以上电子的比较复杂的原子光谱时就遇到了困难，理论推导出来的结论与实验事实出入很大。此外，玻尔理论对谱线的强度、宽度也无能为力，理论也无法说明原子是如何组成分子、如何构成液体和固体的。玻尔理论还存在逻辑上的缺点，它把微观粒子看成是遵守经典力学的质点，同时，又给予它们量子化的观念，不足之处在于仍保留了过多的经典物理理论。到20世纪20年代，薛定谔等物理学家在量子观念的基础上建立了量子力学，彻底摒弃了轨道概念，而代之以概率和电子云的概念，才很好地解决了这一问题。

#### 例题精讲

- 21 许多情况下光是由原子内部电子的运动产生的，因此光谱的研究是探索原子结构的一条重要途径。关于氢原子光谱、氢原子能级和和氢原子核外电子的运动，下列说法中正确的是（ ）
- A. 氢原子巴尔末线系谱线是包含从红外到紫外的线状谱
  - B. 氢原子光谱的不连续性，表明了氢原子的能级是不连续的
  - C. 氢原子处于不同能级时，电子在各处的概率是相同的
  - D. 氢光谱管内气体导电发光是热辐射现象

答案 B

解析 方法一：A．氢原子巴尔末线系谱线是包含可见光到紫外线的线状谱，不包含红外线，故A错误；  
B．氢原子光谱的不连续性，表明了氢原子的能级是不连续的，故B正确；  
C．氢原子处于不同能级时，电子在各处的概率是不同的，电子云就是用疏密不同的点表示电子在各个位置出现的概率的，故C错误；  
D．氢光谱管内气体导电发光是由于大量氢原子从较高的激发态向较低的激发态或基态跃迁，从而辐射不同频率的光子，故D错误。  
故选B。

方法二：A．巴尔末公式描述的光谱就是氢原子从 $n$ 能级向2能级跃迁放出的，从能量计算可以得出，这一段也恰好正好是可见光区域。故A错误。

- B. 根据玻尔原子模型，结合氢原子光谱，则表明氢原子的能量是不连续的．故B正确；
- C. 处于不同能级时，核外电子在各处出现的概率不同．故C错误；
- D. 由高能级向低能级跃迁，氢原子向外辐射能量，不是热辐射现象．故D错误；
- 故选B．

22 下面关于玻尔原子理论的观点解释中，不正确的是（ ）

- A. 原子只能处在一系列不连续的状态中，每个状态都对应一定的能量
- B. 原子中，只要能量状态不改变，就不会向外辐射能量
- C. 原子从一种定态跃迁到另一种定态时，一定要辐射出一定频率的光子
- D. 原子的每一个能量状态都对应有一个电子轨道，并且这些轨道是不连续的

答案 C

解析 略

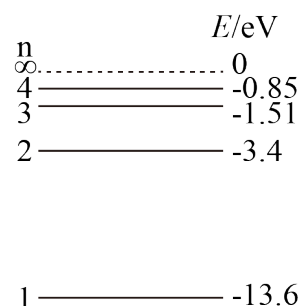
23 现用光子能量介于 $11.0\text{eV} \sim 12.5\text{eV}$ 范围内的光去照射一大群处于基态的氢原子，下列说法正确的是（ ）

- A. 照射光中可能被基态氢原子吸收的光子只有1种
- B. 照射光中可能被基态氢原子吸收的光子有2种
- C. 激发后的氢原子发射不同能量的光子只有1种
- D. 激发后的氢原子发射不同能量的光子可能有3种

答案 AD

解析 略

24 1995年科学家“制成”了反氢原子，它是由一个反质子和一个围绕它运动的正电子组成．反质子和质子有相同的质量，带有等量异种电荷．反氢原子和氢原子有相同的能级分布，氢原子能级如图所示．下列说法中正确的是（ ）



- A. 反氢原子光谱与氢原子光谱不相同
- B. 基态反氢原子的电离能是13.6eV
- C. 基态反氢原子能吸收11eV的光子发生跃迁
- D. 在反氢原子谱线中，从 $n = 2$ 能级跃迁到基态辐射光子的波长最长

答案 B

解析 A. 原子和氢原子有相同的能级分布，所以反氢原子光谱与氢原子光谱相同，故A错误；

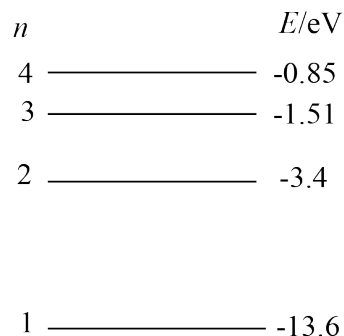
B. 处于基态的氢原子的电离能是13.6eV，具有大于等于13.6eV能量的光子可以使氢原子电离，故B正确；

C. 基态的反氢原子吸收11eV光子，能量为 $-13.6\text{eV} + 11\text{eV} = -2.6\text{eV}$ ，不能发生跃迁，所以该光子不能被吸收，故C错误；

D. 在反氢原子谱线中，从 $n = 2$ 能级跃迁到基态辐射光子能量很大，频率很大，波长很小，故D错误。

故选B。

25 如图所示为氢原子最低的四个能级，当氢原子在这些能级间跃迁时，有可能发出 \_\_\_\_\_ 种频率的光子，在 $n =$  \_\_\_\_\_ 和 $n =$  \_\_\_\_\_ 两个能级间跃迁时发出光子的波长最长，是 \_\_\_\_\_ nm。



答案

- 1 . 6
- 2 . 4
- 3 . 3
- 4 . 1882

解析 略

照猫画虎

26 下列对于氢原子光谱实验规律的认识中，正确的是（ ）

- A. 因为氢原子核外只有一个电子，所以氢原子只能产生一种波长的光
- B. 氢原子产生的光谱是一系列波长不连续的谱线
- C. 氢原子产生的光谱是一系列亮度不连续的谱线
- D. 氢原子产生的光的波长大小与氢气放电管放电强弱有关

答案 B

解析 略

27 玻尔的原子核模型解释原子的下列问题，和卢瑟福的核式结构学说观点不同的是（ ）

- A. 电子绕核运动的向心力，就是电子与核间的静电引力
- B. 电子只能在一些不连续的轨道上运动
- C. 电子在不同轨道上运动的能量不同
- D. 电子在不同轨道上运动时，静电引力不同

答案 B

解析 选项A、C、D的内容卢瑟福的核式结构学说也有提及，而玻尔在他的基础上引入了量子学说，提出了电子位于不连续的轨道上的假说。  
故选B。

- 28 已知氢原子的基态能量为  $E_1$ ，激发态能量  $E_n = E_1/n^2$ ，其中  $n = 2, 3, \dots$ 。用  $h$  表示普朗克常量， $c$  表示真空中的光速。能使氢原子从第一激发态电离的光子的最大波长为 ( )

A.  $-\frac{4hc}{3E_1}$       B.  $-\frac{2hc}{E_1}$       C.  $-\frac{4hc}{E_1}$       D.  $-\frac{9hc}{E_1}$

答案 C

解析 原子从  $n = 2$  跃迁到  $+\infty$  所以  $\frac{hc}{\lambda} = E_\infty - E_2 = -\frac{E_1}{4}$   
故： $\lambda = -\frac{4hc}{E_1}$  选C

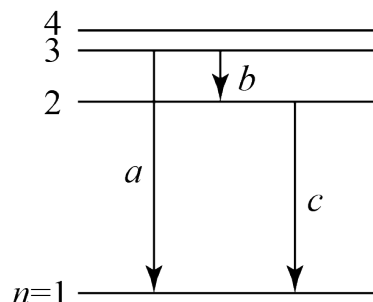
- 29 氢原子处于基态时，原子的能级为  $E_1 = -13.6\text{eV}$ ，普朗克常量  $h = 6.63 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}$ ，当氢原子在  $n = 4$  的激发态时，问：

- (1) 要使氢原子电离，入射光子的最小能量是多少？
- (2) 能放出的光子的最大能量是多少？

答案 (1)  $0.85\text{eV}$   
(2)  $12.75\text{eV}$

解析 (1) 由氢原子的能级公式得  $E_4 = \frac{1}{4^2}E_1 = -0.85\text{eV}$ ，  
故要使处在  $n = 4$  能级的氢原子电离，入射光子的最小能量为  $0.85\text{eV}$ 。  
(2) 由  $h\nu = E_m - E_n$  可知  
 $h\nu = E_4 - E_1 = 12.75\text{eV}$ ，  
即处于  $n = 4$  的氢原子跃迁到  $n = 1$  时放出光子的能量最大为  $12.75\text{eV}$ 。

- 30 某原子的部分能级图如图所示，大量处于某激发态的该原子向低能级跃迁时，发出三种波长的光如图所示，它们的波长分别为  $\lambda_a$ 、 $\lambda_b$ 、 $\lambda_c$ 。下列说法正确的是 ( )





- A. 在同种均匀介质中传播时， $b$ 光的速度最大
- B. 用同一套装置做双缝干涉实验， $a$ 光相邻亮纹的间距最大
- C. 若 $b$ 光照射某种金属能发生光电效应， $c$ 光照射该金属也能发生光电效应
- D. 三种光的波长关系为  $\frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{\lambda_a} + \frac{1}{\lambda_b}$

答案 AC

**解析** 由能级图可知， $b$ 光的频率最小，在介质中的折射率最小，根据  $v = \frac{c}{n}$  可知，在同种均匀介质中传播时， $b$ 光的速度最大，选项A正确； $a$ 光的频率最大，则波长最小，根据  $\Delta x = \frac{l}{d} \lambda$  可知，用同一套装置做双缝干涉实验， $a$ 光相邻亮纹的间距最小，选项B错误； $b$ 光的频率小于 $c$ 光，则若 $b$ 光照射某种金属能发生光电效应， $c$ 光照射该金属也能发生光电效应，选项C正确；根据波尔理论可知： $\frac{hc}{\lambda_a} = \frac{hc}{\lambda_b} + \frac{hc}{\lambda_c}$ ，即  $\frac{1}{\lambda_a} = \frac{1}{\lambda_b} + \frac{1}{\lambda_c}$ ，选项D错误。  
故选AC。

## 九、放射性元素的衰变

自1896年法国物理学家A.H.贝可勒尔发现铀的放射性后，科学家们就利用测量放射性的方法，对所有的元素进行了普查。在研究放射性的同时，许多新的元素也被发现，其中最著名的就是居里夫妇通过沥青提炼镭的故事。下面将介绍放射性的类型与本质。

### 1. 原子核的衰变

放射性的本质是原子核自发地放出 $\alpha$ 粒子或 $\beta$ 粒子，由于核电荷数变了，它就变成了另一种原子核。我们把这种变化称为原子核的衰变，衰变可分为两类。

$\alpha$ 衰变：放出 $\alpha$ 粒子；

例如： ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$ ；

规律： ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4\text{He}$

$\beta$ 衰变：放出 $\beta$ 粒子（高速电子）

例如： ${}_{90}^{234}\text{Th} \rightarrow {}_{91}^{234}\text{Pa} + {}_{-1}^0e$ ；

规律： ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_{-1}^0e$

衰变： $\alpha$ 、 $\beta$ 衰变生成的新核通常处于较高能级，跃迁到低能级时辐射出的光子。

### 2. 衰变的原理

### (1) 核力

原子核中的核子之间必须有一个强大的引力才能将它们结合在一起，否则质子间的库仑力会使原子核裂开。而这个强大的引力不可能是万有引力，因为计算结果表明库仑力比万有引力大 $10^4$ 数量级。

将核子维系在一起的相互作用力是一种强相互作用力，称为核力。

核力有以下几个特征：

① 在核的限度内，核力比库仑力大得多。

② 核力的力程很短，约 $(1.3 \sim 1.5) \times 10^{-15} \text{m}$ 。当两核子中心间距大于核子本身的限度时，核力几乎完全消失。（核力在距离大于 $0.8 \times 10^{-15} \text{m}$ 时表现为吸引力，在距离小于时表现为斥力）

③ 核力与电荷无关，质子与质子、质子与中子、中子与中子之间的核力是相等的。

### (2) 衰变的本质

原子核内的两个质子和中子作为一个整体，结合比较紧密，有时候会作为一个整体从原子核内抛射出来，形成 $\alpha$ 射线，即 $\alpha$ 衰变；

核内的一个中子可以转化为一个质子，同时放出一个电子，释放出电子形成 $\beta$ 射线，即 $\beta$ 衰变。

放射性元素发生 $\alpha$ 、 $\beta$ 衰变时，产生的新核往往处于激发状态，这时它要向低能量状态跃迁，辐射出光子，产生 $\gamma$ 射线。

### 例题精讲

31 对天然放射现象，下列说法中正确的是（ ）

- A.  $\alpha$ 粒子带正电，所以 $\alpha$ 射线一定是从原子核中射出的
- B.  $\beta$ 粒子带负电，所以 $\beta$ 射线有可能是核外电子
- C.  $\gamma$ 射线是光子流，所 $\gamma$ 射线有可能是原子发光产生的
- D.  $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线、 $\gamma$ 射线都是从原子核内部释放出来的

答案 AD

解析  $\alpha$ 衰变的实质是原子核中的两个质子和两个中子结合在一起形成一个氦核发射出来的； $\beta$ 衰变的实质是原子核内的一个中子变成一个质子和电子，然后释放出电子； $\gamma$ 射线是伴随 $\alpha$ 衰变和 $\beta$ 衰变产生的，所以这三种射线都是从原子核内部释放出来的。

故选AD。

D. 有质子  $(n-1)$  个

故选BD.

D.  ${}_{86}^{222}\text{Rn} \rightarrow {}_{85}^{222}\text{At} + {}_1^2\text{H}$

学而思·自主招生研究中心

34 关于天然放射现象，以下叙述正确的是（ ）

- A. 在 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 这三种射线中， $\gamma$ 射线的穿透能力最强， $\alpha$ 射线的电离能力最强
- B.  $\beta$ 衰变所释放的电子是原子核内的中子转变为质子时产生的
- C.  $\gamma$ 射线会使种子的遗传基因发生变异，从而培育出新的优良品种
- D. 铀核( ${}_{92}^{238}\text{U}$ )衰变为铅核( ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ )的过程中，要经过8次 $\alpha$ 衰变和10次 $\beta$ 衰变

答案 ABC

解析 A. 在 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 这三种射线中， $\gamma$ 射线的穿透能力最强， $\alpha$ 射线的电离能力最强，故A正确；  
 B.  $\beta$ 衰变所释放的电子是原子核内的中子转变为质子和电子时产生的，故B正确；  
 C.  $\gamma$ 射线会使种子的遗传基因发生变异，从而培育出新的优良品种，故C正确；  
 D. 铀核( ${}_{92}^{238}\text{U}$ )衰变为铅核( ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ )的过程中，电荷数少10，质量数少32，设经过 $n$ 次 $\alpha$ 衰变， $m$ 次 $\beta$ 衰变，有： $4n = 32$ ， $2n - m = 10$ ，解得 $n = 8$ ， $m = 6$ ，故D错误。  
 故选ABC。

35 下列关于物质结构的叙述中正确的是（ ）

- A. 电子的发现表明了原子内部是有复杂结构的
- B. 质子的发现表明了原子核都是由质子组成的
- C. 天然放射性现象的发现表明了原子内部是有复杂结构的
- D.  $\beta$ 射线实际上是原子核外电子高速运动形成的

答案 A

解析 A项：汤姆生发现电子，知道原子还可以再分，提出了原子的“枣糕式”模型，说明原子内部具有复杂结构的，故A正确；  
 B项：质子的发现表明了原子核具有复杂结构的，故B错误；  
 C项：天然放射性现象的发现表明了原子核内部是有复杂结构的，故C错误；  
 D项： $\beta$ 射线实际上是原子核内的一个中子转换成一个质子和一个电子形成的，故D错误。  
 故选A。

36 一瓶装有放射性同位素  $A$  的溶液，已知该同位素的半衰期为 2 天，衰变后的物质不具有放射性。现在先测得该溶液中有约  $8 \times 10^{22}$  个同位素  $A$  原子，再将该溶液倒入水库，设 8 天后溶液均匀分布到水库的水中，这时从水库中取出  $1\text{cm}^3$  的水，测得剩余约  $2 \times 10^9$  个同位素  $A$  原子，则该水库中现存的水量约为 ( )

- A.  $1.25 \times 10^3 \text{m}^3$       B.  $1.25 \times 10^6 \text{m}^3$       C.  $2.5 \times 10^6 \text{m}^3$       D.  $5 \times 10^8 \text{m}^3$

答案 C

解析 设 8 天后溶液均匀分布到水库的水中，这时从水库中取出  $1\text{cm}^3$  的水，测得剩余约  $2 \times 10^9$  个同位素  $A$  原子，

已知该同位素的半衰期为 2 天，所以 8 天前  $1\text{cm}^3$  的水中有约  $32 \times 10^9$  个同位素  $A$  原子，

8 天前该水库中现存的水量中有约  $8 \times 10^{22}$  个同位素  $A$  原子，

所以该水库中现存的水量约为  $V = \frac{8 \times 10^{22}}{32 \times 10^9} \times 10^{-6} \text{m}^3 = 2.5 \times 10^6 \text{m}^3$  .

故选 C .