

## 14 自招综合训练-原子原子核

### 1. 引言

自古以来，人们就在探索一个问题：千姿百态的世界，到底是由什么构成的？早在2400多年前，人们就开始考虑物质内部构造的基本问题。

公元前300多年，庄子在《庄子天下篇》中写道：“一尺之棰，日取其半，万世不竭。”这种论断，朴素地提出了物质无限可分思想。

同时期的古希腊，著名的哲学家德谟克利特提出一种原子学说。他认为：世界和宇宙中的万物，都是由看不见又不可分割的微小粒子构成的，他把这些粒子叫做“原子”。德谟克利特还认为，原子不可毁灭；原子总是在运动，世界上出现的万事万物都是这种运动的结果。以上这些看来很完善的论述，使德谟克利特树立了一种较完善的学说。

令人遗憾的是，德谟克利特的学生、在当时学术界很有影响的亚里士多德拒不承认老师的原子理论，却极力推崇四元素论。四元素论认为，一切物质都由土、水、空气和火组成。不仅古希腊存在着元素说，在古代中国也有着类似的五元素说。五元素说认为：金、木、水、火、土这五种最基本的元素组成了世界。在这种学说的影响下，“炼金术”和“炼丹术”开始兴旺起来。

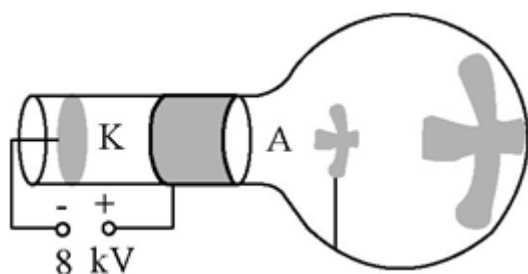
直到19世纪初，英国物理学家和化学家道尔顿才用实验方法检验了古人的原子论观点，提出了现代的原子学说。他认为，原子的基本性质是它们的不变性和不可分割性，任何物质都是由非常微小的、不可再分的原子组成的；同一物质的所有原子，各方面的性质都相同，不同物质的原子的重量不同。

那么原子是不是组成物质的最终极限，原子不可再分了吗？这一模块中，我们将研究原子的组成以及原子核的相关知识。

### 一、电子的发现与枣糕模型

#### 1. 知识点睛

如图，真空玻璃管中K是金属板制成的阴极，A是金属环制成的阳极；把它们分别连接在感应圈的负极和正极上。管中十字状物体是一个金属片。接通电源时，感应圈产生的近万伏的高电压加在两个电极之间，可以看到玻璃壁上淡淡的荧光及管中物体在玻璃壁上的影。1876年德国物理学家戈德斯坦认为管壁上的荧光是由于玻璃受到阴极发出的某种射线的撞击而引起的，并把这种射线命名为阴极射线。



19世纪，对阴极射线的本质的认识有两种观点。一种观点认为阴极射线是一种电磁辐射，另一种观点认为阴极射线是带电微粒。

## 1. 电子的发现

英国物理学家汤姆孙认为阴极射线是带电粒子流。1897年，他根据阴极射线在电场和磁场中的偏转情况断定，阴极射线的本质是带负电的粒子流，并求出了这种粒子的比荷是氢离子比荷的近两千倍。后来，汤姆孙直接测到了阴极射线的电荷量，尽管测量不太准确，但是足以证明这种粒子的电荷量的大小和氢离子大致相同，这说明这种粒子的质量比氢离子小的多，是比原子更小的微粒。

汤姆孙用不同材料的阴极做实验发现，所得比荷的数值都是相同的。这说明不同物质都能发射这种带电粒子，它是构成各种物质的共有成分。后来组成阴极射线的粒子被称为电子。

发现电子以后，汤姆孙又进一步研究了许多新现象，如光电效应、热离子发射效应和 $\beta$ 射线等。他发现，不论阴极射线、 $\beta$ 射线、光电流还是热离子流，它们都包含电子。**由此可见，电子是原子的组成部分，是比原子更基本的物质单元。**

## 2. 阅读材料

电子电荷的精确测定是由密立根通过著名的“油滴实验”做出的。

密立根油滴实验是美国物理学家密立根所做的测定电子电荷的实验。1907~1913年密立根用在电场和重力场中运动的带电油滴进行实验，发现所有油滴所带的电量均是某一最小电荷的整数倍，该最小电荷值就是电子电荷。

用喷雾器将油滴喷入电容器两块水平的平行电极板之间时，油滴经喷射后，一般都是带电的。在不加电场的情况下，小油滴受重力作用而降落，当重力与空气的浮力和粘滞阻力平衡时，它便做匀速下降，它们之间的关系是： $mg = F_1 + B$ ，式中： $mg$ 为油滴受到的重力， $F_1$ 为空气的粘滞阻力， $B$ 为空气的浮力。令 $\sigma$ 、

$\rho$

分别表示油

滴和空气的密度； $a$ 为油滴的半径； $\eta$ 为空气的粘滞系数； $v_g$ 为油滴匀速下降的速度。因此油滴受到的重

力为  $mg = \frac{4}{3}\pi a^3 \sigma g$ ，空气的浮力为  $\frac{4}{3}\pi a^3 \rho g$ ，空气的粘滞阻力为  $F_1 = 6\pi\eta a v_g$ （流体力学的斯托克斯定律）。于是(1)式变为： $\frac{4}{3}\pi a^3 \sigma g = 6\pi\eta a v_g + \frac{4}{3}\pi a^3 \rho g$ ，可得出油滴的半径  $a = 3\sqrt{\frac{\eta v_g}{2g(\sigma - \rho)}}$  (2)。

当平行电极板间加上电场时，设油滴所带电量为  $q$ ， $E$  为平行极板间的电场强度， $U$  为两极板间的电势差， $d$  为两板间的距离，则它所受到的静电力为  $qE$ ， $E = \frac{U}{d}$ 。适当选择电势差  $U$  的大小和方向，使油滴受到电场的作用向上运动，以  $v_E$  表示上升的速度，当油滴匀速上升时，可得到如下关系式：

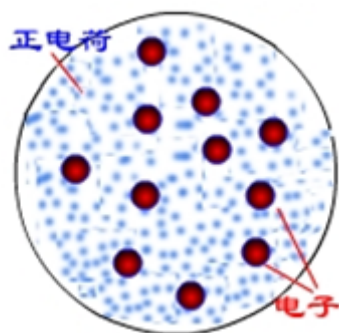
$F_2 + mg = qE + B$  (3)，式中  $F_2$  为油滴上升速度为  $v_E$  时空气的粘滞阻力， $F_2 = 6\pi\eta a v_E$ ，由(1)、(3)式得到油滴所带电量  $q = \frac{F_1 + F_2}{E} = \frac{6\pi\eta a d (v_g + v_E)}{U}$  (4)。由测定的油滴不加电场时下降的速度  $v_g$  和加上电场时油滴匀速上升的速度  $v_E$ ，带入(2)、(4)式就可以求出油滴所带的电量  $q$ 。注意上述公式的推导过程中都是对同一个油滴而言的，因此对同一个油滴，要在实验中测出一组  $v_g$ 、 $v_E$  的数据。

密立根曾用上述方法对许多不同的油滴进行测量，结果表明，油滴所带的电量总是某一个最小固定值的整数倍。

密立根油滴实验60年后，史学家发现，密立根一共向外公布了58次观测数据，而他本人一共做过140次观测。他在实验中通过预先估测，去掉了那些他认为有偏差，误差大的数据。这违反了科学的原则。

## 2. 枣糕模型

通常情况下，物质都是电中性的，在汤姆孙发现电子后，人们推测原子应当由两部分组成：一部分是带负电的电子，另一部分则带正电。对原子中正负电荷如何分布的问题，科学家们提出了许多模型，其中较有影响的是汤姆孙本人提出的“枣糕模型”。他认为：原子是一个球体，正电荷弥漫性地均匀分布在整個球体内，电子镶嵌其中。



1 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 略

标注 原子与原子核 > 原子

2 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（ ）

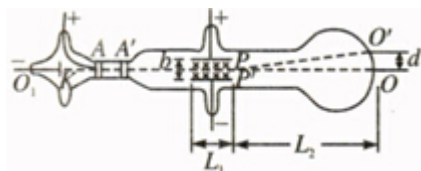
- A. 任何物质中均有电子
- B. 不同的物质中具有不同的电子
- C. 电子质量是质子质量的1836倍
- D. 电子是一种粒子，是构成物质的基本单元

答案 AD

解析 略

标注 原子与原子核 > 原子

3 汤姆生用来测定电子的比荷（电子的电荷量与质量之比）的实验装置如图所示。真空管内的阴极  $K$  发出的电子（不计初速度、重力和电子间的相互作用）经加速电压加速后，穿过  $A'$  中心的小孔沿中心轴  $O_1O$  的方向进入到两块水平正对旋转的平行极板  $P$  和  $P'$  间的区域。当极板间不加偏转电压时，电子束打在荧光屏的中心  $O$  点处，形成了一个亮点；加上偏转电压  $U$  后，亮点偏离到  $O'$  点， $O'$  与  $O$  点竖直间距为  $d$ ，水平间距可忽略不计。此时，在  $P$  和  $P'$  间的区域，再加上一个方向垂直于纸面向里的匀强磁场。调节磁场的强弱，当磁感应强度的大小为  $B$  时，亮点重新回到  $O$  点。已知极板水平方向的长度为  $L_1$ ，极板间距为  $b$ ，极板右端到荧光屏的距离为  $L_2$ （如图所示）。



(1) 求打在荧光屏O点的电子速度的大小。

(2) 推导出电子的比荷的表达式。

答案

$$(1) v = \frac{U}{Bb}$$

$$(2) \frac{e}{m} = \frac{Ud}{B^2 b L_1 (L_2 + \frac{L_1}{2})}$$

解析

(1) 当电子受到的电场力与洛伦兹力平衡时，电子做匀速直线运动，亮点重新回到中心O点。

设电子的速度为 $v$ ，则  $evB = eE$ ，得  $v = \frac{E}{B}$ ，即  $v = \frac{U}{Bb}$ 。

(2) 当极板间只有偏转电场时，电子以速度 $v$ 进入后，在竖直方向上做匀加速直线运动，加速度  $a = \frac{eU}{mb}$ 。

电子在水平方向上做匀速直线运动，在电场内的运行时间  $t_1 = \frac{L_1}{v}$ 。

这样，电子在电场中，竖直方向上偏转的距离

$$d_1 = \frac{1}{2}at_1^2 = \frac{eL_1^2U}{2mv^2b}$$

离开电场时竖直向上的分速度  $v_{\perp} = at_1 = \frac{eL_1U}{mvb}$ 。

电子离开电场后做匀速直线运动，到达荧光屏所用时间  $t_2 = \frac{L_2}{v}$ 。

在 $t_2$ 时间内向上运动的距离  $d_2 = v_{\perp}t_2 = \frac{eUL_1L_2}{mv^2b}$ 。

这样，电子向上的总偏转距离  $d = d_1 + d_2 = \frac{eUL_1}{mv^2b}(L_2 + \frac{L_1}{2})$ 。

可解得  $\frac{e}{m} = \frac{Ud}{B^2 b L_1 (L_2 + \frac{L_1}{2})}$ 。

标注

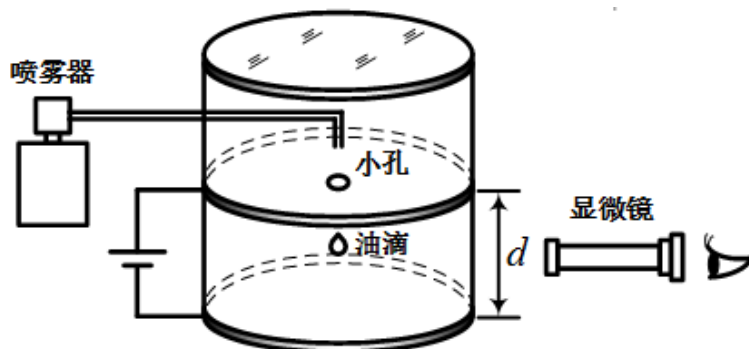
磁场 > 带电粒子在磁场中的运动

4

在19世纪末发现电子后，美国物理学家密立根在1907 – 1913年间进行了多次实验，比较准确地测定了电子的电荷量。密立根并没有直接测量电子的电荷量，而是测定很小的带电油滴所带的电荷量，他发现油滴所带的电荷量是某一数值 $e$ 的整数倍，于是称这一数值 $e$ 为基本电荷量。

如图所示，两块完全相同的金属极正对着水平放置，板间的距离为 $d$ 。用喷雾器将油滴从小孔喷入电场，油滴从喷口出来时由于摩擦而带电，在电场中受静电力的作用。当质量为 $m$ 的微小带电油滴在两板间运动时，所受空气阻力的大小与速度大小成正比，油滴的重力不可忽略。

两板间不加电压时，可以观察到油滴竖直向下做匀速运动，通过某一段距离 $s$ 所用时间为 $t_1$ ；当两板间加电压 $U$ （上极板的电势高）时，可以观察到同一油滴改做竖直向上的匀速运动，通过距离 $s$ 所用时间为 $t_2$ 。忽略空气浮力，重力加速度为 $g$ 。



- (1) 判断上述油滴的电性，要求说明理由；
- (2) 求上述油滴所带的电荷量 $Q$ ；
- (3) 用X射线照射极板空间可以改变油滴的带电量。再采用上述方法测量油滴的电荷量。如此重复操作，测量出油滴的电荷量 $Q_i$ 如下表所示。如果存在基本电荷，请根据现有数据求出基本电荷的电荷量 $e$ （保留到小数点后两位）。

实验次序	1	2	3	4	5
电荷 $Q_i$ ( $10^{-18}$ C)	0.95	1.10	1.41	1.57	2.02

答案

- (1) 负电
- (2)  $Q = \frac{mgd(t_1 + t_2)}{Ut_2}$
- (3)  $e = 1.54 \times 10^{-19} \text{ C}$

解析

- (1) 极板加上电压后，油滴向上匀速运动，故电场力向上，油滴带负电。
- (2) 设 $f = kv$ 
  - ①  $mg = kv_1$
  - ②  $qE = mg + kv_2$
  - ③  $E = \frac{U}{d}$

$$\textcircled{4} v_1 t_1 = v_2 t_2$$

$$\text{解得 } Q = \frac{mgd(t_1 + t_2)}{Ut_2}$$

$$(3) \quad Q_2 - Q_1 = 0.15 \times 10^{-18} \text{C}, \quad Q_3 - Q_2 = 0.31 \times 10^{-18} \text{C}, \quad Q_4 - Q_3 = 0.16 \times 10^{-18} \text{C} \dots\dots$$

油滴带电量之差，都近似为某个数整倍数

$$Q_2 - Q_1 = e_1, \quad Q_3 - Q_2 = 2e_2, \quad Q_4 - Q_3 = e_3, \quad Q_5 - Q_4 = 3e_4$$

$$e = \frac{e_1 + e_2 + e_3 + e_4}{4} = 1.54 \times 10^{-19} \text{C}$$

标注

静电场 > 电场 > 电场强度

## 二、原子的核式结构

### 1. 知识点睛

汤姆孙的枣糕模型能够解释一些实验现象，但勒纳德1903年做了一个实验，使电子束射到金属膜上，发现较高速度的电子很容易穿透原子，说明原子不是一个实心球体。稍后一些的 $\alpha$ 粒子散射实验则完全否定了汤姆孙模型。

#### 1. $\alpha$ 粒子散射实验

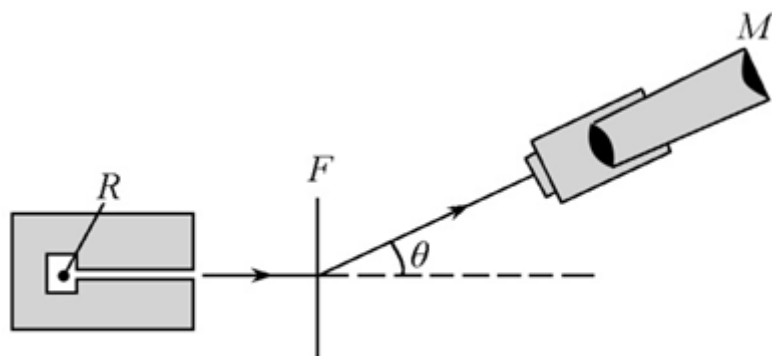
1909年，英籍物理学家卢瑟福指导他的学生盖革和马斯顿进行了 $\alpha$ 粒子散射实验的研究，下面我们来介绍这个实验。

##### (1) 实验装置介绍

被铅块包围的 $\alpha$ 粒子源 $R$ 形成一束射线打在金箔 $F$ 上，由于金原子中带电粒子对 $\alpha$ 粒子的库仑力作用，使得一些 $\alpha$ 粒子的运动方向会发生改变，即发生散射。观测装置 $M$ 是带有荧光屏的放大镜，被散射的 $\alpha$ 粒子打在荧光屏上会有微弱的闪光产生，我们可在水平面内不同的角度对散射的 $\alpha$ 粒子进行观察。从 $\alpha$ 粒子源到荧光屏这段路程处于真空中。

除了金箔外，当时的实验还用了其他重金属箔，例如铂箔。





$\alpha$ 粒子散射的实验装置（俯视）

## (2) 实验现象

绝大多数 $\alpha$ 粒子穿过金箔后，基本上仍沿原来的方向前进，但有少数 $\alpha$ 粒子（约占 $1/8000$ ）发生了大角度偏转，偏转的角度甚至大于 $90^\circ$ ，个别的接近 $180^\circ$ ，也就是说它们几乎被“撞了回来”。

## (3) 实验结果分析

大角度的偏转不可能是由电子造成的，因为它只有 $\alpha$ 粒子质量的 $\frac{1}{7300}$ ，它对 $\alpha$ 粒子速度的大小和方向的影响完全可以忽略。因此，造成 $\alpha$ 粒子偏转的主要原因是它受到了原子中除电子以外的其他物质的作用，而这部分物质的质量很大，而且是带正电的。

卢瑟福分析了实验数据后发现，事实应该是：占原子质量绝大部分的带正电的那部分物质集中在很小的空间范围。这样才会使 $\alpha$ 粒子经过时受到很强的斥力，从而发生大角度偏转。

## 2. 原子的核式结构模型

1911年，卢瑟福提出了自己的原子结构模型。他设想：原子中带正电部分的体积很小，但几乎占有全部质量，电子在正电体的外面运动。

按照卢瑟福的理论，正电体的尺度是很小的，被称为原子核。卢瑟福的原子模型因而被称为核式结构模型。

通常用核半径表征原子核的大小。原子核的半径是无法直接测量的，一般通过其他粒子与核的相互作用来确定。对于一般的原子核，实验确定的核半径的数量级为 $10^{-15}m$ ，而整个原子半径的数量级是 $10^{-10}m$ 。

### 5 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

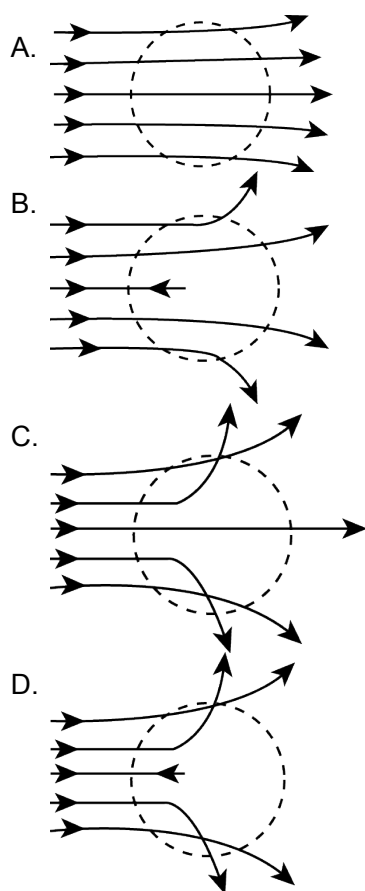
答案 A

**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。

**标注** 原子与原子核 > 原子

6 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．

**标注** 原子与原子核 > 原子 > 原子的核式结构模型

7  $\alpha$ 粒子散射实验中，我们不用考虑电子和 $\alpha$ 粒子的碰撞对实验造成的影响，是因为（ ）

- A.  $\alpha$ 粒子和电子根本无相互作用
- B. 电子是均匀分布的， $\alpha$ 粒子受电子作用的合力为零
- C.  $\alpha$ 粒子在和电子的碰撞中动量改变极小，可忽略不计
- D. 电子体积很小， $\alpha$ 粒子碰撞不到电子

**答案** C

**解析** 略

**标注** 原子与原子核 > 原子核

8 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．

标注 原子与原子核 > 原子

原子与原子核 > 原子 > 原子的核式结构模型

- 9  $\alpha$ 粒子质量为 $6.68 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，以速度 $v = 2.0 \times 10^7 \text{ m/s}$ 轰击金箔后，速度方向偏转了 $180^\circ$ ．求 $\alpha$ 粒子与金原子核最接近时具有的电势能．（设 $\alpha$ 粒子远离金原子核时的电势能为零）

答案  $1.34 \times 10^{-12} \text{ J}$

解析 略

标注 原子与原子核 > 原子核

### 10 2016年北京清华大学自主招生领军计划第25题

在卢瑟福的 $\alpha$ 粒子散射实验中，某一 $\alpha$ 粒子经过某一原子核附近时的轨迹如图中实线所示．图中 $P$ 、 $Q$ 为轨迹上的点，虚线是过 $P$ 、 $Q$ 两点并与轨迹相切的直线，两虚线和轨迹将平面分为四个区域，不考虑其他原子核对 $\alpha$ 粒子的作用，那么该原子核可能在区域 \_\_\_\_\_ ．

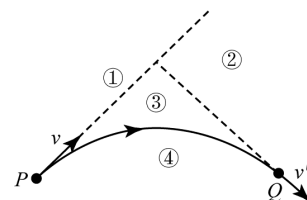


图4

答案 ①

解析 曲线运动的轨迹特点是切于速度偏向力，故原子核可能在区域①．

标注 原子与原子核 > 原子

## 三、玻尔模型1.0版

### 1. 知识点睛

## 1. 核式结构的缺陷

卢瑟福的核式结构模型正确地指出了原子核的存在，很好地解释了 $\alpha$ 粒子散射实验。但按照经典物理学，我们无法解释以下两个问题：原子的稳定性和原子光谱的分立特征。

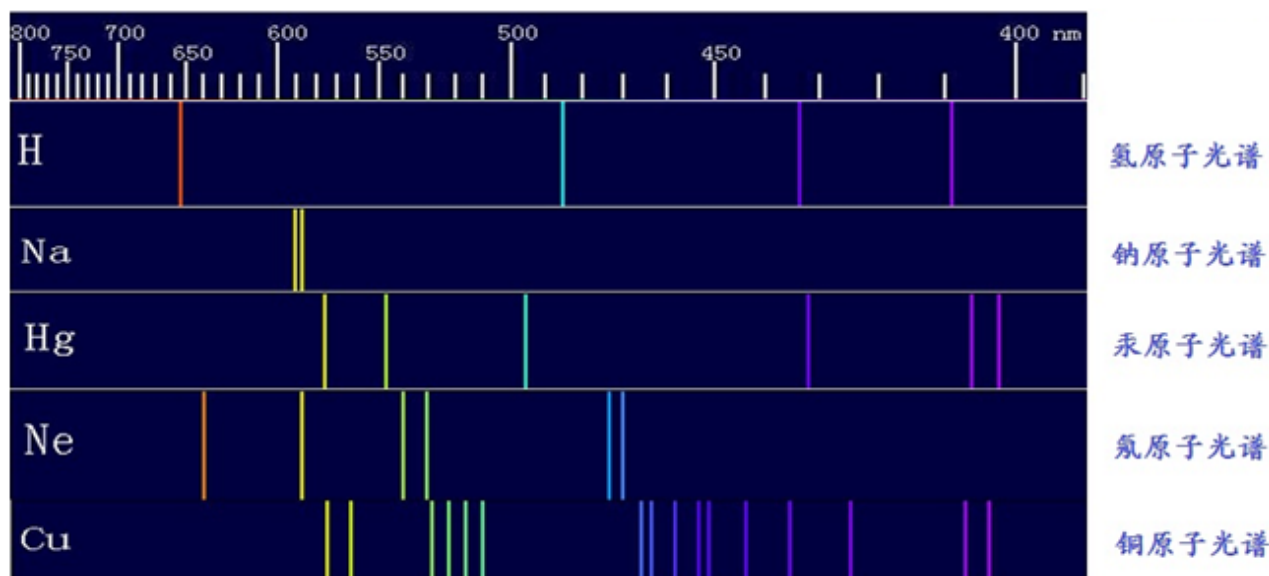
(1) 按照经典物理学，核外电子受到原子核的库仑引力的作用，不可能是静止的，它一定在以一定的速度绕核运动。既然电子在做周期性运动，它的电磁场就在周期性地变化，而周期性变化的电磁场会激发电磁波。也就是说，它将把自己绕核转动的能量以电磁波的形式辐射出去。因此，电子绕核转动这个系统是不稳定的，电子会失去能量，最终落入原子核。但事实不是这样，原子是个很稳定的系统。

(2) 根据经典电磁理论，电子辐射电磁波的频率，就是它绕核转动的频率。随着轨道半径的变小，电磁波频率将逐渐变化，这个变化应该是连续的，也就是说，我们应该看到原子辐射的各种频率的光，即原子的光谱应该总是连续的，而实际上通过实验我们看到的原子光谱是分立的。

## 2. 氢原子光谱

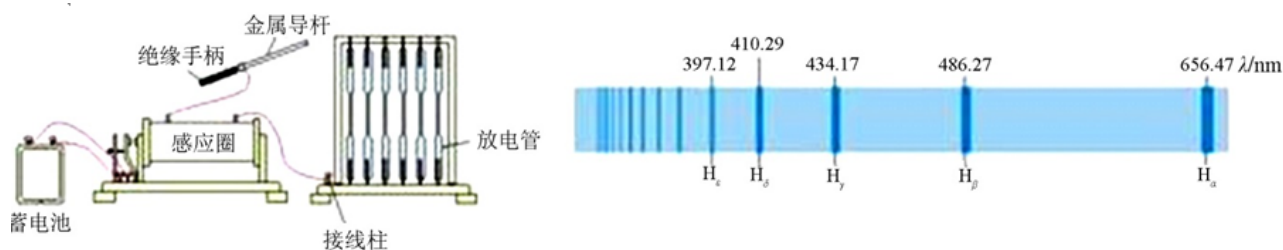
(1) 光谱是复色光分解后按照波长顺序排列成的光带。

如图所示，在可见光波长范围内，各种原子的发射光谱都是几条分立的谱线，说明原子只发出几种特定频率的光。



### (2) 氢原子光谱

玻璃管中稀薄气体的分子在强电场的作用下会电离，成为自由移动的正负电荷，于是气体变成导体，导电时会发光。这样的装置叫做气体放电管。从氢气放电管可以获得氢原子光谱。



1885年，巴耳末对当时已知的，在可见光区的四条谱线做了分析，发现这些谱线的波长能够用一个公式表示，如果采用波长 $\lambda$ 的倒数，这个公式可以写做：

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) n = 3 \cdot 4 \cdot 5 \dots$$

式中 $R$ 叫做里德伯常量，实验测得的值为 $R = 1.10 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 。

这个公式称为巴尔末公式，它确定的这一组谱线称为巴尔末系。式中的 $n$ 只能取整数，不能取连续值，波长也只会是分立的值。



显然经典理论无法解释氢原子的光谱特征。那么这个问题如何解决呢？

1913年，丹麦物理学家玻尔在量子理论和光子的概念的启发下，提出了自己的原子结构假说。

### 3. 玻尔的原子模型

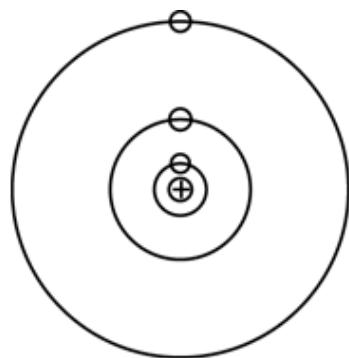
#### (1) 轨道量子化与定态

首先，玻尔认为原子中的电子在库仑引力的作用下绕原子核做圆周运动，服从经典力学的规律。

但不同的是：

#### ① 电子的轨道是量子化的

电子的轨道半径不是任意的，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。



玻尔的理论 with 日常的观点有很大不同, 不能将原子核和它周围的电子简单比做地球和人造卫星。

## ② 原子的能量也是量子化的

当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不同的能量。这些量子化的能量值, 叫做能级。

原子中这些具有确定能量的稳定状态, 叫做定态。能量最低的状态叫做基态, 其他的状态叫做激发态。

通常用量子数来标志原子各个不同的状态。例如: 用  $n = 1$  标志能量为  $E_1$  的基态,  $n = 2$  标志能量为  $E_2$  的第一激发态,  $n = 3$  标志能量为  $E_3$  的第二激发态, ……

**不同能级的能量满足:**  $E_n = \frac{E_1}{n^2}$ , 对氢原子  $E_1 = -13.6\text{eV}$  ( $\text{eV}$  是能量单位,  $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ );

**对应的轨道半径满足:**  $r_n = n^2 r_1$ , 对氢原子  $r_1 = 0.53 \times 10^{-10}\text{m}$ 。

玻尔模型中的这些假设是凭空想象出来的吗? 相关的解释、推导我们在后续课程中介绍, 大家先掌握这些结论即可。

## (2) 跃迁条件

① 原子由一个能量态变为另一个能量态的过程, 称为跃迁。这里的“跃”字, 包含着“不连续”的意思。

② 当原子从高能态 (能量为  $E_m$ ) 跃迁到低能态 (能量为  $E_n$ ) 时, 会放出能量为  $h\nu$  的光子。这个光子的能量由前后两个能级的能量差决定, 即  $h\nu = E_m - E_n$ 。这个式子称为频率条件, 又称辐射条件。

③ 当原子吸收光子时, 会从低能态  $E_n$  跃迁到高能态  $E_m$ , 吸收光子的能量同样由频率条件决定, 即吸收光子的能量满足  $h\nu = E_m - E_n$ 。



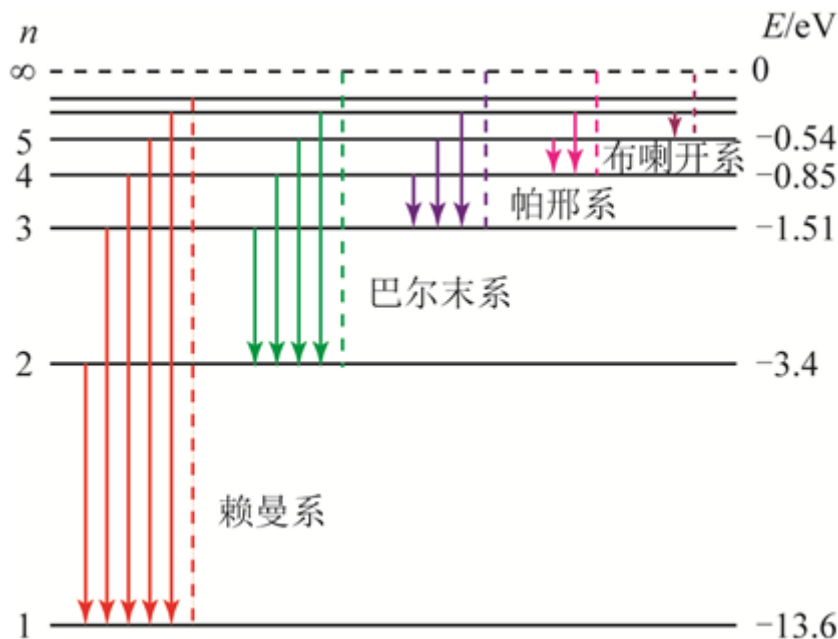
电子向高能级跃迁时，每次只能吸收一个光子，且该光子能量必须刚好等于两能级间的能量差，否则跃迁过程不能发生。

#### 4. 玻尔模型对氢原子光谱的解释

当原子从高能态  $E_m$  跃迁到低能态  $E_n$  时，发出的光子满足  $h\nu = E_m - E_n = E_1(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2})$ ，对于光子  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ，联立可得： $\frac{1}{\lambda} = \frac{(13.6\text{eV})}{hc}(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2})$ 。

当  $n = 2$  时，对应的即为巴尔末系谱线， $\frac{13.6\text{eV}}{hc}$  与里德伯常量符合得非常好。

同时，玻尔理论也能很好地解释甚至预言氢原子的其他谱线系。



#### 5. 玻尔模型的局限性

玻尔的原子理论第一次将量子观念引入原子领域，成功解释了氢原子光谱的实验规律。但对于稍微复杂一点的原子如氦原子，玻尔理论就遇到了困难。这说明玻尔理论还没有完全揭示微观粒子运动的规律。

## 2. 例题精讲

11 玻尔的原子核模型解释原子的下列问题时，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。

标注 原子与原子核 > 原子 > 玻尔的原子模型

12 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

标注 原子与原子核 > 原子 > 玻尔的原子模型

13 已知可见光的光子能量范围约为 $1.6\text{eV} \sim 3.1\text{eV}$ ，一群氢原子处于 $n = 4$ 的激发态，则关于这些氢原子辐射产生的光谱线，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. 一共可能产生6条谱线
- B. 可以产生2条谱线在可见光区
- C. 可以产生4条谱线在红外区
- D. 可以产生3条谱线在紫外区

答案 ABD

解析 略

标注 原子与原子核 > 原子

14 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

标注 原子与原子核 > 原子

15 假定光子能量为 $E$ 的一束光照射容器中大量处于 $n = 2$ 能级的氢原子，氢原子吸收光子后，发出频率为 $\nu_1$ 、 $\nu_2$ 、 $\nu_3$ 、 $\nu_4$ 、 $\nu_5$ 和 $\nu_6$ 的光，且频率依次增大，则 $E$ 等于（ ）

- A.  $h(\nu_3 - \nu_1)$
- B.  $h(\nu_5 + \nu_6)$
- C.  $h\nu_3$
- D.  $h\nu_4$

答案 C

解析 略

标注 原子与原子核 > 原子

原子与原子核 > 原子 > 氢原子光谱

16 氢原子在从能级A跃迁到能级B时辐射出波长为 $\lambda_1$ 的光子，在从能级A跃迁到能级C时，辐射出波长为 $\lambda_2$ 的光子。若 $\lambda_1 > \lambda_2$ ，则氢原子在从能级B跃迁到能级C时，将 \_\_\_\_\_（选填“吸收”或“辐射”）一个波长为 \_\_\_\_\_ 的光子。

答案 1. 辐射  
2.  $\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$

解析 略

标注 原子与原子核 > 原子

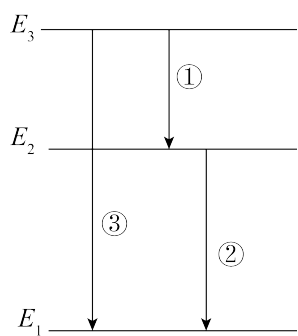
原子与原子核 > 原子 > 氢原子光谱

17 氢原子在某三个相邻能级之间跃迁时，可发出三种不同波长的辐射光。已知其中的两个波长分别为 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ ，且 $\lambda_1 > \lambda_2$ ，则另一个波长可能是（ ）

- A.  $\lambda_1 + \lambda_2$
- B.  $\lambda_1 - \lambda_2$
- C.  $\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$
- D.  $\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$

答案 CD

解析 由于 $\lambda_1 > \lambda_2$ ，则光子能量 $h\frac{c}{\lambda_1} < h\frac{c}{\lambda_2}$ ，共有如图所示的三种组合：已知①②求③、已知①③求②和已知②③求①，对①②求③可得： $\frac{hc}{\lambda_3} = \frac{hc}{\lambda_1} + \frac{hc}{\lambda_2} \Rightarrow \lambda_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ ，故C选项正确；对①③求②和②③求①可得D选项正确。



故选CD .

标注 原子与原子核 > 原子 > 玻尔的原子模型

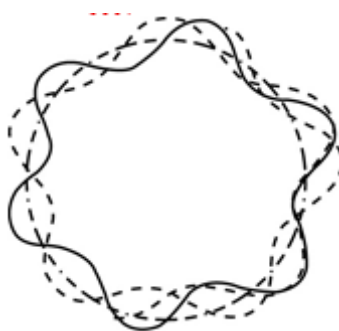
## 四、玻尔模型2.0版

### 1. 知识点睛

前面的课程中，我们直接给出了玻尔模型的基本假设。下面我们从半经典理论出发以氢原子为例来推导轨道和能量量子化的结论。

#### 1. 玻尔理论的轨道量子化与能量量子化

我们在光学模块中介绍过，实物粒子也具有波粒二象性。电子绕原子核的运动，也可以看作一种物质波。波的通性是一些物理量在波的传播方向上随位置不同做周期性的变化，这种变化的“周期”称为波长。如果把电子在核外的行为看成一系列波，那么在电子轨道上，每经过一个波长，电子的某个物理量就会“复原”一次，换句话说：要求电子绕圆轨道运动一周后的相位与初相位相同（形成自闭波），即轨道周长为物质波波长的整数倍，如图所示。



因此，电子第 $n$  ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ) 个稳定运动轨道的轨道半径 $r_n$ 要满足： $2\pi r_n = n\lambda$ 。其中， $\lambda$ 为物质波波长。

设电子质量为 $m$ ，电荷量为 $e$ ，电子在半径 $r_n$ 的轨道上做匀速圆周运动的速度为 $v_n$ ，则 $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv_n}$

联立上面两式可得： $mv_n r_n = n \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3 \dots)$  ①

这个条件也被称为角动量量子化条件。

电子绕原子核做匀速圆周运动，库仑力提供向心力，由牛顿第二定律得（以氢原子为例）：

$$m \frac{v_n^2}{r_n} = k \frac{e^2}{r_n^2} \quad ②$$

联立①②解得： $r_n = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 k m e^2}$  ③

则 $r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 k m e^2} = 0.53 \times 10^{-10} \text{m}$ （对氢原子成立）， $r_n = n^2 r_1$

电子在第 $n$ 个稳定运动轨道的动能 $E_{kn} = \frac{1}{2} m v_n^2 = \frac{k e^2}{2 r_n}$ ，电子的电势能为 $E_{pn} = -k \frac{e^2}{r_n}$ ，因此总能量为

$$E_n = E_{kn} + E_{pn} = -\frac{k e^2}{2 r_n} \quad ④$$

③代入④得： $E_n = -\frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{n^2 h^2}$  ⑤

则 $E_1 = -\frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{h^2} = -13.6 \text{eV}$ （对氢原子成立）， $E_n = \frac{1}{n^2} E_1$ 。

上述③式和⑤式即为1.0版本中提到的轨道量子化和能量量子化结果。

上述推导不仅对氢原子适用，对其它类氢原子（核外只有一个电子）也适用，但是在写牛顿定律的公式时，原子核的电荷量要改为 $Ze$ （要注意不可直接将结果中的 $e$ 替换为 $Ze$ ），其中 $Z$ 为核电荷数。

## 2. 例题精讲

18 氢原子辐射出一个光子后，根据玻尔理论，下列说法正确的是（ ）

- A. 氢原子的能量增大
- B. 核外电子的动能增大
- C. 氢原子的电势能增大
- D. 核外电子的轨道半径增大

答案 B

解析 略

标注 原子与原子核 > 原子

- 19 与氢原子类似，可以假设氦的一价正离子 $\text{He}^+$ 与锂的二价正离子 $\text{Li}^{++}$ 的一个核外电子也是绕原子核作匀速圆周运动的。试根据玻尔理论估算：

$\text{He}^+$ 和 $\text{Li}^{++}$ 的第一轨道半径。

$\text{He}^+$ 和 $\text{Li}^{++}$ 的基态能量。

答案 见解析

解析 设电子质量为 $m$ ，电荷量为 $e$ ，原子核的核电荷数为 $Z$ ，第 $n$ 个轨道的轨道半径为 $r_n$ ，电子在该轨道做匀速圆周运动的速度为 $v_n$ 。

由角动量量子化条件 $mv_nr_n = n\frac{h}{2\pi}$  ( $n = 1, 2, 3 \dots$ )；

由牛顿运动定律得： $m\frac{v_n^2}{r_n} = k\frac{Ze^2}{r_n^2}$ ，

联立解得： $r_n = n^2 \frac{h^2}{4\pi^2 kmZe^2}$ 。

对应轨道总能量 $E_n = E_{kn} + E_{pn} = -\frac{2\pi^2 mk^2 Z^2 e^4}{n^2 h^2}$ 。

对 $\text{He}^+$ ， $Z = 2$ ， $r_1 \approx 0.265 \times 10^{-10} \text{m}$ ， $E_1 \approx -54.4 \text{eV}$ 。

对 $\text{Li}^{++}$ ， $Z = 3$ ， $r_1 \approx 0.177 \times 10^{-10} \text{m}$ ， $E_1 \approx -122.4 \text{eV}$ 。

标注 近代物理 > 原子结构 > 玻尔模型 > 玻尔模型解释氢光谱

教师版补充：下面补充一道电子偶素的问题，在计算角动量量子化条件时需要使用总角动量，这个问题比较复杂，老师选讲。

- 20 物理学家在微观领域中发现了“电子偶素”现象。所谓“电子偶素”，就是由一个负电子和一个正电子绕它们的质量中心旋转形成的相对稳定的系统。已知正、负电子的质量均为 $m_e$ ，电量大小均为 $e$ ，普朗克恒量为 $h$ ，静电力常量为 $k$ 。

(1) 用玻尔模型推算“电子偶素”的基态半径。

(2) 求赖曼线产生光子的最高频率。

答案 (1)  $r = \frac{h^2}{4\pi^2 km_e e^2}$   
(2)  $\nu_{\max} = \frac{\pi^2 k^2 m_e e^4}{h^3}$

解析 (1) 电子偶素的角动量量子化条件为 $2\pi m_e v(2r) = nh$ 。

证明如下：

根据玻尔模型，氢原子轨道应满足  $2\pi m_e v r = n h$ 。它的本质是  $2\pi r = n \frac{h}{m_e v} = n \lambda$ 。即电子波形成环形自闭波，其轨道周长恰为波长的整数倍。

电子偶素（positronium）中一个负电子和一个正电子绕它们的质心旋转，设半径为  $r$ 。以其中任意一个粒子为参考系（建立平动参考系），将观察到另一个粒子做半径为  $r' = 2r$  的圆周运动。

这要求驻波条件为  $2\pi r' = n \lambda' = n \frac{h}{\mu v'}$ ，其中  $\mu$  是运动粒子的约化质量

$\mu = \frac{m_e m_e}{m_e + m_e} = \frac{m_e}{2}$ ， $v'$  是粒子在此参考系中运动的速度，它是该运动粒子在质心系中速度  $v$  的两倍。因此，在质心系中电子偶素的角动量量子化条件可以表示为：

$$2\pi(2r) = n \frac{h}{(\frac{m_e}{2})(2v)} \quad , \quad \text{即} \quad 2\pi m_e v(2r) = n h \quad .$$

基态时  $n = 1$ 。库仑力充当向心力（质心系观察）： $k \frac{e^2}{4r^2} = \frac{m_e v^2}{r}$ ；角动量量子化条件为  $4\pi m_e v r = h$ 。联立解得： $r = \frac{h^2}{4\pi^2 k m_e e^2}$ 。

$$\text{故答案为：} \quad r = \frac{h^2}{4\pi^2 k m_e e^2} \quad .$$

(2) 莱曼线系光谱是由各激发态跃迁到基态时所发出的光谱， $h\nu = E_n - E_1$ 。其中最高频率为  $\nu_{\max} = \frac{E_{\infty} - E_1}{h}$ 。以相距无限远为电势能零点，有

$$E_n = 2 \times \frac{1}{2} m_e v_n^2 - k \frac{e^2}{2r_n} = -k \frac{e^2}{4r_n} \quad , \quad \text{其中第} \quad r_n = n^2 r \quad . \quad \text{联立解得：} \quad E_{\infty} = 0 \quad ,$$

$$E_1 = \frac{\pi^2 k^2 m_e e^4}{h^2} \quad , \quad \nu_{\max} = \frac{\pi^2 k^2 m_e e^4}{h^3} \quad .$$

$$\text{故答案为：} \quad \nu_{\max} = \frac{\pi^2 k^2 m_e e^4}{h^3} \quad .$$

标注

近代物理 > 原子结构 > 玻尔模型 > 玻尔模型解释氢光谱

### 3. 知识点睛

#### 2. 原子电离条件

前面1.0版的课程中讲解过电子从低能量轨道向高能量轨道跃迁时，吸收光子的能量必须满足跃迁条件  $h\nu = E_m - E_n$ 。当光子能量足够大时，电子可以脱离原子核的束缚使原子电离（相当于电子跃迁到  $n = \infty$  的轨道），这种情况下，并不需要吸收的光子能量刚好满足  $h\nu = E_{\infty} - E_n$ ，只需  $h\nu > E_{\infty} - E_n = |E_n|$  即可。例如基态的氢原子吸收能量大于或等于  $13.6\text{eV}$  的光子都可以发生电离。原子电离所产生的自由电子的动能等于入射光子的能量减去使原子电离所需的最小能量  $|E_{\infty} - E_n|$ 。



### 3. 碰撞激发

如果通过一个自由电子和原子的碰撞来实现原子核外电子的激发或电离。则在碰撞过程中，电子的动能可以全部或部分的被原子吸收，所以只要入射电子的动能大于或等于原子某两个能级的差值，就可以使原子受激发而跃迁到较高的能级，当入射电子的动能大于或等于使原子电离所需的最小能量时，也可以使原子电离。

## 4. 例题精讲

21 用具有1.87eV能量的光子照射 $n = 3$ 激发态的氢原子时，氢原子将（ ）

- A. 不会吸收这个光子
- B. 吸收该光子后被电离，电离后电子的动能为0.36eV
- C. 吸收该光子后被电离，电离后电子的动能为零
- D. 吸收该光子后不会被电离

答案 B

解析 略

标注 原子与原子核 > 原子 > 原子的核式结构模型

22 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

标注 原子与原子核 > 原子

23 原子从一个能级跃迁到一个较低的能级时，有时可能不发射光子，假如在某种条件下，铬原子在  $n = 2$  能级上的电子跃迁到  $n = 1$  能级上时并不发射光子，而是将相应的能量转交给  $n = 4$  能级上的电子，使之脱离原子，这一现象叫做俄歇效应，以这种方式脱离了原子的电子叫做俄歇电子。已知铬原子的能级公式可简化表示为  $E_n = -\frac{A}{n^2}$ ，式中  $n = 1, 2, 3, \dots$  表示不同能级， $A$  是正的已知常数。上述俄歇电子的动能是（ ）

- A.  $\frac{3}{16}A$
- B.  $\frac{7}{16}A$
- C.  $\frac{11}{16}A$
- D.  $\frac{13}{16}A$

答案 C

解析 根据题意， $n = 1$  时， $E_1 = -A$ ； $n = 2$  时  $E_2 = -\frac{A}{4}$ ； $n = 4$ ， $E_4 = -\frac{A}{16}$ ，铬原子从  $n = 2$  能级跃迁  $n = 1$  能级时放出能量  $\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{3}{4}A$ 。所以俄歇电子动能为  $E = |\Delta E| - E_4 = \frac{11}{16}A$ 。故选 A。

标注 近代物理 > 原子结构 > 玻尔模型 > 玻尔模型解释氢光谱

24 有一密闭的容器，内有大量的氢原子，这些氢原子均处于基态  $E_0$ 。

- (1) 设某时刻一动能为  $E_k$  的电子进入该容器，并与氢原子发生碰撞。如果用  $E_1$ 、 $E_2$  分别表示氢原子的第一、第二激发态的能量，且  $E_1 - E_0 < E_k < E_2 - E_0$ ，你认为会发生什么样的物理过程。
- (2) 如果把电子换成一个具有相同能量的光子，你认为会发生什么样的物理过程。

答案 (1) 电子与氢原子碰撞，使基态的氢原子可能跃迁到第一激发态，电子动能减少，氢原子从第一激发态跃迁回基态时会放出光子。

(2) 如果换成光子，因原子只能吸收一定频率的光子，故氢原子不吸收该光子，没有什么发生。

解析 (1) 略

(2) 略

标注 近代物理 > 原子结构 > 玻尔模型 > 玻尔模型解释氢光谱

25 用大量具有一定能量的电子轰击大量处于基态的氢原子，观测到了一定数目的光谱线。调高电子的能量再次进行观测，发现光谱线的数目比原来增加了5条。用 $\Delta n$ 表示两次观测中最高激发态的量子数 $n$ 之差， $E$ 表示调高后电子的能量。根据氢原子的能级图可以判断， $\Delta n$ 和 $E$ 的可能值为 ( )

$n$	$E/\text{eV}$
7	-0.28
6	-0.38
5	-0.54
4	-0.85
3	-1.51
2	-3.40
1	-13.60

A.  $\Delta n = 1$  ,  $13.22\text{eV} < E < 13.32\text{eV}$

B.  $\Delta n = 1$  ,  $12.75\text{eV} < E < 13.06\text{eV}$

C.  $\Delta n = 2$  ,  $13.22\text{eV} < E < 13.32\text{eV}$

D.  $\Delta n = 2$  ,  $12.75\text{eV} < E < 13.06\text{eV}$

答案 AD

解析 A . B . 当 $\Delta n = 1$ 时， $n = 5$ ，调整后的能级为 $n = 6$ ，解得

$\Delta E = -0.38\text{eV} - (-13.6\text{eV}) = 13.22\text{eV}$ ，因此提高电子的动能应该大于此时的能级差，但是应该小于基态和第7能级之间的能级差，否则将跃迁到更高能级，

$\Delta E = -0.28\text{eV} - (-13.6\text{eV}) = 13.32\text{eV}$ ，故A项正确，C项错误；

C . D . 当 $\Delta n = 2$ 时， $n = 2$ ，调整后的能级为 $n = 4$ ，解得

$\Delta E = -0.85\text{eV} - (-13.6\text{eV}) = 12.75\text{eV}$ ，因此提高电子的动能应该大于此时的能级差，但是应该小于基态和第5能级之间的能级差，否则将跃迁到更高能级，

$\Delta E = -0.54\text{eV} - (-13.6\text{eV}) = 13.06\text{eV}$ ，故C项错误，D项正确。

故选AD。

标注 原子与原子核 > 原子 > 玻尔的原子模型

例题说明：下面两道题目是玻尔模型与牛顿定律、动量、能量结合的问题。

26 已知氢原子处在第 $n$ 能级的能量为 $E_n = \frac{E_1}{n^2}$ ，其中 $E_1$ 是基态能量， $n = 1, 2, 3, \dots$ 。若一氢原子发出能量为 $-\frac{3}{16}E_1$ 的光子后处于比基态能量高出 $-\frac{3}{4}E_1$ 的激发态，求氢原子发射光子前后电子运动的速度之比。

答案 1:2

解析 设氢原子发射光子前后分别位于第 $l$ 与第 $m$ 能级，依题意有： $\frac{E_1}{m^2} - E_1 = -\frac{3}{4}E_1$ ，  
 $\frac{E_1}{l^2} - \frac{E_1}{m^2} = -\frac{3}{16}E_1$ ，解得： $m = 2, l = 4$ 。  
 由库仑定律和牛顿第二定律， $k\frac{e^2}{r^2} = m_e \frac{v^2}{r}$ ，得 $v = \sqrt{\frac{ke^2}{m_e r}}$ ，  
 所以 $v_4 : v_2 = \sqrt{\frac{1}{r_4}} : \sqrt{\frac{1}{r_2}} = \sqrt{\frac{1}{4^2}} : \sqrt{\frac{1}{2^2}} = 2 : 4 = 1 : 2$ 。  
 故答案为：1:2。

标注 原子与原子核 > 原子

27 完成下列各题：

- (1) 已知基态 $\text{He}^+$ 的电离能为 $E = 54.5\text{eV}$ ，为使处于基态的静止的 $\text{He}^+$ 跃迁到激发态，入射光子所需的最小能量为多少。
- (2) 静止的 $\text{He}^+$ 从第一激发态跃迁到基态时，如果考虑到离子的反冲，与不考虑反冲相比，发射出的光子波长相差的百分比为多少。（离子 $\text{He}^+$ 的能级 $E_n$ 与 $n$ 的关系和氢原子能级公式类似。电子电荷的大小取为 $1.60 \times 10^{-19}\text{C}$ ，质子和中子质量均取为 $1.67 \times 10^{-27}\text{kg}$ ）。

答案 (1) 40.9eV  
 (2)  $5.4 \times 10^{-9}$

解析 (1) 依题意， $\text{He}^+$ 基态能量 $E_1 = -E = -54.5\text{eV}$ ，  
 第一激发态能量 $E_2 = -\frac{1}{2^2}E \approx -13.6\text{eV}$ 。

因此，入射光子最小能量  $\Delta E_m = E_2 - E_1 = 40.9\text{eV}$  .

故答案为：40.9eV .

(2) 不考虑离子反冲时，设放出光子频率为  $\nu_0$ ，波长为  $\lambda_0$ ，则  $h\nu_0 = \Delta E_m$  .

考虑离子反冲时，设放出光子频率为  $\nu$ ，波长为  $\lambda$ ，离子质量为  $M$ 、反冲速度为  $v_1$ ，则

$$h\nu + \frac{1}{2}Mv_1^2 = \Delta E_m .$$

由系统动量守恒可得： $Mv_1 = h\frac{\nu}{c}$ ，

$$\text{则 } \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\nu_0 - \nu}{\nu} .$$

$$\text{联立解得：} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\frac{1}{2}Mv_1^2}{Mv_1c} = \frac{h\nu}{2Mc^2} \approx \frac{h\nu_0}{2Mc^2} ,$$

$$\text{带入数据得：} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx 5.4 \times 10^{-9} .$$

故答案为： $5.4 \times 10^{-9}$  .

标注 近代物理 > 原子结构 > 玻尔模型 > 玻尔模型解释氢光谱

## 五、天然放射现象

### 1. 知识点睛



原子模型建立之后，科学家接下来思考的问题是：原子核还能不能再分？

在化学课中，大家已经学习过原子核是由质子和中子组成的。

质子和中子除了是否带电的差异和质量上的微小差别外，其余性质十分相似，统称为核子。原子核所带的电荷是质子电荷的整数倍，通常用这个整数表示原子核的电荷量，称为核电荷数，用  $Z$  表示。原子核的质量等于核内质子和中子的质量的总和，而质子和中子的质量几乎相等，所以原子核的质量几乎等于单个核子质量的整数倍，这个倍数叫做原子核的质量数，用  $A$  表示。

原子核通常用符号  ${}_Z^AX$  表示， $X$  为元素符号， $Z$  表示核电荷数（即原子序数）， $A$  表示质量数。

历史上，人们对原子核的认识，是从天然放射现象开始的。

## 2. 阅读材料

1895年，伦琴发现 $x$ 射线的消息传到巴黎，立即掀起了一股研究 $x$ 射线热。法国科学院院士、善于研究荧光物质的物理学家贝克勒尔注意到，阴极射线管在产生具有穿透力的不可见光—— $x$ 射线的同时，也可以产生没有穿透力的可见光——荧光。那么，荧光和 $x$ 射线之间有什么关系呢？

为了验证这一设想，贝克勒尔精心安排了一项实验。他用一种晶体铀盐作为荧光物质，把它和一张用黑纸包得密不透光的照相底片放在一起，然后放在太阳光下照射。他设想，由于太阳光不能穿透黑纸，因此，太阳光本身不会使照相底片感光。但是，太阳光中的紫外线会激发荧光物质产生荧光辐射，如果伴随荧光能产生 $x$ 射线的话，那么， $x$ 射线就会使黑纸包里的照相底片感光。

实验结果，照相底片确实感光了。这似乎证明贝克勒尔的设想是正确的，因为当时人们只知道 $x$ 射线具备穿透黑纸使底片感光的能力。

正当贝克勒尔想继续这个实验时，遇到了连绵阴雨天，他只好懊恼地把铀盐和照相底片一起锁进抽屉里。几天以后，细心的贝克勒尔将抽屉里的底片取出冲洗后，却惊奇地发现，底片显然受到强辐射的作用而感了光。荧光物质没见阳光，不会发荧光，当然也无从激发 $x$ 射线了，底片怎么会感光呢？

经过反复摸索，贝克勒尔发现，只要照相底片放在铀盐的附近，不管在多么黑暗的地方，底片都会感光，而且感光阴影正好是铀盐的像。这时贝克勒尔才醒悟，他原来关于荧光物质产生 $x$ 射线的设想是错误的。

铀及其化合物会自发地放出一种不同于 $x$ 射线的新射线。这就是天然放射性。

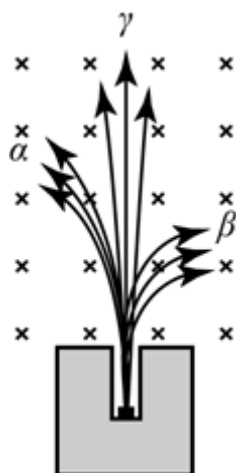
### 1. 天然放射现象

(1) 物质发射射线的性质称为放射性，具有放射性的元素称为放射性元素。

(2) 放射性元素自发地发出射线的现象，叫做天然放射现象。

### 2. 三种射线

把放射源放入铅做成的容器中，射线只能从容器的小孔射出，成为细细的一束。在射线经过的空间施加磁场，发现射线分裂成三束，其中两束在磁场中向不同的方向偏转，说明它们是带电粒子流，另一束在磁场中不偏转，说明它不带电。人们把这三种射线分别叫做 $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线、 $\gamma$ 射线。



$\alpha$ 射线：高速氦原子核流，带正电。

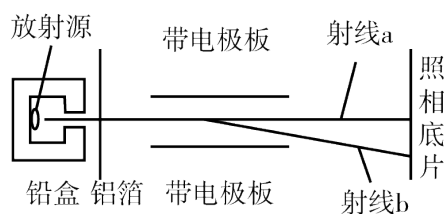
$\beta$ 射线：高速电子流，带负电。

$\gamma$ 射线：波长很短的光子流，不带电。

种类	本质	质量 ( $u$ )	电荷 ( $e$ )	速度 ( $c$ )	电离能力	穿透能力
$\alpha$ 射线	氦核	4	+2	0.1	较强	较弱，一张纸能把它挡住
$\beta$ 射线	电子	1/1840	-1	0.99	中等	中等，能穿透几毫米厚的铝板
$\gamma$ 射线	光子	0	0	1	较弱	较强，能穿透几厘米厚的铅板

### 3. 例题精讲

28 一置于铅盒中的放射源发射的 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 射线，由铅盒的小孔射出，在小孔外放一铝箔，铝箔右侧的空间有一匀强电场。射线进入电场后，变为 $a$ 、 $b$ 两束，射线 $a$ 沿原来方向行进，射线 $b$ 发生了偏转，如图所示，则图中的（ ）



- A. 射线 $a$ 为 $\alpha$ 射线，射线 $b$ 为 $\beta$ 射线
- B. 射线 $a$ 为 $\beta$ 射线，射线 $b$ 为 $\alpha$ 射线
- C. 射线 $a$ 为 $\gamma$ 射线，射线 $b$ 为 $\alpha$ 射线
- D. 射线 $a$ 为 $\gamma$ 射线，射线 $b$ 为 $\beta$ 射线



答案 D

解析 放射线 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 经过铝箔之后， $\alpha$ 射线被拦截，只剩下 $\beta$ 、 $\gamma$ 射线，而 $\beta$ 射线带电荷，在电场中会发生偏转，故**b**为 $\beta$ 射线，**a**为 $\gamma$ 射线。故D正确。

故选D。

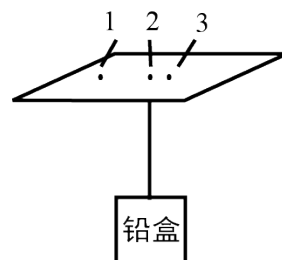
标注 原子与原子核 > 原子核

29 某学习小组到大学的近代物理实验室参观，实验室的老师给他们提供了一张经过放射线照射的底片，底片上面记录了在同一直线上的三个曝光的痕迹，如图所示。老师告诉他们，实验时底片水平放置，第2号痕迹位置的正下方为储有放射源的铅盒的开口，放射源可放射出 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 三种射线。然后又提供了 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 三种射线的一些信息如下表。已知铅盒上的开口很小，故射线离开铅盒时的初速度方向均可视为竖直向上，射线中的粒子所受重力、空气阻力及它们之间的相互作用力均可忽略不计，不考虑粒子高速运动时的相对论效应。

原子质量单位 $1\text{u} = 1.66 \times 10^{-27}\text{kg}$ ，元电荷 $e = 1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ ，光速 $c = 3.0 \times 10^8\text{m/s}$ 。

射线类型	射线性质				
	组成	质量	速度	电离作用	穿透性
$\alpha$ 射线	${}^4_2\text{He}$	$4\text{u}$	$0.1c$	强	弱
$\beta$ 射线	${}^0_{-1}\text{e}$	$\text{u}/1840$	约为 $c$	较弱	较强
$\gamma$ 射线	$\gamma$ 光子	0	$c$	弱	强

- 学习过程中老师告诉同学们，可以利用三种射线在电场或磁场中的偏转情况对它们加以辨别。如果在铅盒与底片之间加有磁感应强度 $B = 0.70\text{T}$ 的水平匀强磁场，请你计算一下放射源射出 $\alpha$ 射线在此磁场中形成的圆弧轨迹的半径为多大？（保留2位有效数字）
- 老师对如图所示的“三个曝光的痕迹”解释说，底片上三个曝光的痕迹是铅盒与底片处在同一平行于三个痕迹连线的水平匀强电场中所形成的。
  - 试分析说明，第2号痕迹是什么射线照射形成的；
  - 请说明 $\alpha$ 粒子从铅盒中出来后做怎样的运动；并通过计算说明第几号曝光痕迹是由 $\alpha$ 射线照射形成的。



答案

(1)  $r=0.89\text{m}$

(2) 见解析。

解析

(1)  $\alpha$ 射线的粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动，设其半径为 $r$ ，根据牛顿第二定律，有

$$qvB = m \frac{v^2}{r}$$

代入数据解得： $r=0.89\text{m}$

(2) ①第2号痕迹正对着储有放射源的铅盒的开口，表明形成第2号痕迹的射线做匀速直线运动，即不受电场力作用，所以不带电，故第2号痕迹是 $\gamma$ 射线照射形成的。

② $\alpha$ 射线的粒子从放射源出来经过水平匀强电场打到底片上的过程中，受恒定的电场力作用，且水平的电场力与竖直的初速度方向垂直，故应做匀变速曲线运动。设铅盒与底片间的竖直距离为 $d$ ，电场强度为 $E$ ，带电射线从放射源射出时的初速度为 $v_0$ ，质量为 $m$ ，所带电荷量为 $q$ ，在电场中运动时间为 $t$ ，则对于粒子在电场中的运动有竖直

方向 $d = v_0 t$ ，水平方向的侧移量 $x = \frac{1}{2} \frac{qE}{m} t^2$

$$\text{解得：} x = \frac{qEd^2}{2mv_0^2}$$

因此对于 $\alpha$ 射线和 $\beta$ 射线的侧移量之比有

$$\frac{x_\alpha}{x_\beta} = \frac{q_\alpha}{q_\beta} \cdot \frac{m_\beta}{m_\alpha} \cdot \left(\frac{v_\beta}{v_\alpha}\right)^2 = \frac{2}{1} \times \frac{1}{4 \times 1840} \times \left(\frac{1}{0.1}\right)^2 = \frac{5}{184}$$

表明 $\alpha$ 射线的偏转侧移量较小，所以第3号痕迹应是 $\alpha$ 射线所形成的。

标注

磁场 > 带电粒子在磁场中的运动

## 六、放射性元素的衰变

### 1. 知识点睛

在古代，有一批人追求“点石成金”之术，当然最终他们都失败了，因为他们不知道一种元素变成另一种元素的根本在于原子核的变化。不过自然界中却进行着类似“点石成金”的事，这就是伴随着天然放射现象发生的“衰变”。

## 1. 原子核的衰变

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。

$\alpha$ 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。



1. 天然放射现象中产生的 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 射线都是原子核发生衰变时放出的，是原子核内部发生变化产生的。
2. 原子核衰变的过程中，**核电荷数**和**质量数**守恒。

## 2. 衰变的本质

### (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很多个数量级。

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。

## 2. 例题精讲

30 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。

标注 原子与原子核 > 原子核 > 天然放射现象

原子与原子核 > 原子核

31 天然放射性元素 ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ 经过 \_\_\_\_\_ 次 $\alpha$ 衰变和 \_\_\_\_\_ 次 $\beta$ 衰变，最后变成铅的同位素 \_\_\_\_\_。（填入铅的三种同位素 ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ 、 ${}_{82}^{207}\text{Pb}$ 、 ${}_{82}^{208}\text{Pb}$ 中的一种）

答案 1. 8

2. 4

3.  ${}_{82}^{207}\text{Pb}$

解析

设发生了 $x$ 次 $\alpha$ 衰变和 $y$ 次 $\beta$ 衰变，

根据质量数和电荷数守恒可知， $2x - y + 82 = 94$ ， $239 = 207 + 4x$ ；

由数学知识可知， $x = 8$ ， $y = 4$ 。

若是铅的同位素206，或208，不满足两数守恒，

因此最后变成铅的同位素是 ${}_{82}^{207}\text{Pb}$ ；

故答案为：8，4， ${}_{82}^{207}\text{Pb}$ 。

标注

原子与原子核 > 原子核

32

某原子核内有核子 $N$ 个，其中包含质子 $n$ 个，当核经过一次 $\alpha$ 衰变和一次 $\beta$ 衰变后，它自身变成一个新的原子核，可知这个新的原子核内（ ）

- A. 有核子 $(n - 3)$ 个
- B. 有核子 $(N - 4)$ 个
- C. 有中子 $(N - n - 1)$ 个
- D. 有质子 $(n - 1)$ 个

答案

BD

解析

根据： ${}_n^N\text{X} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_{-1}^0\text{e} + {}_{n-1}^{N-4}\text{Y}$ ，Y为新的原子核。

故选BD。

标注

原子与原子核 > 原子核

原子与原子核 > 原子核 > 核裂变与核聚变

科学思维 > 科学推理

33

一个具有放射性的原子核A放射一个 $\beta$ 粒子后变成原子核B，原子核B再放射一个 $\alpha$ 粒子后变成原子核C，可以肯定的是（ ）

- A. 原子核A比原子核B多2个中子
- B. 原子核A比原子核C多3个中子
- C. 原子核A的中性原子中的电子数，比原子核B的中性原子中的电子数少1

D. 原子核A的中性原子中的电子数，比原子核C的中性原子中的电子数少1

答案 BC

解析 A. 一个具有放射性的原子核A放射一个 $\beta$ 粒子后变成原子核B，质量数不变，质子数增加1，中子数减1，原子核B在放射一个 $\alpha$ 粒子后变成原子核C，质子数减2，质量数减4，原子核A比原子核B少一个中子多1个质子，故A错误；  
B. 原子核A比原子核C多1个质子，多3个中子，故B正确；  
C. 原子核为A的中性原子中的电子数比原子核为B的中性原子中的电子数少1，故C正确；  
D. 原子核为A的中性原子中的电子数，比原子核为C的中性原子中原来的电子数多1，故D错误。  
故选BC。

标注 原子与原子核 > 原子核

原子与原子核 > 原子核 > 放射性元素的衰变

34 在匀强磁场中，某个处于静止状态的放射性原子核 ${}_Z^AX$ 发生 $\alpha$ 衰变，从X核中放出一个 $\alpha$ 粒子。已知 $\alpha$ 粒子的速度方向垂直于磁感线，并测得 $\alpha$ 粒子的运动轨迹半径为R，则反冲核的运动半径是（

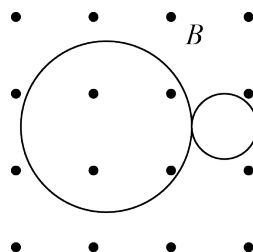
- )
- A.  $\frac{A-4}{4}R$   
B.  $\frac{A-4}{2(Z-2)}R$   
C.  $\frac{2}{Z-2}R$   
D.  $\frac{4}{A-4}R$

答案 C

解析 由 $r = \frac{mv}{qB} = \frac{p}{qB}$ （p为动量）可知， $r_\alpha = \frac{mv}{q_\alpha B} = \frac{p_\alpha}{q_\alpha B}$ ， $r = \frac{p}{qB}$ ，由于初动量之和为零，根据反冲的知识可知， $p = p_\alpha$ ，所以 $\frac{r}{r_\alpha} = \frac{q_\alpha B}{qB} = \frac{q_\alpha}{q}$ ，结合 $q = Z - 2$ ， $q_\alpha = 2$ ，所以代入得 $r = \frac{q_\alpha}{q} r_\alpha = \frac{2}{Z-2}R$ ，故C正确。  
故选C。

标注 原子与原子核 > 原子核

- 35 在匀强磁场中有一个静止的氡原子核( ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ )，由于衰变它放出一个粒子，此粒子的径迹与反冲核的径迹是两个相互外切的圆，大圆与小圆的直径之比为42:1，如图所示，那么氡核的衰变方程应是下列方程中的哪一个 ( )



- A.  ${}^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{222}_{87}\text{Fr} + {}^0_{-1}\text{e}$   
 B.  ${}^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\text{Po} + {}^4_2\text{He}$   
 C.  ${}^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{222}_{85}\text{At} + {}^0_1\text{e}$   
 D.  ${}^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{222}_{85}\text{At} + {}^2_1\text{H}$

答案 B

解析 原子核的衰变过程满足动量守恒，可得两带电粒子动量大小相等，方向相反，就动量大小而言有： $m_1 v_1 = m_2 v_2$  .

由带电粒子在匀强磁场中圆击运动的半径公式可得： $r = \frac{mv}{qB}$  .

所以， $\frac{d_1}{d_2} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{q_2}{q_1} = \frac{42}{1}$  .

审视ABCD四个选项，满足42:1关系的只有B .

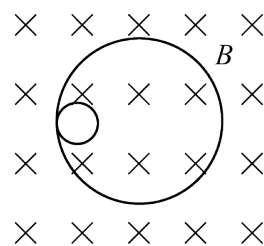
故选B .

标注 原子与原子核 > 原子核

原子与原子核 > 原子核 > 放射性元素的衰变

- 36 在匀强磁场中有一个原来静止的 ${}^{14}_6\text{C}$ 原子核，发生了某种衰变，已知放射出的粒子速度方向及反冲核的速度方向均与磁场方向垂直，它们在磁场中运动的轨迹是两个相内切的圆，如图所示．由此可知衰变生成的新核和反应放出的粒子分别是 ( )





- A.  ${}^{14}_5\text{B}$ 、 ${}^0_{-1}\text{e}$
- B.  ${}^{10}_4\text{Be}$ 、 ${}^4_2\text{He}$
- C.  ${}^{14}_7\text{N}$ 、 ${}^0_{-1}\text{e}$
- D.  ${}^{12}_5\text{B}$ 、 ${}^2_1\text{H}$

答案 C

解析 略

标注 原子与原子核 > 原子核

### 3. 知识点睛

放射性同位素衰变的快慢有一定的规律。例如，氡222经过 $\alpha$ 衰变变成钋218，如果隔一段时间测量一次剩余氡的数量就会发现，每过3.8天就有一半的氡发生了衰变。也就是说，经过第一个3.8天，剩有一半的氡；经过第二个3.8天，剩有1/4的氡……下面我们来介绍原子核衰变快慢的规律。

#### 定义

#### 3. 半衰期

放射性元素的原子核有半数发生衰变所需的时间，叫做这种元素的半衰期 $\tau$ 。

设 $t = 0$ 时原子核数目为 $N_0$ ，实验表明，经时间 $t$ 后，剩余的原子核数目 $N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{\tau}}$ 。

说明：

- (1) 对于同一种放射性元素，半衰期是一个定值。
- (2) 半衰期是对大量原子核的统计规律，不是少数原子核的行为，对单个原子衰变规律不适用。
- (3) 半衰期由原子核内部自身的因素决定，跟原子所处的化学状态和外部条件无关。
- (4) 原子核衰变过程并不是到了一个半衰期才开始衰变，而是在半衰期内缓慢衰变至原来的一半，所以衰变过程是连续的而不是分立的。

#### 4. 放射性同位素的应用

(1) 利用其射线： $\alpha$ 射线电离性强，用于使空气电离，将静电泄出，从而消除有害静电。 $\gamma$ 射线贯穿性强，可用于金属探伤，也可用于治疗恶性肿瘤。各种射线均可使DNA发生突变，可用于生物工程，基因工程。

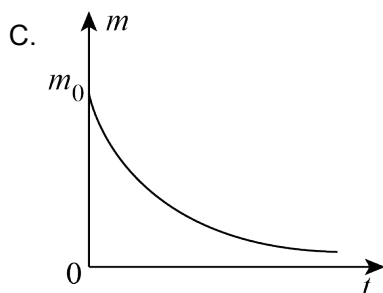
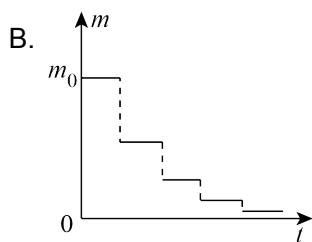
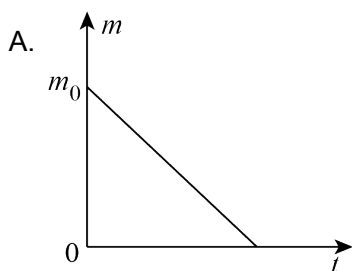
(2) 作为示踪原子：用于研究农作物化肥需求情况，诊断甲状腺疾病的类型，研究生物大分子结构及其功能。

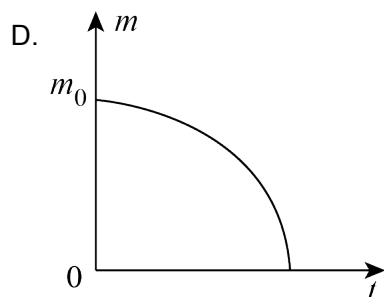
(3) 进行考古研究：利用放射性同位素碳14，判定出土文物的产生年代。

#### 4. 例题精讲

37  $^{14}\text{C}$ 测年法是利用 $^{14}\text{C}$ 的衰变规律对古生物进行年代测定的一种方法。若以横轴表示时间 $t$ ，纵轴表示任意时刻 $^{14}\text{C}$ 的质量 $m$ ， $m_0$ 为 $t=0$ 时 $^{14}\text{C}$ 的质量。下面四幅图中能正确反映 $^{14}\text{C}$ 衰变规律的是（

）





答案 C

解析 略

标注 原子与原子核 > 原子核 > 放射性元素的衰变  
原子与原子核 > 原子核

38 放射性元素氡 ( ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ ) 经  $\alpha$  衰变成为钋  ${}^{218}_{84}\text{Po}$ ，半衰期为 3.8 天；但勘测表明，经过漫长的地质年代后，目前地壳中仍存在天然的含有放射性元素  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  的矿石，其原因是 ( )

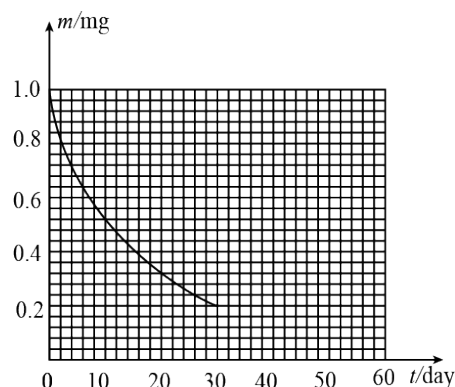
- A. 目前地壳中的  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  主要来自于其它放射元素的衰变
- B. 在地球形成的初期，地壳中元素  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  的含量足够高
- C. 当衰变产物  ${}^{218}_{84}\text{Po}$  积累到一定量以后， ${}^{218}_{84}\text{Po}$  的增加会减慢  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  的衰变进程
- D.  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  主要存在于地球深处的矿石中，温度和压力改变了它的半衰期

答案 A

解析 ABC. 因为放射性元素氡的半衰期比较短，目前地壳中仍存在天然的含有放射性元素氡的矿石，主要来自其他放射性元素的衰变. 故 A 正确，BC 错误；  
D. 半衰期的大小与温度，压力无关，由原子核内部因素决定，故 D 错误。  
故选 A.

标注 原子与原子核 > 原子核  
原子与原子核 > 原子核 > 放射性元素的衰变  
物理观念 > 物质观念

- 39  $^{32}_{15}\text{P}$  是  $^{30}_{15}\text{P}$  的同位素，被广泛应用于生物示踪技术。1mg 的  $^{32}_{15}\text{P}$  随时间衰变的关系如图所示，那么 4mg 的  $^{32}_{15}\text{P}$  大约经过 \_\_\_\_\_ 天的衰变后还剩 0.25mg。



答案 56

解析  $t = 56$  天（54-58天都算对）。

故答案为：56。

标注 原子与原子核 > 原子核 > 放射性元素的衰变

- 40 已知 A、B 两种放射性元素的半衰期分别为  $T_1$  和  $T_2$ ， $t = T_1 \cdot T_2$  时间后测得这两种放射性元素的质量相等，那么它们原来的质量之比  $m_A : m_B = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

答案  $2^{T_2} : 2^{T_1}$

解析 略

标注 原子与原子核 > 原子核

- 41 在一个密闭的容器中装有放射性同位素氦 ( $^{85}_{36}\text{Kr}$ ) 气，在  $20^\circ\text{C}$  时其压强为 1 大气压，将容器埋入地下深处经过 22 年后取出，在此期间有些氦 85 经  $\beta$  衰变称为 ( $^{85}_{37}\text{Rb}$ )，而铷最后呈固体状态，并测得固体铷为  $7.5 \times 10^{-2} \text{mol}$ 。现在，在温度仍是  $20^\circ\text{C}$ ，测得容器中压强为 0.25 大气压，试计算埋入时氦的质量及半衰期。

答案 8.5g；11年

**解析** 由克拉珀龙方程： $p_0 V = n_0 RT$ ， $p_1 V = n_1 RT$ ，

联立可得： $\frac{p_0}{p_1} = \frac{n_0}{n_1}$ ，即 $n_0 = 4n_1$ 。

又因为 $n_1 = n_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{22}{\tau}}$ ，

解得： $\tau = 11$ 年。

$n_0 - n_1 = 7.5 \times 10^{-2} \text{ mol}$ ，

解得： $n_0 = 0.1 \text{ mol}$ ，

埋入时，氮的质量 $m = n_0 M = 0.1 \times 85 \text{ g} = 8.5 \text{ g}$ 。

故答案为：8.5g；11年。

**标注** 原子与原子核 > 原子核 > 放射性元素的衰变

原子与原子核 > 原子核

42 某放射性元素A，其半衰期为T，原子量为M，经一系列衰变后变成稳定的元素B，B的原子量为m。现测得一块矿石中A和B的质量比为k，设该矿石最初形成时其内不包含元素B，试求此矿石的年龄。

**答案** 
$$\frac{\lg\left(\frac{M+km}{km}\right)}{\lg 2}$$

**解析** 设该矿石最初形成时其内有元素A的原子 $N_0$ 个，并设其现在年龄为t。

现在此矿石内尚留有A元素的原子数为 $N_A = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T}$ ，而已衰变的A元素的原子均变成了B

元素的原子，则矿石中B元素的原子数为 $N_B = N_0 - N_A = N_0 \left[1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T}\right]$ 。

由于此矿石中A元素与B元素的质量比为k，即 $\frac{N_A M}{N_B m} = k$ ，即 $\frac{N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T} M}{N_0 \left[1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T}\right] m} = k$ ；

解得： $\left(\frac{1}{2}\right)^{t/T} = \frac{km}{M+km}$ ，故得此矿石的年龄为： $t = T \frac{\lg\left(\frac{M+km}{km}\right)}{\lg 2}$ 。

故答案为： $\frac{\lg\left(\frac{M+km}{km}\right)}{\lg 2}$ 。

**标注** 近代物理 > 原子核 > 天然放射 > 半衰期

## 七、人工核反应

### 1. 知识点睛

衰变是原子核的自发变化，科学家更希望人工控制原子核的变化。下面我们来介绍人工核反应。



定义

#### 1. 核反应

(1) 原子核在其他粒子的轰击下产生新原子核的过程，称为核反应。



与衰变过程一样，在核反应中，核电荷数和质量数都守恒。

#### (2) 重要的人工核反应

第一次实现原子核的人工转变： ${}_2^4\text{He} + {}_7^{14}\text{N} \rightarrow {}_8^{17}\text{O} + {}_1^1\text{H}$ （发现质子的核反应）

发现中子的核反应： ${}_4^9\text{Be} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_6^{12}\text{C} + {}_0^1\text{n}$

第一次人工制造放射性同位素： ${}_2^4\text{He} + {}_{13}^{27}\text{Al} \rightarrow {}_{15}^{30}\text{P} + {}_0^1\text{n}$

#### 2. 核裂变与核聚变

##### (1) 重核的裂变

① 重核分裂成几个中等质量的原子核，并释放出核能的反应，称为裂变。

② 铀核的裂变： ${}_0^1\text{n} + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{56}^{144}\text{Ba} + {}_{36}^{89}\text{Kr} + 3{}_0^1\text{n}$

（铀的裂变产物有多种可能性，上式只是其中的一种）

③ 一个燃烧的烟头，从点燃一片枯叶开始，会逐渐点燃周围的树木，直到最后烧毁整个森林。与此类似，在一定条件下，由重核裂变产生的中子，再引起新的裂变，就能使核裂变反应不断地进行下去。这种由重核裂变产生的中子使核裂变一代接一代继续下去的过程，叫做核裂变的链式反应。

裂变物质的体积是链式反应能否进行的重要因素。只有当体积足够大时，裂变产生的中子才有足够的概率打中新原子核，使链式反应进行下去。通常把裂变物质能够发生链式反应的最小体积叫做它的临

界体积，相应的质量叫做临界质量。

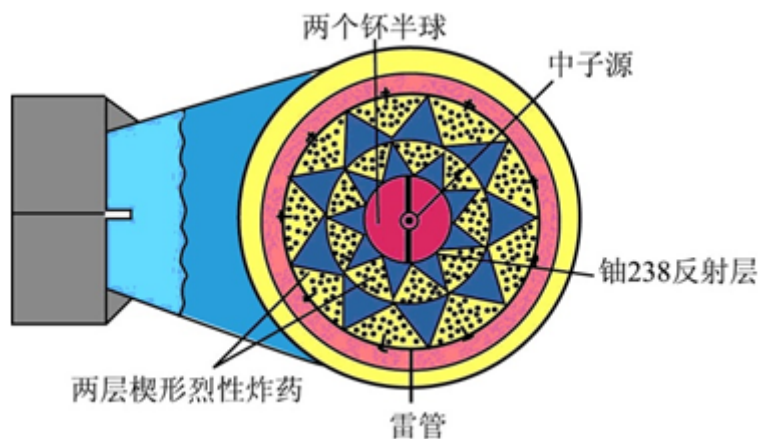
## 2. 阅读材料

原子弹是利用重核裂变的链式反应制成的，在极短时间内能够释放大量的核能，发生猛烈爆炸。

原子弹的燃料是 $^{235}\text{U}$ 或 $^{239}\text{Pu}$ 。在天然铀中只有 $^{235}\text{U}$ ，剩下的99.3%是不易裂变的 $^{238}\text{U}$ 。为得到高浓度的 $^{235}\text{U}$ ，就必须进行同位素分离，形成 $^{235}\text{U}$ 含量较高的浓缩铀。 $^{239}\text{Pu}$ 在自然界并不存在，人们利用核反应堆中产生的中子打击 $^{238}\text{U}$ ，生成物衰变后成为 $^{239}\text{Pu}$ ，然后再利用化学方法将 $^{239}\text{Pu}$ 从 $^{238}\text{U}$ 中分离出来。

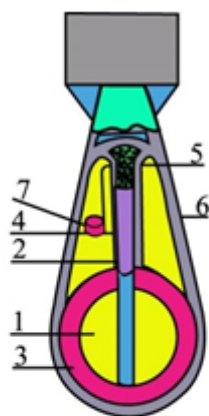
原子弹的结构有“内爆式”和“枪式”两种。

“内爆式”原子弹的构造如图所示。



核燃料一般做成球形，体积小于临界体积。它的外部安放化学炸药，引爆时利用化学炸药爆炸的冲击波将核燃料压缩至高密度的超临界状态，聚心冲击波同时压缩放在核燃料球心的中子源，使它释放中子，引起核燃料的链式反应。为了降低中子逃逸率以减小临界质量，节省核燃料，四周用 $^{238}\text{U}$ 做成中子反射层，使逸出燃料区的部分中子返回。

“枪式”原子弹的构造如图。



1.球形铀块 2.圆柱形铀块  
3.中子反射层 4. 导向槽  
5.普通炸药 6. 原子弹外壳  
7.雷管

枪式原子弹示意图

弹壳里分开放置着一块球形和一块圆柱形高浓度 $^{235}\text{U}$ 。每一块的体积都小于临界体积而大于临界体积的一半，在贮存时不会发生爆炸。这两块 $^{235}\text{U}$ 彼此隔开一段距离，其中球形的被固定，圆柱形的后面安装普通炸药和引爆装置。当普通炸药爆炸时，两块铀压在一起形成一个整块，其体积超过临界体积，立刻发生链式核反应而爆炸。

第二次世界大战时核裂变的研究已经成熟。当时法西斯侵略战争在蔓延，一些科学家，特别是那些从法西斯迫害下逃亡出来的科学家，已经预感到制造原子弹的危险，尤其是风传德国正在加紧链式反应的研究，又获悉德国采取了禁止铀矿石出口等措施，他们更加焦虑万分。1939年7月，核物理学家西拉德（L.Szilard）等人一起找到爱因斯坦，想借助他的名声敦促美国赶在德国之前造出原子弹。于是爱因斯坦在1939年8月2日签署了给美国总统罗斯福的著名信件。罗斯福总统采纳了他们的建议，下令成立了铀顾问委员会，开始了代号为“曼哈顿工程”的原子弹研制工作，并于1942年7月委任奥本海默（J.R.Oppenheimer，1904~1967）为这项工程的技术负责人。

1945年7月16日，第一颗原子弹在新墨西哥州的荒漠上爆炸成功，其爆炸力相当于1.8万吨TNT炸药。爆炸时安放原子弹的钢塔全部熔化，在半径400m的范围内，沙石都被烧成黄绿色的玻璃状物质，半径1600m范围内所有动植物全部死亡。

原子弹的巨大威力震惊了世界，也使反对原子武器的呼声空前高涨。舆论不仅谴责下令使用原子弹的人，也要追究科学家的责任。大部分原子弹研制的倡议者成了反核战争的积极分子，奥本海默本人则辞去了职务，去进行宇宙线的纯科学研究。

### 3. 知识点睛



## (2) 核聚变

① 两个轻核结合成质量较大的核，这样的核反应叫做核聚变。

② 典型的聚变反应： ${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n}$

③ 要使轻核发生聚变，必须使它们的距离达到 $10^{-15}\text{m}$ 以内，核力才能起作用。

由于原子核都带正电，要使它们接近到这种程度，必须克服巨大的库仑斥力。有一种办法是把它们加热到很高的温度。当物质的温度达到几百万开尔文时，剧烈的热运动使得一部分原子核具有足够的动能，可以克服库仑斥力，碰撞时十分接近，发生聚变。因此，聚变又叫热核反应。

实现受控核聚变的难点是，地球上没有任何容器能够经受如此高的温度。目前，热核反应主要用在核武器上，那就是氢弹。氢弹首先由普通炸药引爆原子弹，再由原子弹爆炸产生的高温高压引发热核爆炸。实际上，热核反应在宇宙中时时刻刻地进行着，太阳就是一个巨大的热核反应堆。

④ 聚变与裂变相比有很多优点。

a. 核聚变释放的能量比核裂变更大，轻核聚变产能效率高；

b. 轻核聚变更安全清洁；

c. 地球上聚变燃料的储量丰富，燃料供应充足。

## 4. 例题精讲

43 下面关于原子核的裂变和聚变的说法正确的是（ ）

- A. 铀 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 裂变后的生成物是多种多样的
- B. 目前人类利用核能发电是利用重核裂变放出的能量来发电的
- C. 要使轻原子核发生聚变，必须使它们间的距离至少接近到 $10^{-10}\text{m}$
- D. 太阳发出的光和热主要来自原子核的聚变反应

答案 ABD

解析 略

标注 原子与原子核 > 原子核 > 核裂变与核聚变

44 下列说法正确的是（ ）

- A.  ${}^{15}_7\text{N} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$  是  $\alpha$  衰变
- B.  ${}^1_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$  是核聚变反应
- C.  ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$  是核裂变反应
- D.  ${}^4_2\text{He} + {}^{27}_{13}\text{Al} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0\text{n}$  是原子核的人工转变

答案 BD

解析 略

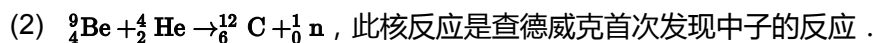
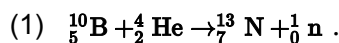
标注 原子与原子核 > 原子核 > 核裂变与核聚变  
原子与原子核 > 原子核

45 完成下列各核反应方程并指出哪个核反应是首次发现质子、中子和正电子的反应。

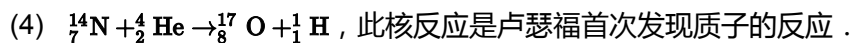
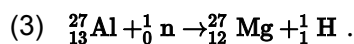
- (1)  ${}^{10}_5\text{B} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{13}_7\text{N} + \underline{\hspace{2cm}}$  .
- (2)  ${}^9_4\text{Be} + \underline{\hspace{2cm}} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$  .
- (3)  ${}^{27}_{13}\text{Al} + \underline{\hspace{2cm}} \rightarrow {}^{27}_{12}\text{Mg} + {}^1_1\text{H}$  .
- (4)  ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + \underline{\hspace{2cm}}$  .
- (5)  ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + \underline{\hspace{2cm}}$  .
- (6)  ${}^{23}_{11}\text{Na} + \underline{\hspace{2cm}} \rightarrow {}^{24}_{11}\text{Na} + {}^1_1\text{H}$  .
- (7)  ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^1_0\text{n} + \underline{\hspace{2cm}}$  ;  ${}^{30}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + \underline{\hspace{2cm}}$  .

- 答案 (1)  ${}^1_0\text{n}$
- (2)  ${}^4_2\text{He}$
- (3)  ${}^1_0\text{n}$
- (4)  ${}^1_1\text{H}$
- (5)  ${}^4_2\text{He}$
- (6)  ${}^2_1\text{H}$
- (7) 1.  ${}^{30}_{15}\text{P}$   
2.  ${}^1_0\text{e}$

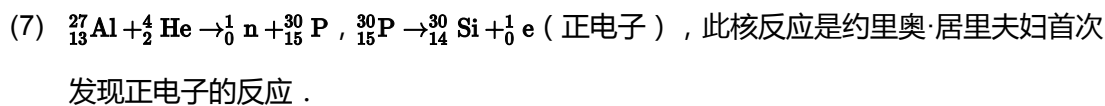
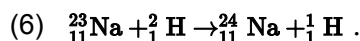
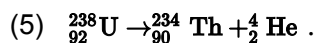
解析



故答案为 :  ${}_{2}^{4}\text{He}$  .



故答案为 :  ${}_{1}^{1}\text{H}$  .



故答案为 :  ${}_{15}^{30}\text{P}$ 、 ${}_{0}^{1}\text{e}$  .

标注

近代物理 > 原子核 > 核反应方程

46

2006年美国和俄罗斯科学家利用回旋加速器, 通过 ${}_{20}^{48}\text{Ca}$  ( 钙48 ) 轰击 ${}_{98}^{249}\text{Cf}$  ( 锎249 ) 发生核反应, 成功合成了第118号元素, 这是迄今为止门捷列夫元素周期表中原子序数最大的元素. 实验表明, 该元素的原子核先放出3个相同的粒子X, 再连续经过3次 $\alpha$ 衰变后, 变成质量数为282的第112号元素的原子核, 则上述过程中的粒子X是 ( )

- A. 中子
- B. 质子
- C. 电子
- D.  $\alpha$ 粒子

答案

A

解析

因为在衰变的过程中质量数守恒, 电荷数守恒.

根据电荷守恒定律可得,  $118 - 3 \times 2 = 112$ , 所以X粒子的电荷量为零.

再根据质量守恒,  $48 + 249 - 4 \times 3 = 282$ , 所以X粒子的质量数为1, 所以该粒子为中子, 故BCD错误, A正确.

故选A.

标注 原子与原子核 > 原子核

- 47 三个原子核 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ ， $X_1$ 核放出一个正电子后变为 $X_2$ 核， $X_2$ 核与质子发生核反应后生成 $X_3$ 核，并放出一个氦核。下列说法正确的是（ ）
- A.  $X_1$ 核比 $X_3$ 核多一个质子
  - B.  $X_1$ 核比 $X_3$ 核少一个中子
  - C.  $X_1$ 核的质量数比 $X_3$ 核的大3
  - D.  $X_1$ 核与 $X_3$ 核的总电荷数是 $X_2$ 核的2倍

答案 CD

解析 略

标注 原子与原子核 > 原子核

## 八、结合能、质量亏损

### 1. 知识点睛

相距很远的两个物体，由于万有引力而相互接近，运动速度越来越大，引力势能转化为动能。最后撞在一起，动能变成它们的内能散失掉了。两个物体为了结合而付出了代价——失去了一些能量。如果要把它们分开，还要重新赋予它们这份能量。上述过程是用宏观物体做的例子，对于核子结合成原子核的过程有类似的情况。

#### 1. 结合能

(1) 原子核是核子凭借核力结合在一起构成的，要把它们分开，也需要能量，这就是原子的结合能。

(2) 显然，组成原子核的核子越多，它的结合能越高。因此，有意义的是它的结合能与核子数之比，称为比结合能，也叫平均结合能。比结合能越大，原子核中核子结合得越牢固，原子核越稳定。

(3) 中等质量的核比结合能较大，原子核较稳定，因此，重核的裂变、轻核的聚变都是放能反应。

#### 2. 质量亏损

实验表明，原子核的质量小于组成它的核子的质量之和，这个现象叫做质量亏损。我们可以通过  $\Delta E = \Delta m_0 c^2$  来计算质量亏损过程中释放出的能量。

此式可以用来计算任意核反应过程中由于质量亏损释放（或吸收的能量）， $\Delta m_0 < 0$  对应放能反应， $\Delta m_0 > 0$  对应吸收能量的反应。一般我们只计算能量的绝对值，再判断吸收还是放出能量。



这里  $\Delta m_0$  是指**静止质量的变化**， $\Delta E$  是指静能转化为的其它形式能，比如光能、动能等。注意：很多教材上质量亏损公式写成  $\Delta E = \Delta mc^2$ ，这里  $\Delta m$  也指静止质量的变化（因为高中一般不考虑相对论效应，没有将总质量与静止质量用不同字母区分）。

关于质量亏损的理解的几点说明：

- (1) 按照相对论理论证明，反应前的总质量严格等于反应后的总质量；
- (2) 相对论中能量  $E = mc^2$ ， $m$  为总质量，且  $E = m_0c^2 + E_k$ ，其中  $E_k$  指粒子所有形式的动能，含光能。
- (3) 综上所述，根据能量守恒可知，质量亏损应指静质量变化
- (4) 通常核反应过程中，粒子运动速度依然远小于光速，近似  $E_k = \frac{1}{2}m_0v^2$ 。

## 2. 例题精讲

48 下面关于结合能和比结合能的说法中，正确的有（ ）

- A. 核子结合成原子核吸收的能量或原子核拆解成核子放出的能量称为结合能
- B. 比结合能越大的原子核越稳定，因此它的结合能也一定越大
- C. 重核与中等质量原子核相比较，重核的结合能和比结合能都大
- D. 中等质量原子核的结合能和比结合能均比轻核的要大

答案 D

**解析** A项，原子核分解成核子时需要的能量为结合能，它等于核子结合成原子核放出的能量，故A项错误；

B项，结合能与核子数之比，称作比结合能，也叫平均结合能。比结合能越大，表示原子核中核子结合得越牢固，原子核越稳定。而结合能与核子数目有关，所以B项错误；

C项，中等质量的原子核比结合能较大，故C项错误；

D项，中等质量的原子核比结合能较大，核子数又较多，所以其结合能比轻核要大，故D项正确。

综上所述，本题正确答案为D。

**标注** 原子与原子核 > 原子核 > 核力与结合能

49 在 $\beta$ 衰变中常伴有一种称为“中微子”的粒子放出，中微子的性质十分特殊，因此在实验中很难探测。1953年，莱尼斯和柯文建造了一个由大水槽和探测器组成的实验系统，利用中微子与水中 ${}^1_1\text{H}$ 的核反应，间接地证实了中微子的存在。

- (1) 中微子与水中的 ${}^1_1\text{H}$ 发生核反应，产生中子和正电子，即中微子 $+{}^1_1\text{H} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^0_{+1}\text{e}$ 。可以判定，中微子的质量数和电荷数分别是（ ）
- A. 0和0  
B. 0和1  
C. 1和0  
D. 1和1
- (2) 上述核反应产生的正电子与水中的电子相遇，与电子形成几乎静止的整体后，可以转变为两个光子，即 ${}^0_{+1}\text{e} + {}^0_{-1}\text{e} \rightarrow 2\gamma$ 。已知正电子和电子的质量都为 $9.1 \times 10^{-31}\text{kg}$ ，反应中产生的每个光子的能量约为 \_\_\_\_\_ J。正电子与电子相遇不可能只转变为一个光子，原因是 \_\_\_\_\_。

**答案**

- (1) A  
(2)  $1.82 \times 10^{-14}$   
2. 遵循动量守恒

**解析**

- (1) 发生核反应前后，粒子的质量数和电荷数均不变，据此可知中微子的质量数和电荷数分都是0，A选项正确。  
故选A。
- (2) 两个电子转变为两个光子之后，质量变为零。  
由 $\Delta E = \Delta mc^2$ ，故一个光子的能量为 $\frac{\Delta E}{2} = 8.2 \times 10^{-14}\text{J}$ 。

正电子与水中的电子相遇，与电子形成几乎静止的整体，故系统总动量为零，所以只产生一个光子是不可能的。

故答案为： $8.2 \times 10^{-14}$ ，遵循动量守恒。

标注 原子与原子核 > 原子核

50 一个静止的 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 核（原子质量为 $232.0372\text{u}$ ），放出一个 $\alpha$ 粒子（原子质量为 $4.00260\text{u}$ ）后，衰变成 ${}_{90}^{228}\text{Th}$ 核（原子质量为 $228.0287\text{u}$ ）。假设放出的结合能完全变成Th核和 $\alpha$ 粒子的动能，试计算 $\alpha$ 粒子的动能。（ $1\text{u}$ 相当于 $931.5\text{MeV}$ ）

答案  $5.41\text{MeV}$

解析 反应中产生的质量亏损：

$$\Delta m = m_{\text{U}} - (m_{\text{Th}} + m_{\alpha}) = 0.0059\text{u},$$

反应中释放的核能：

$$\Delta E = \Delta m \times 931.5\text{MeV} = 5.5\text{MeV},$$

在U核衰变过程中动量守恒，能量守恒，则

$$0 = m_{\alpha}v_{\alpha} - m_{\text{Th}}v_{\text{Th}},$$

$$\Delta E = \frac{1}{2}m_{\alpha}v_{\alpha}^2 + \frac{1}{2}m_{\text{Th}}v_{\text{Th}}^2,$$

解以上两式得：

$$\Delta E = \frac{(m_{\alpha}v_{\alpha})^2}{2m_{\alpha}} + \frac{(m_{\text{Th}}v_{\text{Th}})^2}{2m_{\text{Th}}} = (m_{\alpha}v_{\alpha})^2 \frac{m_{\text{Th}} + m_{\alpha}}{2m_{\alpha}m_{\text{Th}}},$$

则 $\alpha$ 粒子的动能

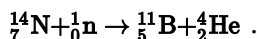
$$\begin{aligned} E_{\alpha} &= \frac{1}{2}m_{\alpha}v_{\alpha}^2 = \frac{m_{\text{Th}}}{m_{\text{Th}} + m_{\alpha}} \Delta E \\ &= \frac{228.0287}{228.0287 + 4.00260} \times 5.5\text{MeV} = 5.41\text{MeV}. \end{aligned}$$

标注 原子与原子核 > 原子核

51 一个静止的 ${}_{7}^{14}\text{N}$ 俘获一个速度 $v = 2.3 \times 10^7\text{m/s}$ 的中子（ ${}_0^1\text{n}$ ）后生成X、Y两个新核，两新核的速度方向相同，X核的质量数 $A_{\text{X}} = 11$ ，速度 $v_{\text{X}} = 1.0 \times 10^6\text{m/s}$ 。两核在同一磁场中做匀速圆周运动时，其半径之比 $\frac{r_{\text{X}}}{r_{\text{Y}}} = \frac{11}{30}$ 。试回答以下问题：Y核是什么？速度是多大？写出核反应方程。

**答案** Y核是 ${}^4_2\text{He}$ ，该核反应方程为： ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + {}^4_2\text{He}$ ， $v_Y = 3.0 \times 10^6 \text{ m/s}$

**解析** 由 ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{11}_5\text{X} + \text{Y}$ 得， $m_X + m_Y = 15 \rightarrow m_Y = 4$ ；由 $r = \frac{mv}{qB}$ 得， $r_X = \frac{m_X v_X}{q_X B}$ ， $r_Y = \frac{m_Y v_Y}{q_Y B}$ ，  
 $\frac{r_X}{r_Y} = \frac{m_X v_X q_Y}{q_X m_Y v_Y} \Leftrightarrow \frac{11}{30} = \frac{11 v_X q_Y}{4 q_X v_Y}$ ，联立 $\begin{cases} 7 = q_X + q_Y \\ mv = m_X v_X + m_Y v_Y \\ \frac{11}{30} = \frac{11 v_X q_Y}{4 q_X v_Y} \end{cases}$ ，解得 $\begin{cases} q_X = 5 \\ q_Y = 2 \\ v_Y = 3 \times 10^6 \text{ m/s} \end{cases}$ ，所以  
 Y为 $\alpha$ 粒子。



故答案为：Y核是 ${}^4_2\text{He}$ ，该核反应方程为： ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + {}^4_2\text{He}$ ， $v_Y = 3.0 \times 10^6 \text{ m/s}$ 。

**标注** 原子与原子核 > 原子核

**52** 静止在匀强磁场中的放射性原子核X衰变为两个粒子a和b，衰变后粒子a的运动速度与磁场垂直。

粒子a和b的轨迹半径之比 $R_a : R_b = 45 : 1$ ，周期之比 $T_a : T_b = 10 : 13$ 。已知该衰变过程中的质量亏损为 $\Delta m$ 。假定衰变过程中释放的核能全部转化成粒子的动能。求：

- (1) 粒子的电荷量之比 $q_a/q_b$ 。
- (2) 粒子的质量之比 $m_a/m_b$ 。
- (3) 原子核X的电荷数Z和质量数A。
- (4) 粒子a的动能 $E_a$ 。

**答案** (1) 1 : 45

(2) 2 : 117

(3)  $Z = 92$ ， $A = 238$

(4)  $\frac{117}{119} \Delta mc^2$

**解析** (1) 裂变过程中，粒子a、b的动量守恒，裂变后有 $m_a v_a - m_b v_b = 0$  ①

a、b在磁场中做匀速圆周运动，洛伦兹力提供向心力 $qvB = m \frac{v^2}{R}$ ，因此 $R = \frac{mv}{qB}$ 。

$$\Rightarrow \frac{R_a}{R_b} = \frac{m_a v_a}{q_a B} \cdot \frac{q_b B}{m_b v_b} \quad ②$$

$$\text{联立①②可得：} \frac{q_a}{q_b} = \frac{R_b}{R_a} = \frac{1}{45}.$$

(2) 粒子运动周期 $T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$ 。

$$\Rightarrow \frac{T_a}{T_b} = \frac{2\pi m_a}{q_a B} \cdot \frac{q_b B}{2\pi m_b}$$



$$\text{可得: } \frac{m_a}{m_b} = \frac{q_a}{q_b} \cdot \frac{T_a}{T_b} = \frac{1}{45} \cdot \frac{10}{13} = \frac{2}{117} .$$

(3) 设 $m_0$ 为一个原子质量单位,  $q_0$ 为元电荷电量, 则

$$\text{X的质量 } m = m_a + m_b = 119km_0$$

$$\text{电荷量 } q = 46k'q_0$$

分析可知当 $k = 2$ ;  $k' = 2$ 时, X为常见的裂变原料 ${}_{92}^{238}\text{U}$ .

即X电荷数 $Z = 92$ , 质量数 $A = 238$ .

$$(4) \quad a、b \text{ 的动能之比 } \frac{E_{ka}}{E_{kb}} = \frac{\frac{1}{2}m_a v_a^2}{\frac{1}{2}m_b v_b^2} = \frac{m_b}{m_a} = \frac{117}{2}$$

$$\text{由质能方程 } E_{ka} + E_{kb} = \Delta E = \Delta mc^2$$

$$\text{联立可得: } E_{ka} = \frac{117}{119} \Delta mc^2 .$$

标注 原子与原子核 > 原子核

53 用放射源钋(Po)发射的 $\alpha$ 粒子打在铍核( ${}_4^9\text{Be}$ )上, 产生一种新的粒子和另一生成物, 这些新粒子组成的粒子流有以下特点:

(1) 在任意方向的磁场中都不偏转;

(2) 让它与含氢物质中的静止氢核相碰撞, 可把氢核击出, 被击出氢核的能量为 $E_H = 4.7\text{MeV}$ ,

让它与含氮物质中的静止氮核相碰撞, 也可把氮核击出, 被击出的氮核的能量为 $E_N = 1.2\text{MeV}$ ,

碰撞可视为对心完全弹性碰撞, 且已知氢核与氮核的质量比为1:14.

试根据以上数据求出新粒子质量与氢核质量之比, 对此新粒子是什么粒子做出判断, 并写出 $\alpha$ 粒子轰击铍核( ${}_4^9\text{Be}$ )的核反应方程式.

答案 未知粒子为中子,  $\alpha$ 粒子轰击铍核( ${}_4^9\text{Be}$ )的核反应方程式为 ${}_4^9\text{Be} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_6^{12}\text{C} + {}_0^1\text{n}$

解析 设 $m_H$ ,  $m_N$ 分别代表氢核与氮核的质量,  $v_H$ ,  $v_N$ 分别表示氢核和氮核被未知粒子碰撞后的速度,  $m$ 表示未知粒子的质量,  $v$ 表示未知粒子碰前的速度,  $v_1$ ,  $v_2$ 分别表示未知粒子与氢、氮核碰撞后的速度, 弹性碰撞中, 系统的动量与机械能守恒, 所以有:

$$\begin{cases} mv = mv_1 + m_H v_H \\ \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + m_H v_H^2 \end{cases}, \begin{cases} mv = mv_2 + m_N v_N \\ \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + m_N v_N^2 \end{cases}$$

$$\text{解得: } v_H = \frac{2mv}{(m + m_H)}, v_N = \frac{2mv}{(m + m_N)},$$

$$E_H = \frac{1}{2}m_H v_H^2, E_N = \frac{1}{2}m_N v_N^2,$$

$$\frac{E_H}{E_N} = \frac{m_H(m + m_N)^2}{m_N(m + m_H)^2} \Rightarrow \frac{m}{m_H} = 1.03, \text{ 且该种粒子在任意方向的磁场中都不偏转, 所以可知不}$$

带电, 所以该粒子为一个中子.

核反应方程式为:  ${}_4^9\text{Be} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_6^{12}\text{C} + {}_0^1\text{n}$ .

故答案为:  ${}_4^9\text{Be} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_6^{12}\text{C} + {}_0^1\text{n}$ .

标注

原子与原子核 > 原子核