

中华人民共和国教育部主管
全国中文核心期刊

国家211工程重点建设院校 陕西师范大学 主办

中学物理教学参考

TEACHING REFERENCE
OF MIDDLE SCHOOL PHYSICS

科学性

知识性

实用性

先导性

青海湟川中学第一分校始建于1938年，学校坚持“以人为本”的办学理念，以“修德、求真、习文、健身”为校训。先后获得了省级“绿色学校”“标准化学校”“中小学实验教学一类达标学校”“青海省防震减灾科普示范校”“西宁市校园文化建设示范校”“西宁市平安校园”“西宁市文明单位”等荣誉称号，是青海省中小学教师培训基地和青海师范大学研究生教学实践基地。学校先后与加拿大富兰克林学院、澳大利亚莫纳什大学建立友好关系，是深受社会各界好评的省级重点高中。

网址 www.zhongwucan.com
电子邮箱 phycte21@163.com; phycte21@sina.com

青海湟川中学第一分校

ISSN 1002-218X



9 771002 218007

2014 5
总第395期

中学物理教学参考

ZHONGXUE WULI JIAOXUE CANKAO

(1972年创刊)

2014年第5期

总第395期

主管 中华人民共和国教育部
主办 陕西师范大学
出版 陕西师范大学出版总社有限公司
编辑 中学教学参考杂志社
中学物理教学参考编辑部

陕西师范大学出版总社有限公司
董事长 高经纬
社长 刘东风
总编辑 赵豪迈
副社长 马小为(兼中学教学参考杂志社社长)

中学物理教学参考编辑部

主编 王较过 杨辉祥
副主编 李争光 东延民
责任编辑 郭晓丹
美术编辑 瑾 莹
责任校对 郑 广

编辑部电话 029-85308684

网 址 www.zhongwucan.com

E-mail phycfe21@163.com(上半月)

phycfe21@sina.com(上半月)

XWL551@163.com(下半月)

地 址 西安市长安南路199号陕西师范大学校内

邮 编 710062

排 版 陕西金德佳印务有限公司微机室

印 刷 西安地图出版社印刷厂

订 阅 全国各地邮局

国内发行 陕西省邮政报刊发行局

国外发行 中国国际图书贸易总公司

(北京399信箱)

国内统一连续出版物号 CN 61-1033/G4

国际标准连续出版物号 ISSN 1002-218X

邮发代号 52-31

国外代号 M4266

定 价 10.00元

广告经营许可证 6100004000031

广告部电话 029-85303913

出版日期 2014年5月10日

声明 凡投我刊稿件,一经利用,即视为作者同意授予我刊该作品的修改权和专有使用权(包括复制权和信息网络传播权等)。任何单位和个人如需转载,请与我刊联系并注明出处。

目 录

前沿导航

课改在线

- 2 “五步探究法”物理教学模式的实践探索 李仿琴
5 物理与人文并重的生命化课堂建构策略 吴磊峰
8 基于实验探究的单元测评教学研究
——以《声现象》为例 宋爱国
12 “司南版”《物理3—1》中的“先行组织者”设计研究 马亚鹏

课程资源

习题研究

- 16 浅谈 $-G\frac{Mm}{r}$ 和 mgh 的区别及联系 王 文
18 “原始物理问题”在教学中应用的两个实例 朱兰梅
19 “超重”与“失重”概念教学引发的思考 黄书鹏

教学时空

教法学法

- 22 从学生前概念的角度谈牛顿第三定律的教学 郑青岳
24 电素:对量子原子模型的新解释 陈敏华
28 比热容的教学逻辑研究 石 尧 邢红军
30 三问二极管伏安特性曲线的形成原因
汪邦家 赵乃虎 孙 丽
32 引导反思学习 优化思维结构 汪燕青
34 高中物理单元复习教学中的“学习路径设计” 蔡千斌
41 “预习案”设计常见问题及对策 范明利

问题争鸣

- 39 法拉第电磁感应定律由谁总结得出 曾湖贤
43 刍议“人教版”《物理3—1》中的两处内容 王转转

考试评价

试题研究

- 44 对一道考题的再思考 吴维华
45 “物理味”试题及其对教学的启示 范福生

教师发展

- 49 基于高中物理课程标准的教学目标的叙写 闻维波
52 基于三维目标对有效解读教材的几点实践性思考 卞志荣

学生成长

- 56 我们的学生到底缺少什么
——一次物理“基础学力”的调查与启示 王安民

实验研究

实验评价

- 61 电学实验中与“选择”有关的问题 徐君生
66 物理演示实验与学生思维训练 韦金明 易其顺
69 中外热学探究式实验教学设计的比较 吕 琪

互动平台

多面微观

- 60 教科书中“电磁感应”一章内容表述的三点瑕疵 张香保



电素：对量子原子模型的新解释*

陈敏华

(浙江省绍兴市鉴湖中学 浙江 绍兴 312031)

文章编号:1002-218X(2014)05-0024-04

中图分类号:G632.4

文献标识码:A

摘 要:量子原子模型是基于量子力学理论的原子模型。对它的不同解释产生了不同的原子图像。由德国学者赫尔曼教授提出的解释量子原子模型的新概念——电素,有利于我们改进原子结构的课程和教学。

关键词:量子原子模型;电素;原子结构

原子的模样是怎样的?这是一个无法回答的问题。物体的模样包括它的大小、形状和颜色,它的透明度和表面光滑程度等。然而,原子没有这些特性。

这并不意味着我们不能用图像的方法来描述原子。对于看不见的物体或现象,我们也可以用图像来描述。地图其实并不是真正的地球模样。同样,许多物理、地理、气象等方面的各种图像也是这样。比如,在物理教材中,我们所看到的有些图像实际上是不存

在的:电容器极板上的电荷分布图、导体中的电流图、电场和磁场图、温度分布图等。

同样,我们可以画出原子的图像。当然,它实际上也是不存在的,仅仅是一种描述原子的方法。这种图像是人们创造出来的。尽管如此,它们不同于纯粹的幻想。这些图像基于一些数据,而这些数据又来自于测量或某种理论(当然,理论也来自于测量)。

1900年前后,许多物理学家都在探索原子的结

这些关系之后,教师可以设置这样的问题:

五、数学表达式的变换

如果我们把物体1对物体2的作用力记为 F_{12} ,将物体2对物体1的作用力记为 F_{21} ,你能否用一个数学表达式来表达 F_{12} 和 F_{21} 的关系?

对这一问题,学生将会建立 $F_{12} = -F_{21}$,其中负号表示两个力的方向相反。在这个基础上再问:

我们能否将关系式 $F_{12} = -F_{21}$,通过移项得到 $F_{12} + F_{21} = 0$?

科学地引导学生分析这一问题,让学生认识到,这种数学式子的变换是不允许的。因为 F_{12} 和 F_{21} 是分别作用在两个不同的物体上,它们是不能相加(合成)的。如果一个物体受到一对平衡力 F_1 和 F_2 ,它们的关系也可以表达为 $F_1 = -F_2$ 。对这个表达式,通过移项得到 $F_1 + F_2 = 0$ 是允许的。因为 F_1 和 F_2 是作用在同一物体上的,它们是可以相加(合成)的。采用这样的方法,既可以使学生深化对一对平衡力和一对相互作用力之间关系的认识,又可以防止学生滥用数学工具。

物理学是定量的科学,数学是表达物理规律和解决物理问题必不可少的工具。在物理教学中,我们一方面要培养学生针对物理问题建立正确数学模型的能力,使其熟练运用数学工具分析和解决物理问题,同时也要防止学生脱离物理意义而简单搬用数学工具,防止数学知识和方法对物理学习的负迁移。

在牛顿第三定律的教学中,当通过实验得出作用力和反作用力大小相等、方向相反、作用在同一直线上

*浙江省教科规划2013年重点研究课题《传统物理课程的不足之研究:课程考古学的方法》(SB067)的研究成果之一。

构,并纷纷提出各种各样的原子模型和相应的原子图像。在历史上所提出的各种原子模型中,根据量子力学理论提出的量子原子模型(quantum atomic model)是最新的。然而,人们根据量子原子模型作出了不同的原子图像。其中,由德国学者赫尔曼(F. Herrmann)提出来的电素(electronium)^[1]图像是目前最新的一种。实践证明,根据这一概念所开发的关于原子结构的课程比传统课程更有利于教学,即最利于学生接受^{[2][3]}。这一课程内容最早出现在赫尔曼所编写的卡尔斯鲁厄物理课程(简称KPK)中^[4]。本文将在回顾原子模型发展历史的基础上,介绍电素这一概念和KPK的相关内容。

一、原子模型发展历史

1. 汤姆孙的原子模型

汤姆孙(J. J. Thomson, 1856—1940)在1897年发现电子后,于1898年提出了一种原子模型。根据这一模型,原子的图像是这样的:原子是一个直径大约为 10^{-8} 厘米的均匀带正电荷的球,在球中又嵌有一些带负电荷的粒子。

根据电磁学的原理,汤姆孙计算出了带负电荷的粒子所处的平衡位置。当这些带负电荷的粒子围绕这些平衡位置振动时,原子就会发出某种频率的电磁波。

汤姆孙利用他的原子模型计算了原子中含有各种负电荷数情况下带负电荷粒子振动的本征频率。对于原子中只含有一个负电荷数的情况,计算结果是令人鼓舞的。然而,对于多个负电荷数的情况,计算结果和当时已知的光谱实验数据不相符^[5]。

2. 卢瑟福的原子模型

然而,对汤姆孙的原子模型的致命打击还是来自于他的学生卢瑟福(E. Rutherford, 1871—1937)。从1906年到1910年,卢瑟福从事 α 粒子穿过金箔时发生散射方面的研究。他在一次实验中偶然发现, α 粒子的散射中有大角度的散射。为了解释这一现象,他继续他的大角度散射测量,发现用汤姆孙模型不能解释这一实验事实。1911年,卢瑟福提出了新的原子结构模型,即核式结构模型。他认为,原子中带正电部分的体积很小,但几乎占有原子的全部质量,电子在正电体外面运动。

卢瑟福的原子结构模型很好地解释了 α 粒子散射实验。但经典物理学的理论既无法解释原子的稳定性,又无法解释光谱的分立特征。一方面,按照经典物理学,原子核外的电子受到原子核的库仑力的作

用,它不可能是静止的,一定以一定的速度绕核运动。既然电子在运动,它的电磁场就在变化。而变化的电磁场会激发出电磁波,因而电子的能量会不断减少,电子会失去能量而掉到原子核上。但事实上,原子在一定条件下是稳定的。另一方面,根据经典电磁理论,电子辐射电磁波的频率就是它绕核运动的频率。这个频率应该是连续变化的,即原子的光谱应该是连续的。而实际上,我们看到的是分立的线状谱。

3. 玻尔的原子模型

玻尔(N. Bohr, 1885—1962)意识到了经典理论在解释原子结构方面的困难。他在普朗克关于黑体辐射的量子论和爱因斯坦关于光子的概念的启发下,于1913年提出了玻尔原子结构模型。他认为,电子的轨道是量子化的。当电子在不同轨道上运动时,原子处于不同的状态。原子在不同的状态下具有不同的能量。因此,原子的能量也是量子化的。因而,原子在不同的定态下具有相应的能级。

玻尔的原子模型第一次将量子观念引入原子领域,成功地解释了氢原子光谱的实验现象。但对于稍微复杂一些的原子(如He原子),玻尔模型无法解释它的光谱现象。实际上,玻尔的原子模型还保留了经典粒子的观念,仍把电子的运动看做轨道运动。因此,玻尔的原子模型还不是真正意义上的量子力学理论下的原子模型。

4. 量子原子模型

量子力学是研究微观粒子(分子、原子、原子核、基本粒子)运动规律的理论。它是20世纪20年代在总结大量实验事实和旧量子论的基础上建立起来的近代物理学理论。根据量子力学的理论,原子中电子的坐标没有确定的值。因此,我们不能把电子的运动看做一个具有确定坐标的质点的轨道运动。由于电子等微观粒子具有波粒二象性,因此,我们无法用坐标、动量等物理量来描述它们的状态。然而,我们可以用态函数来描述微观粒子的状态。这个态函数叫波函数,一般用 $\Psi(r, t)$ 表示。

粒子状态随时间变化的规律由薛定谔方程(Schrodinger equation)给出。对于在势场 $U(r, t)$ 的粒子(质量为 m),相应的薛定谔方程为

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + U(r, t) \Psi \quad ①$$

如果 U 不含时间,即 $U=U(r)$ (只有一个电子的氢原子系统就属于这种情况),上述方程可写为

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + U(r) \Psi = E \Psi \quad ②$$

这个方程的解可以用分离变量法进行一些简化,它的一种特解为

$$\Psi(r,t) = \Psi(r)f(t) = \Psi(r)e^{-\frac{E}{\hbar}t} \quad (3)$$

这个波函数与时间的关系是正弦式的,它的角频率 $\omega = \frac{E}{\hbar}$ 。根据德布罗意关系式 $E = h\nu = \hbar\omega$, E 是系统处于这个波函数所描写的状态时的能量。由此可见,系统的能量具有确定值。所以, $\Psi(r,t)$ 描述的状态是一个定态,它是定态波函数。因而,方程②被称为定态薛定谔方程。而 $\Psi(r)$ 也被称为波函数,因为知道了 $\Psi(r)$ 后,也就知道了 $\Psi(r,t)$ 。

二、对量子原子模型的解释

在原子物理学中,对波函数的解释实际上就是对量子原子模型的解释。那么,究竟怎样理解波函数和它所描述的粒子之间的关系呢?对这个问题曾经有过各种不同的看法^[6]。

例如,有人认为波函数所对应的波是由它所描述的粒子组成的。显然,这种解释是不正确的。如果波真是由它所描述的粒子所组成,则粒子流的衍射现象应当是由于组成波的这些粒子的相互作用而形成的。但事实证明,在粒子流衍射实验中,照片上所显示的衍射图样和入射粒子流的强度无关,也就是说,和单位体积中的粒子数无关。如果减小入射粒子流的强度,同时延长实验时间,使投射到照片上的粒子总数保持不变,则得到的衍射图样完全一样。即使把粒子流的强度减小到使得粒子一个一个地被衍射,只要经过足够长的时间,所得到的衍射图样也还是一样的。这说明,衍射图样不是由粒子之间的相互作用而形成的。

还有其他一些解释波函数的观点,但都因与实验事实不符而被否定了。在解释量子原子模型时,有两种解释被人们所关注,一种是玻恩(Max Born)提出来的概率(probability)解释,另一种是赫尔曼(Friedrich Herrmann)提出来的电素(electronium)解释。这两种解释都不是新的原子结构模型,但它们却给了我们不同的原子图像。正如前面所说,原子是没有模样的,但我们仍可以根据一定的理论来画出相应的原子图像。这两种原子图像都能帮助我们正确理解量子原子模型所揭示的原子结构。

1. 玻恩的概率解释

1926年玻恩提出了波函数的统计解释:波函数在空间中某一点的强度(振幅绝对值的平方)和在该点找到粒子的概率成比例。

对于由波函数 $\Psi(r,t)$ 所描述的粒子,在时刻 t 在 r 点周围单位体积内粒子出现的概率密度是

$$\rho(r,t) = \Psi^*(r,t)\Psi(r,t) \quad (4)$$

因而,在一个很小体积 ΔV 内找到电子的概率为 $\Psi^* \Psi \cdot \Delta V$ 。相应的流密度(即概率流密度)为

$$j = \frac{i\hbar}{2m} (\Psi \nabla \Psi^* - \Psi^* \nabla \Psi) \quad (5)$$

对氢原子,我们可以根据波函数预言电子在特定位置的概率。电子距原子核的最可能的距离被发现等于玻尔轨道半径。这样,电子在任一半径处的概率就可被计算出来。其中,发现电子概率高的区域被称为电子云(electron cloud)。图1是一个原子的电子云。从图中可以看出,越靠近原子核的地方,找到电子的概率越大。

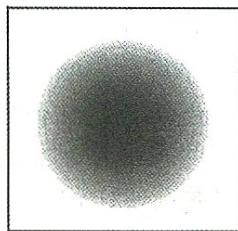
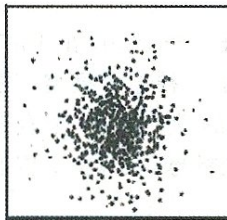


图 1

图 2

2. 赫尔曼的电素解释

在上世纪90年代赫尔曼提出了电素的概念^[1]。他认为,根据量子原子理论,原子壳层可以看成由围绕原子核的连续物质组成。这种物质叫做电素,如图2所示。虽然电素是连续分布的,然而,电素的密度不是处处相同的。在原子核附近,电素密度最大。随着离原子核的距离的增大,它先很快地减小,然后减小得越来越慢。由于电素分布是球对称的,所以原子壳层的形状是球形的,但它没有明显的边界。为了确定一个原子的大小,我们取能覆盖90%的电素的半径作为原子的半径。

如果我们将原子中的电素取一部分出来,我们只能取出它的基本部分,或基本部分的整数倍。电素的基本部分(即能取出来的最小部分)叫做电子。因而,电素是量子的。

跟用概率来描述原子的方法一样,用电素来描述原子的方法也基于量子力学的理论。用电素画出来的某一原子图像实际上是薛定谔方程对这个原子的解。

下面我们来具体讨论电素这一原子图像的理论依据。④、⑤式所表示的概率密度和概率流密度遵循连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} j = 0 \quad (6)$$

将基本电荷量 e 乘以概率密度和概率流密度,我们得到相应的电素的电荷密度 ρ_e 和电流密度 j_e ,它们也遵守相应的连续性方程,即

$$\begin{aligned}\rho_e &= e\Psi^* \Psi \\ j_e &= \frac{e\hbar}{2m}(\Psi \nabla \Psi^* - \Psi^* \nabla \Psi) \\ \frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \text{div} j_e &= 0\end{aligned}$$

同样,将电子的质量乘以概率密度和概率流密度,我们得到相应的电素的质量密度和质量流密度,它们也遵守相应的连续性方程,即

$$\begin{aligned}\rho_m &= m\Psi^* \Psi \\ j_m &= \frac{i\hbar}{2}(\Psi \nabla \Psi^* - \Psi^* \nabla \Psi) \\ \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \text{div} j_m &= 0\end{aligned}$$

根据③式我们知道,在定态中,电素的电荷密度、电流密度、质量密度和质量流密度都与时间无关。因而,我们可以画出定态中原子中的电素分布图。由于概率密度和概率流密度是连续的,因此,电素也是连续分布的。

三、电素在物理教育中的意义

到目前为止,量子原子模型是最现代的原子模型。对这一模型最流行的解释是玻恩的概率解释,与这一解释相对应的原子图像是电子云图像。尽管这一解释的理论依据是量子力学理论,是正确的,然而,在物理教育中它存在一定的不足^{[2][3]}。

首先,学生在学了概率解释后,仍然摆脱不了玻尔的原子模型所产生的影响。他们仍然把电子看做绕核运动的粒子,只不过现在他们同时把电子看做具有波粒二象性的量子而已。其次,他们仍然认为电子在原子中是在运动的,尽管他们知道这种运动没有确定的轨道。

在电素解释中,电素是一种在原子中连续分布的物质,而不是粒子。根据量子力学理论,在定态,概率密度是不随时间变化的,因此,在定态,电素的任何部分都是不动的。当原子从高能级跳到低能级时,电素将重新分布,而这种重新分布将导致电磁辐射。这样,这一解释既符合量子力学理论,又能使学生消除旧原子模型的影响,尤其是在帮助学生建立“在定态时电子是不运动的”这一重要的量子原子模型的图像时,这一解释显示出很重要的作用。

另外,电素在解释许多与原子有关的现象和规律

时具有独特的优越性。比如,在 KPK 中,教材作者是这样描述原子壳层的大小和密度按周期性变化的规律的:^[4]

作为一种思想实验,我们用质子、中子和电子来逐渐构建各种不同的化学元素,看看原子的大小和密度是怎样变化的。中子对原子的大小没有影响,所以我们将不再提及它们。我们从氢原子开始研究。氢原子有一个质子作为原子核,有一个基本部分的电素作为壳层。

我们将质子的数量增加一个,得到一个带正电荷的氦离子。现在由于两个正电荷的质子拉着带负电的电素,所以电素向原子核更靠近一点。氦离子比氢原子更小。这就意味着氦离子的电素的密度更大。

为了得到一个氢原子,下一步我们将一个电子加上去。原子壳层像一个充入额外空气的气球一样膨胀起来。氢原子有两部分电素,它比只有一部分电素的氦离子需要更大的空间——氢原子比氦离子更大。

按照这样的方式分析下去,学生很容易找到原子壳层的大小和密度按周期性变化的规律。KPK 教材给出了一张很形象的原子构建图,如图 3 所示。

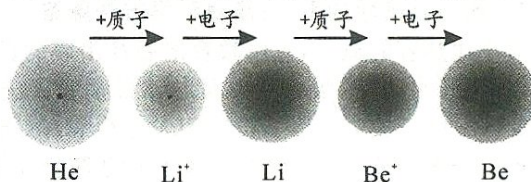


图 3

教学实践证明,与电素所对应的原子图像不但符合量子力学理论,也符合学生的认知特点,容易被学生接受。

参考文献

- [1] Herrmann F. The Karlsruhe Physics Course[J]. European Journal Physics, 2000, 21(1): 49-58.
- [2] Budde M., Niedderer H., Scott P., Leach J.. "Electronium": a quantum atomic teaching model[J]. Physics Education, 2002, 37(3): 197-203.
- [3] Budde M., Niedderer H., Scott P., Leach J.. The quantum atomic model "Electronium": a successful teaching tool[J]. Physics Education, 2002, 37(3): 204-210.
- [4] F. Herrmann. 德国卡尔斯鲁厄物理课程·中学物理 1-3[M]. 陈敏华,译. 上海:上海教育出版社, 2007.
- [5] 邓飞帆,葛昆龄,王祖恺. 普通物理疑难问答[M]. 长沙:湖南科学技术出版社, 1984: 305-309.
- [6] 周世勋. 量子力学教程[M]. 北京:高等教育出版社, 1979: 17-18.