

第4节 质谱仪与回旋加速器

课时学习素养目标：1.知道质谱仪、回旋加速器的基本构造、原理及用途。（物理观念）

2.会分析质谱仪和回旋加速器的工作过程。（科学思维）

任务学习一 质谱仪

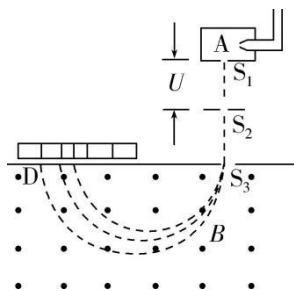
在科学研究和工业生产中，常需要将一束带电荷量相同、质量不同的粒子分开，以便知道其中所含物质的成分。如何利用电场和磁场对带电粒子的作用，来实现这个目的？



【答案】利用电场让带电粒子获得一定速度，利用磁场使粒子做圆周运动。由 $r = \frac{mv}{qB}$ 可知，做圆周运动的半径 r 与质量 m 有关，如果 B 、 v 相同， m 不同，则 r 不同，这样就可以把不同的粒子分开。

新知梳理

1.原理图：如图所示。



2. 加速

带电粒子进入质谱仪的加速电场，由动能定理得

_____。

【答案】 $qU = \frac{1}{2}mv^2$

3. 偏转

带电粒子进入质谱仪的偏转磁场做匀速圆周运动，洛伦兹力提供向心力，

$qvB = \frac{mv^2}{r}$ ，可得 $r =$ _____。

【答案】 $\frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$

4. 分析：从粒子打在底片上的位置可以测出圆周的半径，进而可以算出粒子的比荷 $\frac{q}{m}$ 。

5. 用途：质谱仪是测量带电粒子的质量和分析_____的重要工具。

【答案】 同位素

思考交流

判断下列说法正误。

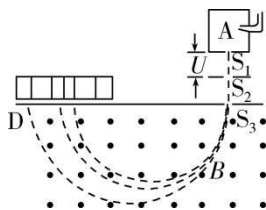
- (1) 因不同原子核的质量不同，所以同位素在质谱仪中的轨迹半径不同。()
 (2) 利用质谱仪可以测算粒子的比荷。()

【答案】 (1) ✓

(2) ✓

典例精讲

例 1 质谱仪的工作原理如图所示。一个质量为 m 、电荷量为 $q (q > 0)$ 的粒子，从容器 A 下方的小孔 S_1 飘入电压为 U 的加速电场中。



- (1) 粒子经 S_3 进入磁场的速率是多少？
 (2) 粒子在匀强磁场中运动的轨道半径是多少？
 (3) 打在底片上的位置到 S_3 的距离多大？

【答案】 (1) $\sqrt{\frac{2qU}{m}}$

(2) $\frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$

(3) $\frac{2}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$

【解析】

(1) S_1 、 S_2 之间的电场使粒子加速，由动能定理有 $qU = \frac{1}{2}mv^2$ ，故 $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$ 。

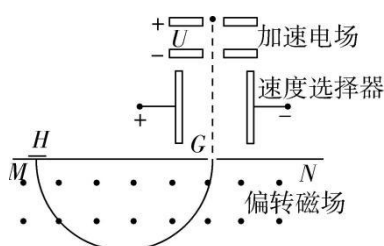
(2) 粒子在匀强磁场中运动时做匀速圆周运动，有 $qvB = m\frac{v^2}{r}$ ，解得 $r = \frac{mv}{qB} =$

$\frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$ 。

(3) 打在底片上的位置到 S_3 的距离 $l = 2r = \frac{2}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$ 。

迁移应用

1. 质谱仪原理示意图如图所示，电荷量为 q 、质量为 m 的带正电的粒子从静止开始经过电压为 U 的加速电场后进入速度选择器。速度选择器中存在相互垂直的匀强电场和匀强磁场，匀强电场的电场强度为 E 、方向水平向右。已知带电粒子能够沿直线穿过速度选择器，从 G 点垂直于 MN 进入偏转磁场，该偏转磁场是一个以直线 MN 为边界、方向垂直于纸面向外的匀强磁场。带电粒子经偏转磁场后，最终到达照相底片的 H 点。可测量出 G 、 H 间的距离为 L ，带电粒子的重力可忽略不计。求：



- (1) 粒子从加速电场射出时速度 v 的大小。
- (2) 速度选择器中匀强磁场的磁感应强度 B_1 的大小和方向。
- (3) 偏转磁场的磁感应强度 B_2 的大小。

【答案】 (1) $\sqrt{\frac{2qU}{m}}$

(2) $E \sqrt{\frac{m}{2qU}}$ ；垂直于纸面向外

(3) $\frac{2}{L} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$

【解析】

(1) 在加速电场中，有 $qU = \frac{1}{2}mv^2$ ，解得 $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$ 。

(2) 粒子在速度选择器中受到向右的电场力，电场力应与洛伦兹力平衡，故磁感应强度 B_1 的方向应该垂直于纸面向外，由 $qE = qvB_1$ 得 $B_1 = \frac{E}{v} = E \sqrt{\frac{m}{2qU}}$ 。

(3) 粒子在偏转磁场中的轨道半径 $r = \frac{1}{2}L$ ，由 $r = \frac{mv}{qB_2}$ ，得 $B_2 = \frac{2}{L} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$ 。

任务学习二 回旋加速器

科研人员在研究原子核内部结构时，需要利用高速粒子对其进行“轰击”，将“核”打开。直线加速器，让带电粒子在多级电场的作用下进行多次加速，这就导致整个加速器延伸得相当长。

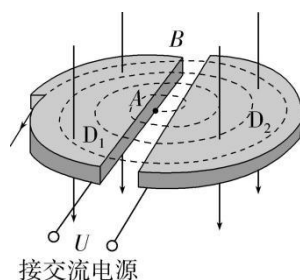
思考：如何对直线加速器进行改进，缩小装置所占用的空间？

【答案】使加速过的粒子转回来再次加速，如此往复多次加速，就能大大缩小装置所占据的空间。而洛伦兹力恰好能够让带电粒子在磁场中做圆周运动，从而达到“转回来”的目的。故可以利用磁场控制轨道，利用电场进行加速。

新知梳理

1. 回旋加速器的结构

两个中空的_____ D_1 和 D_2 ，处于与盒面垂直的匀强磁场中， D_1 和 D_2 间有一定的电势差，如图所示。



【答案】半圆金属盒

2. 回旋加速器原理：带电粒子在D形盒中只受_____的作用而做_____运动，运动半周后带电粒子到达D形盒狭缝，并被狭缝间的_____加速，加速后的带电粒子进入另一D形盒，由粒子在洛伦兹力作用下做圆周运动的半径公式 $r = \frac{mv}{Bq}$ 知，它运动的半径将增大，由周期公式 $T = \frac{2\pi m}{qB}$ 可知，其运动周期与速度无关，即它运动的周期_____，它运动半个周期后又到达狭缝再次被加速，如此继续下去，带电粒子不断地被加速。

【答案】洛伦兹力； 匀速圆周； 电场； 不变

自主思考。判断下列说法正误。

- (1) 相比于多级直线加速器，回旋加速器的优点是占用空间小。（ ）
- (2) 随着粒子速度的增加，回旋加速器两盒间电势差的正负改变应该越来越快，以便使粒子经过盒缝处刚好被加速。（ ）

【答案】 (1) \checkmark

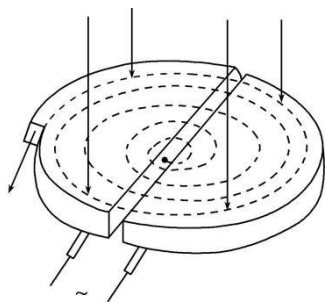
(2) \times

【解析】

(2) 粒子在磁场中运动的周期决定了交流电压的周期，粒子速度增加，粒子在磁场中运动的周期不变，则回旋加速器两盒间电势差的正负改变快慢不变。

典例精讲

例2 多选题 回旋加速器是加速带电粒子的装置，其核心部分是与高频交流电源相连接的两个D形金属盒。两盒间的狭缝中形成的周期性变化的电场，使粒子在通过狭缝时都能得到加速。两个D形金属盒处于垂直于盒面的匀强磁场中，如图所示，要增大带电粒子射出时的动能，则下列说法正确的是（ ）



- A. 增大D形金属盒间的加速电压 B. 增大磁场的磁感应强度
C. 增加周期性变化的电场的频率 D. 增大D形金属盒的半径

【答案】BD

【解析】粒子最后射出时的旋转半径为D形金属盒的半径 R ， $R = \frac{mv}{qB}$ ， $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2B^2R^2}{2m}$ 。可见，要增大粒子射出时的动能，应增大磁感应强度 B 和D形金属盒的半径 R ，B、D正确。

总结归纳

1. 交流电压的周期：与带电粒子在磁场中做匀速圆周运动的周期相同($T = \frac{2\pi m}{qB}$)。

2. 带电粒子的最终动能：由 $r = \frac{mv}{qB}$ 知，当带电粒子的运动半径最大时，其速度也

最大，若D形盒半径为 R ，则带电粒子的最终动能 $E_{km} = \frac{q^2B^2R^2}{2m}$ 。可见，要提高被加速粒子的最终动能，应尽可能地增大磁感应强度 B 和D形盒的半径 R 。

3. 粒子被加速次数的计算：粒子在回旋加速器中被加速的次数 $n = \frac{E_{km}}{Uq} = \frac{B^2qR^2}{2Um}$ (U 是加速电压的大小)，一个周期加速两次。

4. 粒子在回旋加速器中运动的时间：在电场中运动的时间为 t_1 ，在磁场中运动的时间为 $t_2 = \frac{n}{2}T = \frac{n\pi m}{qB} = \frac{\pi BR^2}{2U}$ (n 是粒子被加速的次数)，总时间为 $t = t_1 + t_2$ ，

因为 $t_1 \ll t_2$ ，一般认为粒子在回旋加速器内运动的时间近似等于 t_2 。

迁移应用

2. 回旋加速器 D 形盒中为质子流，D 形盒的交流电压为 U ，静止质子经电场加速后，进入 D 形盒，其最大轨道半径为 R ，磁场的磁感应强度为 B ，质子质量为 m 、电荷量为 e 。求：

- (1) 质子最初进入 D 形盒的动能；
- (2) 质子经回旋加速器最后得到的动能；
- (3) 交流电源的周期。

【答案】 (1) eU

(2) $\frac{e^2 B^2 R^2}{2m}$

(3) $\frac{2\pi m}{eB}$

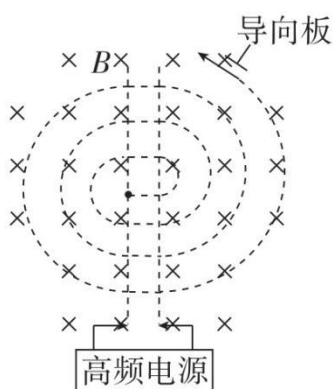
【解析】

(1) 质子在电场中加速，由动能定理得 $eU = E_k - 0$ ，解得 $E_k = eU$ 。

(2) 质子在回旋加速器的磁场中运动的最大半径为 R ，有 $evB = m\frac{v^2}{R}$ ① 质子的最大动能 $E_{k\max} = \frac{1}{2}mv^2$ ② 由①②解得 $E_{k\max} = \frac{e^2 B^2 R^2}{2m}$

(3) 交流电源的周期等于质子的运动周期，由 $evB = m\frac{v^2}{r}$ 和 $T = \frac{2\pi r}{v}$ 得 $T = \frac{2\pi m}{eB}$ 。

3. 如图是回旋加速器示意图，置于真空中的两 D 形金属盒的半径为 R ，盒间有一较窄的狭缝，狭缝宽度远小于 D 形盒的半径，狭缝间所加交流电压的频率为 f ，电压大小恒为 U ，D 形盒中匀强磁场方向如图所示。在左侧 D 形盒圆心处放有粒子源，产生的带电粒子的质量为 m ，电荷量为 q 。设带电粒子从粒子源进入加速电场时的初速度为零，不计粒子重力。求：



- (1) D 形盒中匀强磁场的磁感应强度 B 的大小。
- (2) 粒子能获得的最大动能 E_{km} 。

(3) 粒子被加速的次数 n 。

【答案】 (1) $\frac{2\pi fm}{q}$

(2) $2\pi^2 R^2 f^2 m$

(3) $\frac{2\pi^2 R^2 f^2 m}{qU}$

【解析】

(1) 粒子做圆周运动的周期与交流电的周期相等, 则有 $T = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{1}{f}$, 解得 $B =$

$$\frac{2\pi fm}{q}$$

(2) 当粒子运动的半径达到 D 形盒的半径时, 速度最大, 动能也最大, 有 $qvB = m\frac{v^2}{R}$, 则 $v = \frac{qBR}{m}$ 最大动能为 $E_{\text{km}} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\left(\frac{qBR}{m}\right)^2 = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m} = 2\pi^2 R^2 f^2 m$

(3) 粒子经 n 次加速后达到最大动能, 有 $nqU = E_{\text{km}}$ 得 $n = \frac{E_{\text{km}}}{Uq} = \frac{2\pi^2 R^2 f^2 m}{qU}$