



第10讲

带电粒子

在复合场中的运动



课标内容要求

1. 能够分析带电粒子在同时具有电场磁场复合场中的运动，并且能够掌握解决该类问题的方法。
2. 了解同时具有电场和磁场的仪器，理解其工作原理和用途，能够分析带电粒子在此类仪器中的运动，并且能够解决相关问题。

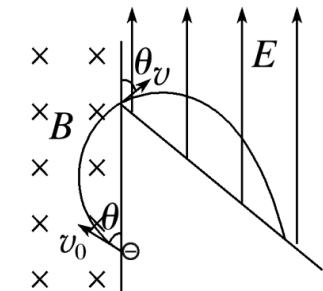
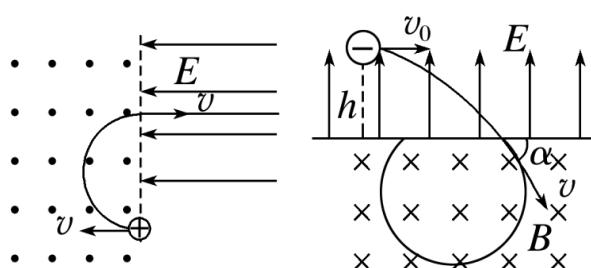
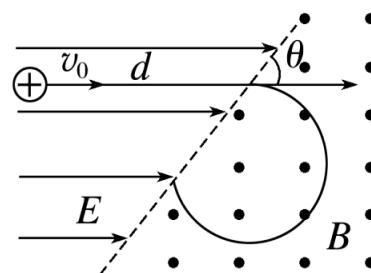


考点一 带电粒子在复合场中的运动

核心提炼

带电粒子在组合场的运动

1) 组合场: 电场与磁场各位于一定的区域内, 并不重叠, 或在同一区域, 电场与磁场交替出现



2) 分析思路

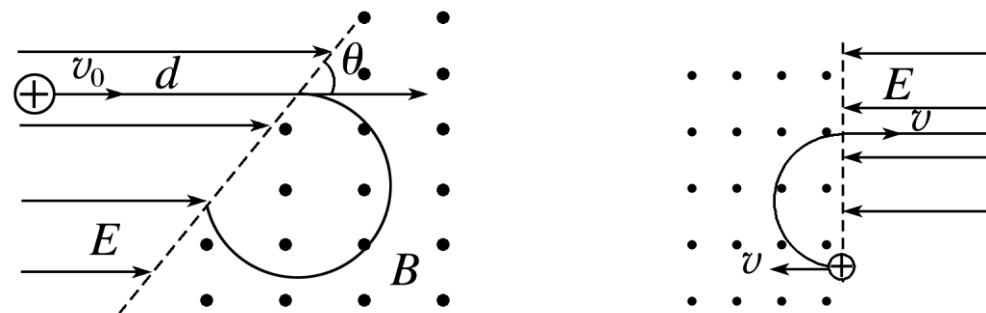
- ①画运动轨迹: 根据受力分析和运动学分析, 大致画出粒子的运动轨迹图
- ②找关键点: 确定带电粒子在场区边界的速度(包括大小和方向)
- ③划分过程: 将粒子运动的过程划分为几个不同的阶段, 对不同的阶段选取不同的规律处理

核心提炼

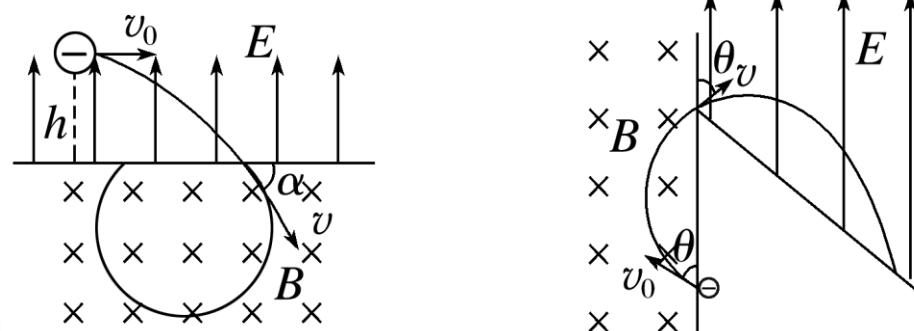
带电粒子在组合场的运动

3) 典型类型

① 带电粒子在匀强电场中做匀加速直线运动，在匀强磁场中做匀速圆周运动

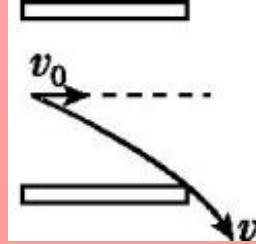
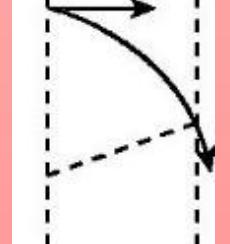


② 带电粒子在匀强电场中做类平抛(或类斜抛)运动，在磁场做匀速圆周运动



核心提炼

带电粒子在匀强电场和匀强磁场中偏转的比较

运动形式 比较项目	带电粒子在匀强电场中偏转($v_0 \perp E$)	带电粒子在匀强磁场中偏转($v_0 \perp B$)
受力特点	受到恒定的电场力, 电场力做功	受洛伦兹力作用, 但洛伦兹力不做功
运动特征	类平抛运动	匀速圆周运动
研究方法	牛顿运动定律、匀变速运动公式、 运动分解、功能关系	牛顿运动定律、向心力公式、圆的几何知识
表达方式	飞出电场的时间: $t = \frac{x}{v_0}$ 打在极板上的时间: $t = \sqrt{\frac{2y}{a}}$ 偏移量: $y = \frac{1}{2}at^2$ 偏转角 θ 满足: $\tan \alpha = \frac{v_y}{v_x}$	时间 $t = \frac{\theta}{2\pi}T$ (θ 是圆心角, T 是周期) 偏转角 θ 满足: $\sin \theta = \frac{l}{R}$ (l 是磁场宽度, R 是粒子轨道半径)
运动情景		

在磁场中 $qvB = m \frac{v^2}{r}$

由几何关系 $\sin 30^\circ = \frac{r-a}{r}$

真题研析·规律探寻

(2023·全国·高考真题)如图,一磁感应强度大小为 B 的匀强磁场,方向垂直于纸面(xOy 平面)向里,磁场右边界与 x 轴垂直。一带电粒子由 O 点沿 x 正向入射到磁场中,在磁场另一侧的 S 点射出,粒子离开磁场后,沿直线运动打在垂直于 x 轴的接收屏上的 P 点; $SP=l$, S 与屏的距离为 $l/2$,与 x 轴的距离为 a 。如果保持

复合场中 $Eq = qvB$

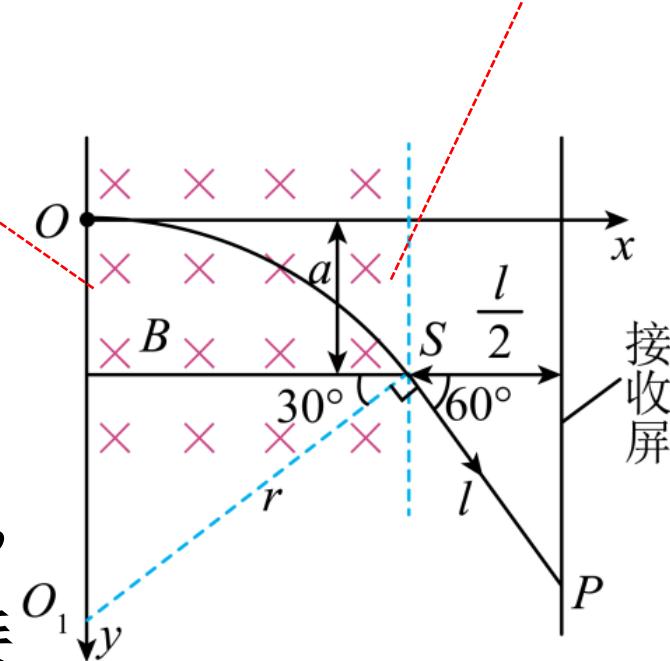
在磁场区域再加上电场强度大小为 E 的匀强电场,该粒子入射后则会沿 x 轴到达接收屏。该粒子的比荷为 (A)

A. $\frac{E}{2aB^2}$

B. $\frac{E}{aB^2}$

C. $\frac{B}{2aE^2}$

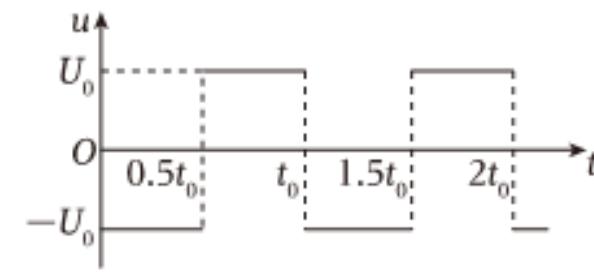
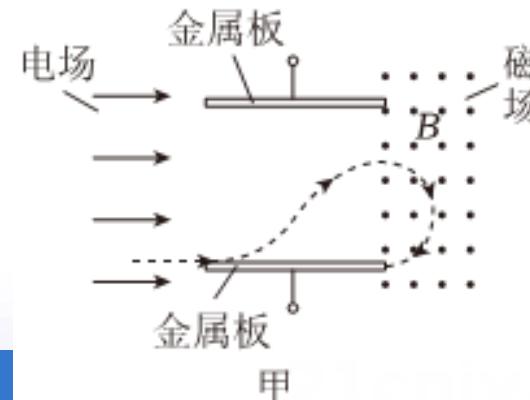
D. $\frac{B}{aE^2}$



真题研析

(2024·广东·高考真题)两块平行正对的金属板水平放置，板间加上如图乙所示幅值为 U_0 、周期为 t_0 的交变电压，金属板左侧存在一水平向右的恒定匀强电场，右侧分布着垂直纸面向外的匀强磁场，磁感应强度大小为 B 。一带电粒子在 $t=0$ 时刻从左侧电场某处由静止释放，在 $t=t_0$ 时刻从下板左端边缘位置水平向右进入金属板间的电场内，在 $t=2t_0$ 时刻第一次离开金属板间的电场、水平向右进入磁场，并在 $t=3t_0$ 时刻从下板右端边缘位置再次水平进入金属板间的电场。已知金属板的板长是板间距离的 $\frac{\pi}{3}$ 倍，粒子质量为 m ，忽略粒子所受的重力和场的边缘效应。

- (1) 判断带电粒子的电性并求其所带的电荷量 q
- (2) 求金属板的板间距离 D 和带电粒子在 $t=t_0$ 时刻的速度大小 v
- (3) 求从 $t=0$ 时刻开始到带电粒子最终碰到上金属板的过程中，电场力对粒子做的功 W



甲

乙

真题研析

解：（1）带电粒子在电场中做加速运动，由此可分析出粒子带正电；

根据题意可知，带电粒子在磁场中做圆周运动的时间为 t_0 ，根据牛顿第二定律可得：

$$qvB = \frac{mv^2}{r}, T = \frac{2\pi r}{v}$$

$$\text{联立解得: } T = \frac{2\pi m}{qB}$$

$$\text{结合题意可得: } t_0 = \frac{1}{2}T = \frac{\pi m}{qB}$$

$$\text{解得: } q = \frac{\pi m}{Bt_0}$$

（2）粒子在金属板间水平方向上做匀速直线运动，竖直方向上先做加速运动，后做减速运动，设粒子的初速度为 v ，根据运动特点可知带电粒子在 $t=t_0$ 时刻的速度大小也为 v ，

$$\text{则 } vt_0 = \frac{\pi}{3}D, y = 2 \times \frac{1}{2} \times \frac{qU_0}{mD} \times \left(\frac{t_0}{2}\right)^2$$

粒子在磁场中运动，其受到的洛伦兹力提供向心力，则 $qvB = \frac{mv^2}{R}$ 根据几何关系可得： $y=2R$

$$\text{联立解得: } v = \sqrt{\frac{\pi^3 U_0}{24 B t_0}}, D = \sqrt{\frac{3\pi U_0 t_0}{8B}}$$

真题研析

(3) 根据上述分析可得: $y = 2 \times \frac{1}{2} \times \frac{qU_0}{mD} \times \left(\frac{t_0}{2}\right)^2 = \frac{2D}{3}$

根据运动的对称性, 粒子会在与圆轨迹的最高点的位置进入金属板, 且再经过 $\frac{t_0}{2}$ 会到达上极板,
竖直方向上的速度为: $v_y = \frac{qU_0}{mD} \times \frac{t_0}{2}$

根据动能定理可得: $W = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}mv_y^2$

联立解得: $W = \frac{\pi^3 m U_0}{48 B t_0} \left(1 + \frac{16}{\pi^2}\right)$

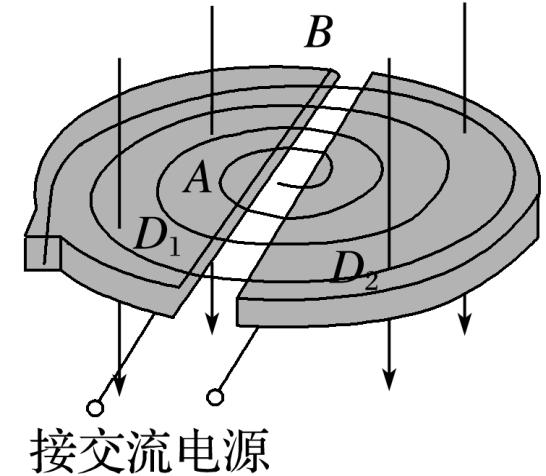


考点二 带电粒子在复合场仪器中的运动

核心提炼

回旋加速器

- 1) 构造: 如图所示, D_1 、 D_2 是半圆金属盒, D形盒处于匀强磁场中, D形盒的缝隙处接交流电源.
- 2) 原理: 交流电周期和粒子做圆周运动的周期相等, 使粒子每经过一次D形盒缝隙, 粒子被加速一次.
- 3) 最大动能: 由 $qvB = \frac{mv_m^2}{r}$ 、 $E_{km} = \frac{1}{2}mv_m^2$ 得 $E_{km} = \frac{q^2B^2R^2}{2m}$,
粒子获得的最大动能由磁感应强度B和盒半径R决定, 与加速电压无关.
- 4) 总时间: 粒子在磁场中运动一个周期, 被电场加速两次, 每次增加动能 qU , 加速次数 $n = \frac{E_{km}}{qU}$, 粒子在磁场中运动的总时间 $t = \frac{n}{2}T = \frac{E_m}{2qU} \cdot \frac{2\pi m}{qB} = \frac{\pi R^2}{U}$
(忽略粒子在狭缝中运动的时间)



核心提炼

质谱仪

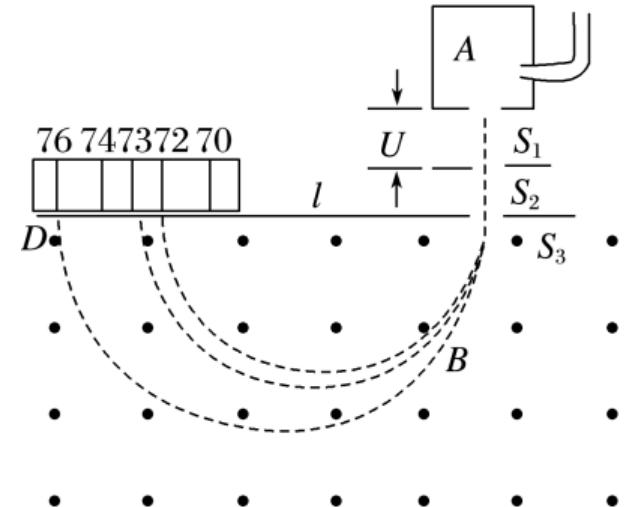
1) 作用: 测量带电粒子质量和分离同位素.

2) 原理(如图所示)

I、加速电场: $qU = \frac{1}{2}mv^2$

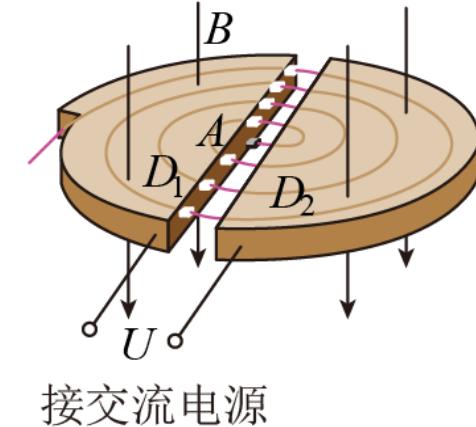
II、偏转磁场: $qvB = \frac{mv^2}{r}$, $l = 2r$

由以上两式可得 $r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$, $m = \frac{qr^2B^2}{2U}$, $\frac{q}{m} = \frac{2U}{B^2r^2}$



题型特训

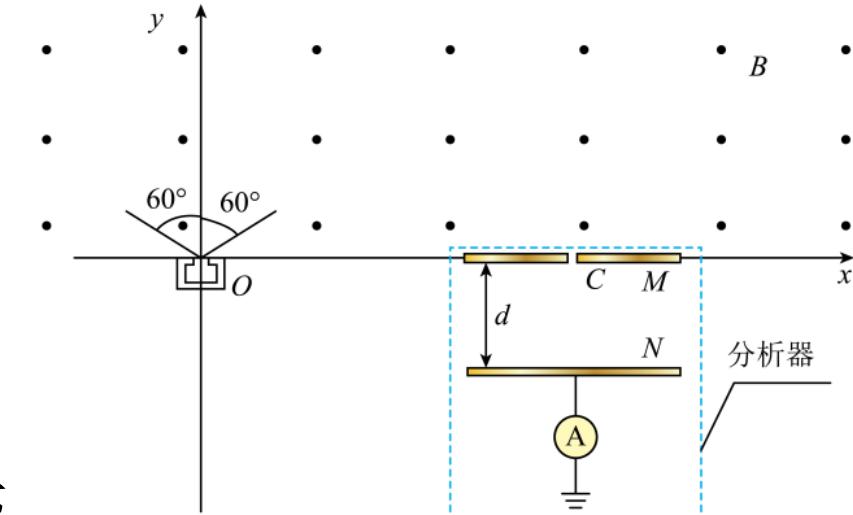
(2023·黑龙江·校联考模拟预测)(多选) 1932年,劳伦斯和利文斯顿设计出了回旋加速器,其工作原理如图所示,置于高真空中的D形金属盒半径为R,两盒间接交流电源,两盒间的狭缝很小,带电粒子穿过狭缝的时间可以忽略不计,磁感应强度为B的匀强磁场与盒面垂直,A处粒子源产生的质量为m、电荷量为q的质子(初速度很小,可以忽略)在加速器中被加速,加速电压为U,加速过程中不考虑相对论效应和重力作用。则 (BD)



- A. 交流电源的周期为 $\frac{\pi m}{qB}$
- B. 质子第二次和第一次经过D型盒间狭缝后轨道半径之比为 $\sqrt{2}:1$
- C. 质子在电场中被加速的次数最多为 $\frac{qB^2 R^2}{4mU}$
- D. 质子从静止开始加速到出口处所需的时间为 $\frac{\pi BR^2}{2U}$

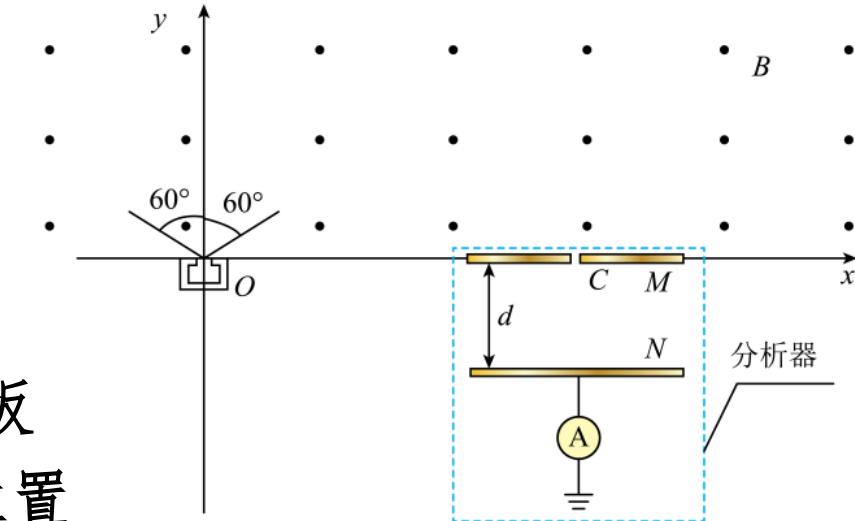
题型特训

(2023·浙江·高考真题) 探究离子源发射速度大小和方向分布的原理如图所示。 x 轴上方存在垂直 xOy 平面向外、磁感应强度大小为 B 的匀强磁场。 x 轴下方的分析器由两块相距为 d 、长度足够的平行金属薄板 M 和 N 组成，其中位于 x 轴的 M 板中心有一小孔 C (孔径忽略不计)， N 板连接电流表后接地。位于坐标原点 O 的离子源能发射质量为 m 、电荷量为 q 的正离子，其速度方向与 y 轴夹角最大值为 60° ；且各个方向均有速度大小连续分布在 $\frac{1}{2}v_0$ 和 $\sqrt{2}v_0$ 之间的离子射出。已知速度大小为 v_0 、沿 y 轴正方向射出的离子经磁场偏转后恰好垂直 x 轴射入孔 C 。未能射入孔 C 的其它离子被分析器的接地外罩屏蔽(图中没有画出)。不计离子的重力及相互作用，不考虑离子间的碰撞。



题型特训

- (1) 求孔C所处位置的坐标 x_0 ;
- (2) 求离子打在N板上区域的长度L;
- (3) 若在N与M板之间加载电压, 调节其大小, 求电流表示数刚为0时的电压;
- (4) 若将分析器沿着x轴平移, 调节加载在N与M板之间的电压, 求电流表示数刚为0时的电压与孔C位置坐标x之间关系式。



【答案】(1) $\frac{2mv_0}{qB}$ (2) $2d$ (3) $\frac{mv_0^2}{2q}$ (4) 当 $\frac{mv_0}{2qB} \leq x \leq \frac{2\sqrt{2}mv_0}{qB}$ 时, $U_x = \frac{qB^2x^2}{8m}$