



高中物理“氢原子光谱与玻尔模型”的教学尝试

鲁 斌

(浙江省余姚中学 浙江 宁波 315400)

(收稿日期:2020-02-04)

摘要:利用分光计、三棱镜,将氢原子光谱呈现在高中物理课堂.利用光栅,准确测量谱线波长,并引导学生得到巴尔末公式,进行深入思考.将玻尔理论进行系统教学,用理论解释实验,得到了很好的教学效果.在本课中,弥补了学生对于氢原子光谱实验现象的缺失,也弥补了教材对于玻尔理论系统性的缺失.

关键词:氢原子光谱 巴尔末公式 里德伯常数 玻尔理论

1 引言

“氢原子光谱与玻尔模型”的内容,在人教版《物理·选修3-5》^[1]教材中,分两节展开.第十八章第3节“氢原子光谱”中,介绍了光谱及光谱的分类、氢原子光谱的实验规律、经典理论的困难;在第4节“玻尔的原子模型”中,介绍了玻尔原子理论的基本假设、玻尔理论对氢光谱的解释、玻尔模型的局限性.笔者尝试,将两节内容合并为一节,先展现氢原子光谱的实验现象,再引入玻尔理论进行解释,使整堂课的结构更加完整.在此过程中,也应处理和考虑以下问题:

- (1) 突出主线,弱化对光谱分类、作用等相关内容的讨论.
- (2) 实验展示氢原子光谱的谱线.
- (3) 补充光栅方程、分光计等相关内容,定量测量氢原子光谱.
- (4) 比较自然地得到巴尔末公式.
- (5) 为巴尔末公式与玻尔理论搭建桥梁.
- (6) 补充角动量等内容,将玻尔理论的基本假设进行完备.
- (7) 推导里德伯公式,验证玻尔理论.

2 光谱

2.1 光谱的呈现

实验 1:太阳光谱

用三棱镜展示太阳光谱.配合讲解:1665年,牛顿就发现了白光通过三棱镜后能够得到绚丽的光

带,并把实验中得到的彩色光带叫做光谱.炽热的固体、液体、高压的气体的光谱,是由连续分布的一切波长的光组成的,这种光谱叫做连续光谱.

提问:是否所有物体发出的光谱都是连续谱?

实验 2:钠的焰色反应

将蘸有食盐水的细铁丝放置于酒精灯的灯焰上,看到黄色的火焰,这就是化学课中提到的焰色反应.课件展示钠元素的光谱线,两条钠黄双线(图1)非常明锐.



图1 钠黄双线

师:只含有一些不连续的亮线的光谱叫明线光谱(线状谱).明线光谱中的亮线叫谱线,各条谱线对应不同波长的光.

实验 3:光谱管组(图2)实验

利用光谱管组,展示氢气、氮气、氩气、氦气、氖气、汞蒸气的放电现象.

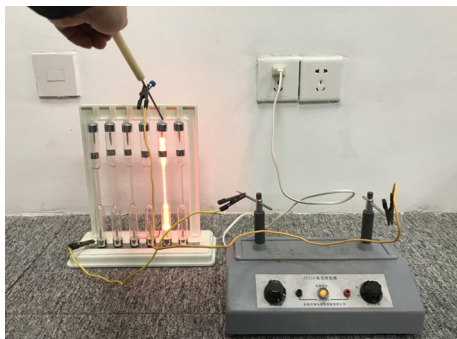


图2 光谱管组

由于每种原子都有自己的特征谱线,因此可以根据光谱来鉴别物质和确定的化学组成,这种方法叫做光谱分析.

课件展示元素的光谱线,如图3所示.

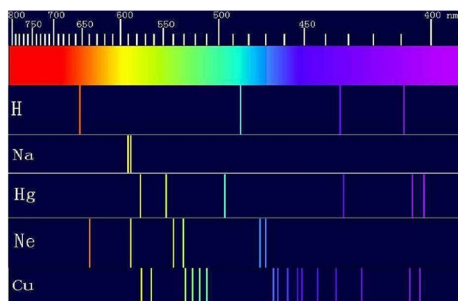


图3 连续谱与线状谱

我们得到了大量元素的谱线,并要对其进行研究、解释.由于氢原子具有最简单的结构,我们就从氢原子产生的光谱入手.

2.2 观察氢原子光谱

实验4:利用分光计观察氢原子光谱

调平分光计,将三棱镜放置于载物台上,点亮氢灯,实验装置图如图4所示.



图4 用分光计观察氢原子光谱

在望远镜处观察经过三棱镜折射的氢原子光谱如图5所示.

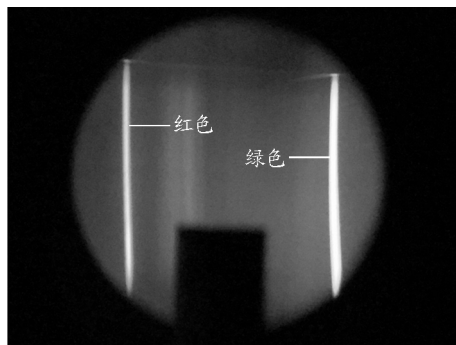


图5 氢原子光谱中的红色与绿色谱线

通过三棱镜我们观察到了4条分立的谱线:红色、绿色、紫色、淡紫色.

提问:这些光谱的波长为多少呢?

2.3 测量谱线波长

实验5:利用光栅测量氢原子光谱

由大量等宽等间距的平行狭缝构成的光学器件称为光栅.一般常用的光栅是在玻璃片上刻出大量平行刻痕制成,刻痕为不透光部分 b ,两刻痕之间的透光部分为 a ,相当于一狭缝.本次实验采用的光栅为1 mm刻600条线,光栅常数定义为

$$d = a + b = \frac{1}{600} \text{ mm} \approx 1.667 \times 10^{-6} \text{ m}$$

如图6所示,当平行光入射时,相邻透光部分的光程差为 $d \sin \theta$,容易证明,当光程差满足

$$d \sin \theta = k \lambda \quad (1)$$

式中 k 为整数,即可在 P 处产生明纹.

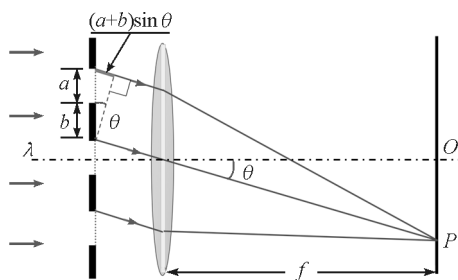


图6 光栅衍射光路图

我们选取绿色光谱进行测量.其光栅的一级衍射角为 $16^\circ 55'$,代入式(1),得到绿色光谱的波长为485.2 nm.通过相同的计算方法,我们可以得到氢原子光谱的其他谱线波长,如图7所示,并分别标记为 $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\delta$.

| | | | |
|------------|-----------|------------|------------|
| H_α | H_β | H_γ | H_δ |
| 656.3 nm | 486.1 nm | 434.1 nm | 410.2 nm |

图7 氢原子谱线波长

提问:从这些波长分布中,你能发现什么规律吗?

这看似是一个数学游戏,却包含着深刻的物理内涵.

3 巴尔末公式与里德伯常数

3.1 巴尔末的数学游戏

瑞士数学教师巴尔末也一直在研究这个问题, 1885年, 他发现了一个非常重要的公共因子^[2]: 364.6 nm, 如果将氢原子的波长除以这个数, 就会得到如下结果, 如图8所示

$$\frac{656.3}{364.6} = \frac{9}{5} \quad \frac{486.1}{364.6} = \frac{16}{12} \quad \frac{434.1}{364.6} = \frac{25}{21} \quad \frac{410.2}{364.6} = \frac{36}{32}$$

图8 呈现的计算结果

提问:你能从这些数据中得到它们满足的规律吗?

我们可以得到

$$\frac{\lambda}{364.6} = \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad (2)$$

式(2)即为巴尔末公式.

当然我们可以将公式进行处理

$$\lambda = 364.6 \frac{n^2}{n^2 - 4} \text{ nm} = 364.6 \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \text{ nm} \quad (3)$$

这个公式是否正确, 需要通过实验进行检验, 我们将 $n=7$ 代入公式, 算出了一条 $\lambda=397.0$ nm 的谱线, 通过实验观察, 果然观察到了这条谱线 H_ϵ , 其波长为 397.1 nm.

提问:巴尔末公式可以较好地解释氢原子光谱, 那么公式背后的物理又是什么呢? 我们怎么去理解这个公式?

3.2 里兹和里德伯

这时候出现了两个非常重要的物理学家, 一位是瑞典物理学家、数学家里德伯, 一位是瑞士理论物理学家里兹.

他们试着将公式倒过来, 则式(3)为

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{364.6 \text{ nm}} \frac{n^2 - 2^2}{n^2} = \frac{4}{364.6 \text{ nm}} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

则公式可总结为

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (4)$$

其中 $R = \frac{4}{364.6 \text{ nm}} = 1.10 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$

提问:从这个公式中, 我们能得到什么启发吗?

让我们仔细来端详这个公式^[3]:

(1) 包含两项. 说明原子发光过程牵涉到两个对象, 有初项与末项, 即初态与末态.

(2) 差值. 两项由减号连接, 这要求他们一定对应同一物理性质的不同状态, 两者的落差决定发光的波长特征. 这是一个类似“跳楼”的过程.

(3) 整数平方. 这个物理性质的数值要正比于整数平方的倒数.

如果我们能找到一个模型, 且其满足上述3个要求的话, 说不定能解释氢原子的发光.

4 玻尔理论及其解释

还记得此前普朗克和爱因斯坦已经确立了光能量量子的概念吗? 此能量正比于光的频率, $\epsilon = h\nu$ 把式(4)改写为

$$h\nu = E_0 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

一切都变得豁然开朗了, 氢原子中只有电子和质子, 变化的是电子相对于质子的运动. 如果电子的能量是个正比于整数平方倒数的量, 电子从一个较高能量的状态跳跃(jump)到一个较低能量的状态, 因为能量要守恒, 假设能量差对应发射光的能量量子, 则氢原子光谱的特征就能得到解释.

1913年, 年轻的丹麦人玻尔就是这么想的. 为了解释氢原子光谱, 他提出了3条基本假设.

4.1 定态假设

假设氢原子中, 电子绕着原子核做圆周运动, 库仑力提供电子做圆周运动的向心力. 按照经典物理学, 电子做圆周运动属于变加速运动, 会辐射电磁波损耗能量, 因此电子绕核转动这个系统是不稳定的, 电子会失去能量, 最后一头栽到原子核上(图9), 但事实不是这样, 原子是个很稳定的系统.

为了解决这个问题, 玻尔提出了“定态假设”. 原子中的电子只能在一些半径不连续的轨道上(图10)做圆周运动. 在这些轨道上运动的电子不辐射(或吸收)能量而处于稳定状态, 称为“定态”.

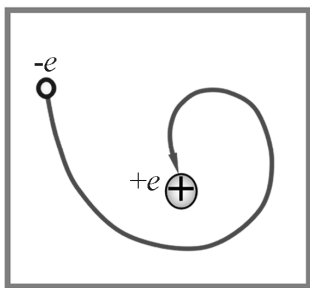


图9 不稳定的轨道

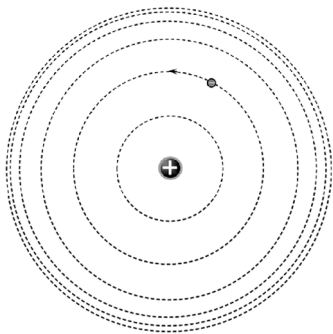


图10 定态轨道

假设电子只能在定态轨道 $r_1, r_2, \dots, r_m, r_n$ 运动, 则电子的环绕规律为

$$k \frac{e^2}{r_n^2} = m \frac{v_n^2}{r_n} \quad (5)$$

4.2 频率条件假设

光辐射是怎么产生的呢?

由于每个轨道都对应有不同的能量, 电子从某一定态向另一定态跃迁时将发射(或吸收)光子. 若电子在轨道 r_n 处的能量为 E_n , 在轨道 r_m 处的能量为 E_m , 从轨道 r_n 向 r_m 跃迁时, 能放出频率为 ν 的光子(图11), 满足

$$\epsilon = h\nu = E_n - E_m \quad (6)$$

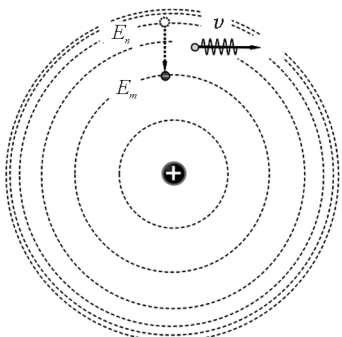


图11 跃迁

4.3 角动量量子化条件假设

那么, 能量为什么会分立呢?

这个电子环绕原子核运动的模型, 让我们很容易就想到了天体的运动. 开普勒总结了行星运动规

律, 总结出了开普勒三定律. 第二定律讲的是角动量的问题, 第一、三定律其实讲的是能量的问题. 如果要为能量限制在一些分立的、正比于整数平方倒数的数值上找个理由的话, 只能从角动量(图12)上去找. 在定态轨道上运动的电子, 其角动量大小只能取 $\frac{h}{2\pi}$ 的整数倍, 即

$$L = rp = r_n m_e v_n = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar \quad (7)$$

此为角动量量子化假设.

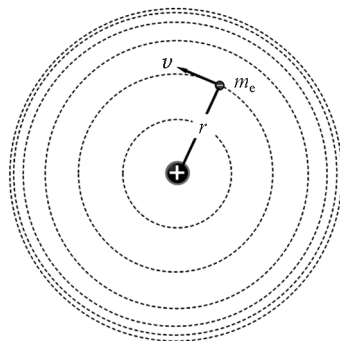


图12 角动量量子化

4.4 理论求解

根据以上假设, 我们如何解释氢原子光谱的规律呢?

联立式(5)、式(7), 消去 v_n , 得到

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e k e^2} \quad (8)$$

可见, 轨道是量子化的. 电子在定态轨道上的机械能为

$$E_n = E_k + E_p = \frac{1}{2} m_e v^2 - \frac{k e^2}{r_n} = -\frac{k e^2}{2 r_n} \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)

$$E_n = -\frac{m_e k^2 e^4}{2 \hbar^2 n^2} = -13.6 \frac{1}{n^2} \text{ eV}$$

$$E_m - E_n = 13.6 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \text{ eV} \quad (10)$$

为了得到巴尔末公式与里德伯常数, 则

$$h \frac{c}{\lambda} = E_m - E_n = \frac{m_e k^2 e^4}{2 \hbar^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{m_e k^2 e^4}{2 \hbar^2 h c} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) =$$

$$1.10 \times 10^7 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \text{ m}^{-1} \quad (11)$$

令 $n = 2$, 即可得到巴尔末公式, 里德伯常数的理论值与实验值几乎一致. 由此也成功解释了氢原子光谱.

(下转第47页)

的运动,进一步深化对运动观和相互作用观的认识理解.

(2) 认识“磁现象”,建立“磁场”的概念,认识到磁场也是一种物质,进一步丰富学生的物质观.

(3) 认识“磁现象”,建立“磁场”的概念,通过掌握“磁感线”和“磁感应强度”,理解“磁通量”,为以后电磁感应的学习建立基础.

2 总结与启示

将“磁场”作为一个统摄的大概念,把核心素养要素作为分析要素与知识要素并重,建立联系,运用ISM法进行教材分析,通过矩阵运算获得层级关系,使教材内容结构清晰化、层次化.此种方法简便易行,好处也是显而易见的:素养与知识并重,以此为基础开展的教学有利于核心素养的显性化教学,更好地推动学生核心素养的形成与发展;素养之间的逻辑层次清晰,有利于学生的认知建构和学习进阶;始终聚焦大概念有利于学生知识的整合和科学观念的形成.因此素养导向下基于大概念的ISM教材分

(上接第42页)

4.5 玻尔理论的局限性

至此,氢原子光谱有了合理的解释.科学的发展离不开一代又一代人的努力.然而,玻尔理论真的正确吗?

玻尔理论成功地解释并预言了氢原子辐射的电磁波的问题,但是也有它的局限性.玻尔理论在解决核外电子的运动时成功引入了量子化的观念,同时又应用了“粒子、轨道”等经典概念和有关牛顿力学规律.除了氢原子光谱外,在解决其他问题上遇到了很大的困难,例如氦原子光谱.为什么电子要在定态的轨道上运动呢?为什么定态轨道上不会辐射电磁波呢?为什么要求角动量一定是普朗克常数的整数倍呢?为什么电子会像行星一样限制在一个平面内运动呢?物理模型在解决一些问题的同时总会带来新的问题.

5 结束语

本堂课通过对氢原子光谱的研究,从实验现象

析有助于实现核心素养的落地教学,实现物理教育的核心价值.

物理学科知识体系的建立过程是以核心概念为代表的大概念不断形成和建立联系的过程,对核心大概念深化理解的过程也是不断围绕问题科学探究的过程,是运用科学思维、方法、模型、数学知识等解决问题的过程,是学习知识、锻炼能力和形成素养的一体化过程.作为上位的一个大概念往往是由若干个层次的下位概念构成,是一个概念体系,是由各个下位概念“层层递进、逐步进阶”而生成,各层级下位概念遵循严格的逻辑顺序,不可逾越和打乱.

参考文献

- 1 中华人民共和国教育部.普通高中物理课程标准(2017年版)[S].北京:人民教育出版社,2017.37~40
- 2 温·哈伦.科学教育的原则和大概念[M].韦钰,译.北京:科学普及出版社,2011.21
- 3 阎元红,郭文华.科学教育中的大概念:内涵、价值及实现[J].教育理论与实践,2019(29):22~25

和理论解释入手,试图还原历史发展的脉络,力图展现科学探究过程中的偶然性与必然性.对于高中学生而言,从高考层面,只要能够利用能级差计算光子频率即可.对于氢原子光谱的产生、测量、玻尔理论涉及的具体内容和数学推导并不要求.但从核心素养层面,经历实验探究,培育科学思维,是物理课堂的重要使命.在此之后,大师辈出,薛定谔、海森伯、泡利、费米、德布罗意、狄拉克、波恩等等科学家前赴后继,逐步发展和完善量子力学的框架,才有现在的信息社会.

参考文献

- 1 人民教育出版社,课程教材研究所,物理课程教材研究开发中心.普通高中课程标准实验教科书 物理·选修3-5(第3版)[M].北京:人民教育出版社,2010.54~59
- 2 俞祥露.关于“玻尔原子理论对氢原子光谱的解释”的教学体会[J].物理教学,1989(7)
- 3 曹则贤.量子力学少年版[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2017.20