

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(八)

北辰

(续 1749期第10版)

【2023年高考物理原题20】螺旋星系中有大量的恒星和星际物质,主要分布在半径为 R 的球体内,球体外仅有极少的恒星。球体内物质总质量为 M ,可认为均匀分布。球体内外的所有恒星都绕星系中心做匀速圆周运动,恒星到星系中心的距离为 r ,万有引力常量为 G 。

(1)求 $r>R$ 区域的恒星做匀速圆周运动的速度大小 v 与 r 的关系。

(2)根据电荷均匀分布的球壳内试探电荷所受库仑力的合力为零,利用库仑力与万有引力的表达式的相似性和相关力学知识,求 $r\leq R$ 区域的恒星做匀速圆周运动的速度大小 v 与 r 的关系。

(3)科学家根据实测数据,得到此螺旋星系中不同位置的恒星做匀速圆周运动的速度大小 v 随 r 的变化关系图像,如图1所示。根据在 $r>R$ 范围内的恒星速度大小几乎不变,科学家预言螺旋星系周围($r>R$)存在一种特殊物质,称之为暗物质。暗物质与通常的物质有引力相互作用,并遵循万有引力定律。求 $r=nR$ 内暗物质的质量 M' 。

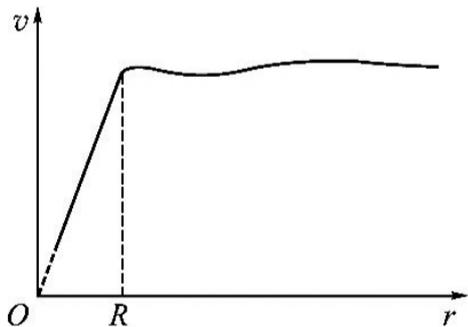


图1

【分析】本题关注前沿科学问题。宇宙中的暗物质是现代天体物理学与理论物理学的核心问题之一,暗物质预示着物理学的又一次重大革命。我国在2015年成功发射了“悟空”号暗物质粒子探测卫星,是迄今为止观测能段范围最宽、能量分辨率最优的空间探测器,处于世界领先水平。北京等级考试题涉及物理学研究的前沿课题,有助于开阔学生视野,提高学生对物理学的兴趣。

螺旋星系的旋转曲线是暗物质存在的证据之一。所谓旋转曲线,是指螺旋星系中的恒星运动速率 v 与 r (该恒星与星系中心的距离)的关系曲线。暗物质与电磁波(光)的作用非常弱,它不发射、不反射、不吸收电磁波(光),不能用通常的天文仪器直接观察到,因此螺旋星系的旋转曲线证实了暗物质的存在。

本题考查考生万有引力与质点圆周运动的知识,以及利用建模、类比方法分析问题与解决问题的能力。题目设置一个理论计算结果与实际观测数据不一致的真实情景,让学生根据题干提示,利用类比的方法,求出暗物质的质量,体验科学家解决问题的思路。

题目先建模,将螺旋星系简化为一个半径为 R 、质量均匀分布的球体,以及少量的在半径 R 之外的恒星。由于球体内恒星和星际物质之间保持较远的距离,恒星之间以及恒星与星际物质之间没有碰撞,恒星仅在万有引力作用下运动。

第(1)问比较简单,要求学生用万有引力定律和质点圆周运动的知识,求解 $r>R$ 区域的恒星速率 v 与 r 的关系。一个质点在均匀分布的球体外,质点与球体的相互作用力等于质点与球体质量全部集中在球心的质点的万有引力;再根据万有引力提供向心力,得恒星的运动速率 v 与 r 的关系。第(1)问侧重考查学生建立圆周运动模型并应用牛顿第二定律进行推理的能力。

第(2)问要求学生利用类比的方法,求得 $r\leq R$ 区域的恒星运动速率 v 与 r 的关系。利用类比,学生通过类比库仑力可得,一个在质量均匀分布的球体内部的质点,受到的该球体的作用力(万有引力)为零。于是,球体内的恒星受到的万有引力仅与半径为 r 的球面内的质量有关。问题简化为:恒星受到星系的作用力等于半径为 r 内的球体的质量全部集中在球心的万有引力,大小为 $F=\frac{GM_r m}{r^2}$,其中 $M_r=\rho\frac{4}{3}\pi r^3$;再根据万有引力提供向心力,得恒星的运动速率 v 与 r 的关系。本问侧重考查学生根据库仑定律和万有引力定律的相似性进行类比迁移的能力。

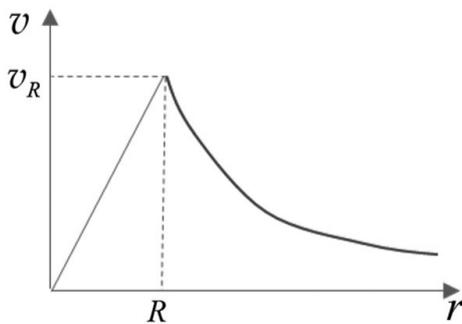


图2

利用(1)(2)两问,可以得到恒星的运动速率 v 与 r 的关系曲线,如图2所示。在 $r\leq R$ 区域, v

与 r 成正比,而在 $r>R$ 区域, $v\propto\frac{1}{\sqrt{r}}$ 。然而,科学家测量的螺旋星系的 v 与 r 的关系曲线(称为旋转曲线)如图1所示。在 $r>R$ 的区域,恒星的运动速率几乎为常数,与 r 无关,这与第(1)问的计算结果完全不同。这个不变的速率等于 $r\leq R$ 区域的最大速率,即 $v_R=\sqrt{\frac{GM}{R}}$ 。显然,理论计算与实际观测数据不一致。科学家据此提出了“暗物质”假说。按照题干数据, v 仅与 r 有关,合理推测暗物质应该是球对称分布。根据“均匀带电球体在球的外部产生的电场,与一个位于球心、电荷量相等的点电荷在同一点产生的电场相同”,可以推论:一个质量均匀分布的球体外部的一个质点受力,与这个球体质量全部集中在球心的质点对外部质点的万有引力相同。故暗物质对恒星的作用力等于半径为 r 的球面内的暗物质对该恒星的引力,与球面外的暗物质无关。而该球面内的暗物质对该恒星的引力等于所有暗物质集中于星系中心时对该恒星的引力。物质和暗物质对恒星的引力提供向心力,故对 r 处的恒星,

有 $\frac{GMm}{r^2}+\frac{GM'm}{r^2}=\frac{mv^2}{r}$ 。由此可以得半径为 r 的球面内暗物质的质量为

$$M'(r)=(\frac{r}{R}-1)M, r>R \quad (1)$$

当 $r=nR$ 时,得 $M'(r=nR)=(n-1)M$ 。从(1)式可知暗物质在空间中不是均匀分布,其密度为 $\rho'=\frac{1}{4\pi r^2}\frac{dM'(r)}{dr}=\frac{M}{4\pi Rr^2}$ 。可见,随着 r 的增加,其密度越来越小。

科学研究中,当实验观测数据与已有认知不同时,往往意味着科学的重大发现和突破,要大胆提出预言。本小问侧重物理科学本质的考查,与第(2)问不同的是,本问在没有提示的情况下学生要主动调用已有知识进行类比,得出 $r=nR$ 内外暗物质对恒星的引力,是对上一问类比迁移能力考查的提升。

本题希望引导中学物理教学加强对学生创新能力的培养。题目提供了两个培养学生创新能力的途径:一是加强物理学习中的类比科学思维方法的培养,根据知识、规律、现象等方面的相似性进行类比,丰富学生学习过程中的类比体验,为未来类比创新奠定基础;二是让学生了解、体会物理学家的研究思路,特别是要引导学生了解物理学家何提出问题、创新点在哪里、如何产生创新、创新的思路来自哪里,为未来借鉴物理学家的创新思路奠定基础。

(续完)