

高考物理命题热点——质谱仪

丁庆红

杨昌梅

质谱仪是将物质粒子转换成离子并通过适当的电场、磁场将它们按空间位置、时间先后、飞行轨道稳定与否实现荷质比分离，并检测强度后进行物质成分分析的仪器。质谱仪主要由进样系统、真空系统、电学系统、检测系统和数据处理分析系统组成。质谱方法最早于 1913 年由 J. J. 汤姆逊确定，以后经 F. W. 阿斯顿等人改进完善。现代质谱仪经过不断改进，仍然利用电磁学原理，使离子束按荷质比分离。质谱仪的性能指标是它的分辨率，如果质谱仪恰能分辨质量 m 和 $m+\Delta m$ ，分辨率定义为 $m/\Delta m$ 。现代质谱仪的分辨率很高，可测量原子质量精确到小数点后 7 位数字。

目前常用的质谱分析技术有以下四种：离子阱质谱、飞行时间质谱、四级杆质谱和傅立叶变换离子回旋共振质谱。

质谱仪最重要的应用是分离同位素并测定它们的原子质量及相对丰度。测定原子质量的精度超过化学测量方法，大约 2/3 以上的原子的精确质量是用质谱方法测定的。由于质量和能量的当量关系，由此可得到有关核结构与核结合能的知识。对于可通过矿石提取的放射性衰变产物元素的分析测量，可确定矿石的地质年代。质谱方法还可用于有机化学分析，特别是微量杂质分析/测量分子的分子量，为确定化合物的分子式和分子结构提供了可靠依据。由于化合物有着像指纹一样的独特质谱，质谱仪在工业生产中也得到了广泛应用。

近年来，对质谱仪的考查成了高考理科综合物理学科的命题热点。

一、高考物理试题注重考查质谱仪的工作原理

【例 1】（2001 年全国理综）图 1 是测量带电粒子质量的仪器工作原理示意图。方法是某有机化合物的气态分子导入图 1 所示的容器 A 中，使它受到电子束轰击，失去一个电子变成正一价的分子离子。分子离子从狭缝 s_1 以很小的速度进入电压为 U 的加速电场区（初速不计），加速后，再通过狭缝 s_2 、 s_3 射入磁感强度为 B 的匀强磁场，方向垂直于磁场区的界面 PQ。最后，分子离子打到感光片上，形成垂直于纸面而且平行于狭缝 s_3 的细线。若测得细线到狭缝 s_3 的距离为 d ，导出分子离子的质量 m 的表达式。

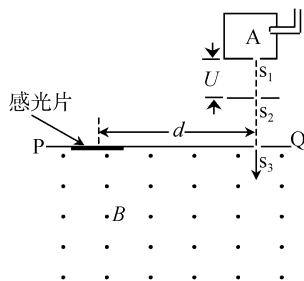


图 1

【解析】以 m 、 q 分别表示离子的质量和电量，以 v 表示离子从狭缝 s_2 射出时的速度，由动能定理可得 $qU=(1/2)mv^2$ ，射入磁场后，在洛伦兹力作用下做圆周运动，由牛顿定律可得 $qvB=mv^2/R$ ，式中 R 为圆的半径。感光片上的细线到 s_3 狭缝的距离 $d=2R$ ，解得 $m=qB^2d^2/8U$ 。

【点评】本题考查有机质谱仪的基本工作原理：以电子轰击或其他方式使被测物质离子化，形成各种荷质比 (e/m) 的离子，然后利用电磁学原理使离

电偶极 (E_1) 跃迁成分的多少，决定了旋光角的大小，对于 Tl 原子气体在 1283nm 的跃迁附近一个吸收长度上的 PNC 效应的旋光角度约为 10^{-7} 弧度 (rad)；Pb 原子气体在 1279nm 的跃迁附近一个吸收长度上的 PNC 效应的旋光角度约为 10^{-6} rad；对于 Bi 原子气体在 648nm 的跃迁附近一个吸收长度上的 PNC 效应的旋光角度约为 10^{-7} rad；而钐原子气体在 639nm 跃迁处的 PNC 效

应旋光角更小，约为 10^{-11} rad。这方面的实验与数值计算近年来颇受重视。

近年来，随着光电检测技术的飞速发展、仪器设备分辨本领越来越高，平面偏振光偏转角度测量得更加精确，这无疑拓宽了此项技术的应用领域，为其得到更广泛的应用提供了技术支持，使其得到了更广阔的发展空间。

（济南市山东中医药大学理工学院 250355）

子按不同荷质比分离并测量各种离子的强度，从而确定被测物质的分子量和结构。有机质谱仪主要用于有机化合物的结构鉴定，它能提供化合物的分子量、元素组成以及官能团等结构信息，可广泛用于有机化学、生物学、地球化学、核工业、材料科学、环境科学、医学卫生、食品化学、石油化工等领域以及空间技术和公安工作等特种分析方面。

二、高考物理试题注重考查质谱仪的结构

[例 2] (2000 年广东卷) 图 2 所示为一种可用于测量电子电量 e 与质量 m 比例 e/m 的阴极射线管，管内处于真空状态。图中 L 是灯丝，当接上电源

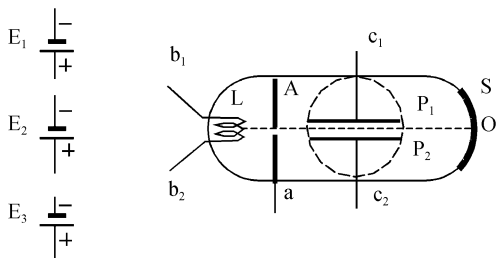


图 2

时可发出电子。A 是中央有小圆孔的金属板，当 L 和 A 间加上电压时（其电压值比灯丝电压大很多），电子将被加速并沿图中虚直线所示的路径到达荧光屏 S 上的 O 点，发出荧光。P₁、P₂ 为两块平行于虚直线的金属板，已知两板间距为 d 。在虚线所示的圆形区域内可施加一匀强磁场，已知其磁感强度为 B ，方向垂直纸面向外。a、b₁、b₂、c₁、c₂ 都是固定在管壳上的金属引线，E₁、E₂、E₃ 是三个电压可调并可读出其电压值的直流电源。

(1) 试在图中画出三个电源与阴极射线管的有关引线的连线。

(2) 导出计算 e/m 的表达式，要求用应测物理量及题给已知量表示。

[解析] (1) 各电源的连线如图 3 所示。

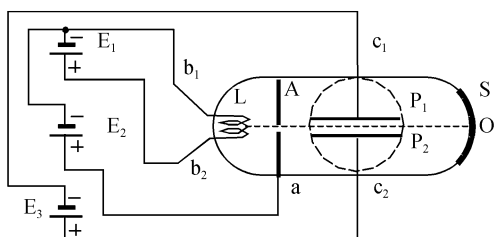


图 3

(2) 设加速电压为 U_2 ，电子加速后穿过小孔的速度为 v ，则有

$$eU_2 = (1/2)mv^2. \quad (1)$$

施加磁场后，要使电子仍打在 O 点，应在 P₁、P₂ 之间加上适当的电压 U_3 ，使电子所受的电场力和洛伦兹力平衡，有

$$(U_3/d)e = eBv, \quad (2)$$

由 (1) (2) 两式可解得 $e/m = U_3^2 / 2U_2B^2d^2$ 。

[点评] 解决本题的关键是弄清其测量原理，了解各装置的作用：(1) 需要一电源对灯丝供电，发射电子；(2) 需要一电源提供加速电压，对电子加速；(3) 需要一电源提供偏转电压，加在偏转极板之间；这样才能在图中正确画出三个电源与阴极射线管的有关引线的连线。

三、高考物理试题注重考查质谱仪的实验测量步骤

[例 3] (2007 年广东卷) 带电粒子的荷质比 q/m 是一个重要的物理量。某中学物理兴趣小组设计了一个实验，探究电场和磁场对电子运动轨迹的影响，以求得电子的荷质比，实验装置如图 4 所示。

① 他们的主要实验步骤如下：

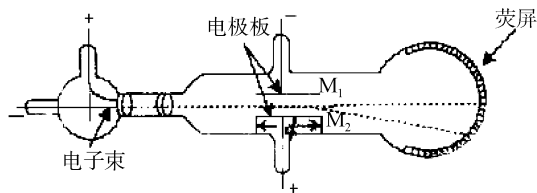


图 4

A. 首先在两极板 M₁M₂ 之间不加任何电场、磁场，开启阴极射线管电源，发射的电子从两极板中央通过，在荧幕正中心处观察到一个亮点；

B. 在 M₁M₂ 两极板间加合适的电场：加极性如图所示的电压，并逐步调节增大，使荧幕上的亮点逐渐向荧幕下方偏移，直到荧幕上恰好看不到亮点为止，记下此时外加电压为 U 。请问本步骤目的是什么？

C. 保持步骤 B 中的电压 U 不变，对 M₁M₂ 区域加一个大小、方向合适的磁场 B ，使荧幕正中心重现亮点，试问外加磁场的方向如何？

② 根据上述实验步骤，同学们正确推算出电子的荷质比与外加电场、磁场及其他相关量的关系为 $q/m = U/B^2d^2$ 。一位同学说，这表明电子的荷质比将由外加电压决定，外加电压越大则电子的荷质比越大，你认为他的说法正确吗？为什么？

[解析] ① B. 本步骤目的是使电子刚好落在正极板靠近荧屏端的边缘，利用已知量表达带电粒子

的荷质比 q/m 。

C. 外加磁场的方向垂直电场方向向外(垂直纸面向外)。

②说法不正确, 因为电子的荷质比是电子的固有参数。

[点评] 本题考查的就是 2004 年江苏卷汤姆逊用来测定电子比荷的实验装置, 只是命题的角度有所变化。前者注重考查实验原理, 后者注重考查实验步骤, 但都离不开对实验原理的理解与应用。

四、高考物理试题注重考查不同类型的质谱仪

飞行时间质谱仪是一种很常用的质谱仪。这种质谱仪的质量分析器是一个离子漂移管。由离子源产生的离子加速后进入无场漂移管, 并以恒定速度飞向离子接收器。离子质量越大、到达接收器所用时间越长, 离子质量越小、到达接收器所用时间越短, 根据这一原理, 可以分离不同质量的离子。飞行时间质谱仪可检测的分子量范围大、扫描速度快, 仪器结构简单。这种飞行时间质谱仪的主要缺点是分辨率低, 因为离子在离开离子源时初始能量不同, 使具有相同荷质比的离子到达检测器的时间有一定分布, 造成分辨能力下降。改进方法之一是在线性检测器前面加上一组静电场反射镜, 将自由飞行中的离子反推回去, 初始能量大的离子由于初始速度快, 进入静电场反射镜的距离长, 返回时的路程也就长, 初始能量小的离子返回时的路程短, 这样就会在返回路程的一定位置聚焦, 从而改善了仪器的分辨能力。这种带有静电场反射镜的飞行时间质谱仪被称为反射式飞行时间质谱仪。

[例 4] (2007 年重庆卷) 飞行时间质谱仪可通过测量离子飞行时间得到离子的荷质比 q/m 。如图 5, 带正电的离子经电压为 U 的电场加速后进入长度为 L 的真空管 AB, 可测得离子飞越 AB 所用时间 t_1 。改进以上方法(图 6), 让离子飞越 AB 后进入场强为 E (方向如图 6 所示) 的匀强电场区域 BC,

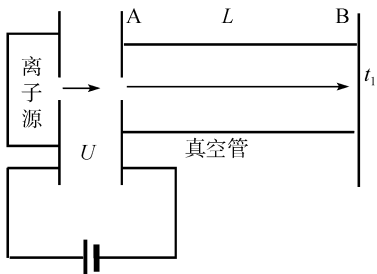


图 5

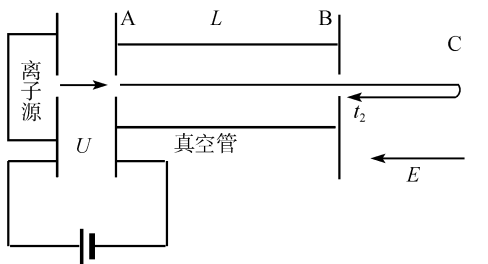


图 6

在电场作用下离子返回 B 端, 此时, 测得离子从 A 出发后飞行的总时间 t_2 (不计离子重力)。

(1) 忽略离子源中离子的初速度, ①用 t_1 计算荷质比; ②用 t_2 计算荷质比。

(2) 离子源中相同荷质比离子的初速度不尽相同, 设两个荷质比都为 q/m 的离子在 A 端的速度分别为 v 和 v' ($v \neq v'$), 在改进后的方法中, 它们飞行的总时间通常不同, 存在时间差 Δt 。可通过调节电场 E 使 $\Delta t=0$ 。求此时 E 的大小。

[解析] (1) ①设离子带电量为 q , 质量为 m , 经电场加速后的速度为 v , 则

$$qU = (1/2)mv^2 \quad (3)$$

离子飞越真空管 AB 做匀速直线运动, 则

$$L = vt_1 \quad (4)$$

由 (3)、(4) 两式得离子荷质比

$$q/m = L^2 / 2U t_1^2 \quad (5)$$

②离子在匀强电场区域 BC 中做往返运动, 设加速度为 a , 则

$$qE = ma \quad (6)$$

$$t_2 = L/v + 2v/a \quad (7)$$

由 (3)、(6)、(7) 式得离子荷质比 $q/m = (1/2)U(L + 4U/E)^2 (1/t_2^2)$ 或 $q/m = [L/\sqrt{2U} + 2\sqrt{2U}/E]^2 (1/t_2^2)$ 。

(2) 两离子初速度分别为 v 、 v' , 则 $t = L/v + 2v/(qE/m)$ 、 $t' = L/v' + 2v'/(qE/m)$ 、 $\Delta t = t - t' = [L/vv - 2m/qE](v - v')$ 。要使 $\Delta t=0$, 则须 $L/vv - 2m/qE=0$, 所以 $E = 2mvv/qL$ 。

[点评] 2001 年全国理综卷对质谱仪的原理进行了考查, 2000 年广东卷对质谱仪的结构进行考查, 2007 年广东卷对质谱仪的实验测量步骤进行考查。可见, 高考命题以质谱仪为背景材料, 从不同角度对质谱仪进行考察, 质谱仪成为高考物理命题的热点。而 2007 年对飞行时间质谱仪的考查又指出了高考物理命题的方向, 相信在未来几年的高考中, 一定会有更多不同类型的质谱仪在高考物理试题中出现。

(湖北省宜昌市夷陵中学 443005)