

物理真题解析

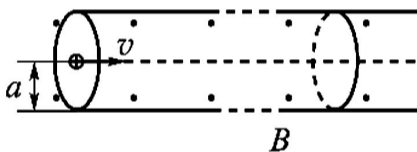
2023年北京高中学业水平等级考
物理卷典型试题评析(三)

北辰

(续 1739 期第 9 版)

【2023 年高考物理原题 13】如图所示,在磁感应强度大小为 B 、方向垂直纸面向外的匀强磁场中,固定一内部真空且内壁光滑的圆柱形薄壁绝缘管道,其轴线与磁场垂直。管道横截面半径为 a ,长度为 $l(l \gg a)$ 。带电粒子束持续以某一速度 v 沿轴线进入管道,粒子在磁场力作用下经过一段圆弧垂直打到管壁上,与管壁发生弹性碰撞,多次碰撞后从另一端射出。单位时间进入管道的粒子数为 n ,粒子电荷量为 $+q$,不计粒子的重力、粒子间的相互作用。下列说法不正确的是

- A. 粒子在磁场中运动的圆弧半径为 a
 B. 粒子质量为 $\frac{Bqa}{v}$
 C. 管道内的等效电流为 $nq\pi a^2 v$
 D. 粒子束对管道的平均作用力大小为 $Bnql$



【答案】C

【分析】

物理现象林林总总,物理公式和定律繁多,可谓“博大精深”,但是众多物理现象背后往往具有相同的物理本质。从这个角度来说,物理学科承载着培养学生提高透过现象看本质的能力。宏观和微观的关系,就好比整体和部分的关系,整体表现出来的功能是由部分的结构决定,同理,事物宏观的性质往往是由微观规律决定的。本题正是基于上述观点,传承了近年北京卷(2013 年气体宏观压强的微观表达式、2017 年的发电机模型、2019 年空气分子对雨滴的阻力模型等)特色设计的,通过具体模型分析安培力和洛伦兹力之间的内在联系和区别,揭示宏观显现的微观本质。从物理学学科核心素养的角度来看,本题主要涉及到“物理观念”中运动与相互作用观,“科学思维”中模型建构、科学推理、科学论证等要素。

题目素材源于教材而又高于教材。普通高中教科书必修(三)第十三章给出了安培力公式, $F = BIL$, 其中 B 为磁场的磁感应强度, I 为电流, l 为垂直于磁场放置的导线长度。选择性必修(二)第一章给出磁场对运动电荷的作用力——洛伦兹力, $f = qvB$, 其中 q 为粒子电荷量, v (其速度方向与磁场方向垂直) 为粒子的运动速率,并给出洛伦兹力和安培力的关系,安培力是洛伦兹力的宏观表现。教材中思考与讨论部分给出了由安培力表达式推导出洛伦兹力表达式的逻辑线索:(1) 设静止导线中定向运动的带电粒子的速度都是 v , 单位体积内粒子数为 n , 粒子电荷量为 q , 导线的横截面为 S , 由此计算出导线中的电流;(2) 求出 l 长度的导线在磁感应强度为 B 的磁场中所受的安培力;(3) 求出每个粒子所受的力,等于洛伦兹力;(4) 最后将定向运动带电粒子所受力的表达式推广到任意运动带电粒子在磁场中的受力。教材提供的思路是从宏观推演到微观,建立两者的关系,在此过程中将电子运动简化为理想的匀速直线运动。本题的设计,引导学生从更接近实际的微

观情境推导出它的宏观表现,要考虑带电粒子在磁场作用下的曲线运动及其与导线壁的碰撞,不仅体现了洛伦兹力和安培力的联系,更进一步阐明了两者的区别。本题的具体求解过程如下:

粒子在磁场力作用下经过一段圆弧垂直打到管壁上,所以粒子在磁场中运动的圆弧半径为管道横截面半径 a , 所以 A 选项正确。由洛伦兹力提供向心力有 $qvB = m\frac{v^2}{a}$, 解得粒子质量 $m = \frac{Bqa}{v}$, 所以 B 选项正确。因为单位时间进入管道的粒子数为 n , 粒子电荷量为 $+q$, 所以管道内的等效电流为 $I = nq$, 所以 C 选项错误。粒子束对管道的平均作用力在宏观上表现为管道受到的安培力, 所以其大小为 $F = BIl = Bnql$, 所以 D 选项正确。综上所述, 本题选 C。

本题的三点深入讨论:

(1) 粒子束对管道的平均作用力大小也可从微观角度求解, 具体求解过程如下: 一个粒子与长管内壁发生一次碰撞, 动量改变量为 $2mv$, 根据动量定理得一个粒子对管道的平均作用力大小为 $f = 2mv \cdot \frac{T}{2} = 4mv/T$; 长度为 l 的管道中粒子数目为 $N = \frac{l}{2a} \cdot \frac{T}{2} \cdot n$; 粒子束中所有粒子对管道的平均作用力大小 $F = Nf = \frac{4mv}{T} \cdot \frac{lTn}{4a} = mv \frac{ln}{a} = Bnql$ 。

(2) 若粒子在磁场力作用下经过一段圆弧斜着打到管壁上, 与管壁发生弹性碰撞, 粒子束对管道的平均作用力大小也为 $F = BIl = Bnql$ 。该结论也可从微观角度进行求解, 求解过程如下: 设粒子与长管内壁发生碰撞时, 速度方向与长管夹角为 θ , 一个粒子与长管内壁发生一次碰撞, 动量改变量为 $2mv \sin \theta$, 根据动量定理得一个粒子对管道的平均作用力大小为 $f = 2mv \sin \theta \cdot \frac{2\theta}{2\pi} T = 2\pi mv \sin \theta / \theta T$; 长度为 l 的管道中粒子数目为 $N = \frac{l}{2a \sin \theta} \cdot \frac{2\theta}{2\pi} T \cdot n$; 粒子束中所有粒子对管道的平均作用力大小 $F = Nf = \frac{2\pi mv \sin \theta}{\theta T} \cdot \frac{\theta l}{2\pi a \sin \theta} T n = T n = Bnql$ 。

(3) 安培力做功的问题讨论。如果导线不固定, 导线在安培力的作用下开始运动, 即安培力对导体做功, 做功的能量来自什么地方? 根据前面两点的分析可以知道, 粒子和管道发生弹性碰撞, 将一部分动能转移给管道, 粒子的运动速率减少。为了保证管道中等效电流不变, 需要外加电源, 电场力对粒子做功, 补充粒子碰撞损失的动能。然后粒子再次和管道碰撞, 再次将部分动能转移给管道。粒子在管道中周而复始, 重复这一过程, 使得管道的动能不断增加; 在宏观上看, 安培力对管道做功; 从微观上看, 做功的能量来源于电源。

本题很好地引导学生对教材进行深入挖掘, 许多学生对电流的微观表达式非常熟悉, 公式 $I = nqSv$ 已经深深地刻在脑海中, 所以有不少学生会将该公式具体化得出管道内的等效电流为 $nq\pi a^2 v$ 的错误结论, 错误原因在于盲目套用公式, 死记二级结论, 本题中字母 n 的含义为单位时间进入管道的粒子数, 并不是单位体积内的带电粒子的个数。同一现象可以从不同的角度来认识, 关于安培力和洛伦兹力的关系, 教材是从宏观推导微观, 是从现象推测原因, 而本题是从微观推导宏观, 是从原因推导结果。

【2023 年高考物理原题 14】在发现新的物理现象后, 人们往往试图用不同的理论方法来解释。比如, 当发现光在地球附近的重力场中传播时其频率会发生变化这种现象后, 科学家分别用两种方法做出了解释。

现象: 从地面 P 点向上发出一束频率为 ν_0 的光, 射向离地面高为 H (远小于地球半径) 的 Q 点处的接收器上, 接收器接收到的光的频率为 ν 。

方法一: 根据光子能量 $E = h\nu = mc^2$ (式中 h 为普朗克常量, m 为光子的等效质量, c 为真空中的光速) 和重力场中能量守恒定律, 可得接收器接收到的光的频率 ν 。

方法二: 根据广义相对论, 光在有万有引力的空间中运动时, 其频率会发生变化。将该理论应用于地球附

近, 可得接收器接收到的光的频率 $\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 R}}}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 (R+H)}}}$,

式中 G 为万有引力常量, M 为地球质量, R 为地球半径。

下列说法正确的是

- A. 由方法一得到 $\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{gH}{c^2}\right)$, g 为地球表面附近的重力加速度
 B. 由方法二可知, 接收器接收到的光的波长大于发出时光的波长
 C. 若从 Q 点发出一束光照射到 P 点, 从以上两种方法均可知, 其频率会变小
 D. 通过类比, 可知太阳表面发出的光的频率在传播过程中变大

【答案】B

【分析】

物理学发展史也是人类思想观念的发展史。近代物理学发展不仅拓展了人们对自然界的认识, 产生大量知识, 更重要的是其中产生了大量不同于经典物理学的观念并创新了人类认识自然界的方式。爱因斯坦的相对论和量子理论对传统的经典物理学产生了严重冲击, 其中孕育的量子化观念、时空观念的变化等都是人类需要传承的财富。但不管经典物理学还是近代物理学, 实验与理论仍然是推动物理学发展的两个基本途径, 只是有时候实验在前, 有时候理论在前。在发现新的物理现象后, 人们往往试图用不同的理论方法来解释, 反之亦是如此。物理教学应该让学生理解物理学发展的基本途径和发展过程中观念的变化, 这也是科学本质教育的重要内容 and 当前我国科学教育存在的短板。

本题首先介绍了物理学发展中的一般化思路, 即先有实验现象, 后有理论解释。通过举例的方式引入光在地球附近的重力场中传播时的频移现象, 呈现了两种具体的理论解释方法: 一种是根据光子理论和光子在重力场中的能量守恒规律; 一种是根据广义相对论。本题所用的具体知识中, 除了光子能量公式 $E = h\nu$ 、爱因斯坦质能方程 $E = mc^2$ 和能量守恒定律之外, 其他知识都不是普通高中物理课程标准的内容要求。本题侧重考查学生对科学本质的理解, 包括科学是对自然界的解释、科学事业是人类共同事业等内容, 学生学习新知识并应用新知识进行解释的学习能力, 以及把所学的知识在新情境中进行迁移应用的迁移创新能力。该题侧重考查的并不是知识本身, 而是以“频移现象”为背景对物理学核心素养的全面考查。

(未完待续)