

普通高中课程标准实验教科书

物 理

选修 3—5

教师教学用书

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 编著

人教版®

人民教育出版社

主 编：唐果南
副 主 编：周智良 张 颖
编写人员：周智良 张忠俊 王 焱 谭俊贤 唐果南
张维善 孙 新 彭 征 苗元秀 付荣兴
周祖友 张 羽 龚 彤 赵小平
责任编辑：谷雅慧 苗元秀

图书在版编目(CIP)数据

普通高中课程标准实验教科书物理选修3-5 教师教学用书/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编著.—4版.—北京:人民教育出版社,2010.4(2019.7重印)
ISBN 978-7-107-19165-7

I. ①普… II. ①人… ②课… III. ①中学物理课—高中—教学参考资料 IV. ①G633.73

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第034919号

普通高中课程标准实验教科书 物理 选修 3-5 教师教学用书

出版发行 人民教育出版社
(北京市海淀区中关村南大街17号院1号楼 邮编:100081)
网 址 <http://www.pep.com.cn>
经 销 全国新华书店
印 刷 北京天宇星印刷厂
版 次 2010年4月第4版
印 次 2019年7月第26次印刷
开 本 890毫米×1240毫米 1/16
印 张 11.5
字 数 285千字
定 价 22.60元

版权所有·未经许可不得采用任何方式擅自复制或使用本产品任何部分·违者必究
如发现内容质量问题、印装质量问题,请与本社联系。电话:400-810-5788

说 明

本书是在《普通高中课程标准实验教科书物理选修3—5教师教学用书》的基础上,根据几年来实验地区的一些反映,修订而成的。旨在帮助教师更好地使用《普通高中课程标准实验教科书物理选修3—5》,为教学提供一些参考。

本书介绍了教科书的特色,新的教学理念和一些新的教学方式、方法,与教科书采取“紧密配合”的方式,逐章逐节进行分析说明。本书的主要结构如下:

课程标准的要求 摘录了《普通高中物理课程标准(实验)》(以下简称《课程标准》)的相关内容,作为教学的依据。

本章教材概述 主要介绍本章教科书的编写意图,主要内容和教材结构的特点,以及在选择内容和讲述方法上的考虑。

教材分析与教学建议 根据课程标准及教科书,对每一节教学内容提出了具体的教学目标,并且对教材内容提出了比较详细的建议,包括教学过程中可能遇到的问题,供选择的教学方法,怎样发展学生的非智力因素,怎样使用教科书中的栏目、插图,怎样以课程理念处理教学问题,如何发展教师自身的教学能力,如何处理数字化教学,如何帮助学生进行探究等。

问题与练习 从“内容分析”和“解答与说明”两部分对教科书“问题与练习”中的问题给出了较为详细的解答。

教学设计案例 主要目的是给实验地区的教师提供一些教学设计方面的参考,包括一些重点难点的分析、把握、处理,整堂课的设计思想、具体安排等。

教学资源库 是与教学内容相关的教学资源,包括“概念、规律和背景资料”“联系生活、科技和社会资料”“实验参考资料”三个部分。课程新理念需要教师进一步提高职业素质,需要教师尽早进入终身学习的轨道,我们在这里围绕教学的需要选择了一些拓展性的内容,为教师的素质发展提供一些线索。

补充习题 教科书由于篇幅所限,不可能编写太多的习题。我们在这里补充了一些习题,供老师们在教学中选用。

本书原编写者还有:李天鹏、胡安书、黄全安。

本书在编写过程中得到北京市、浙江省、江苏省、山东省、重庆市、天津市、安徽省、江西省、辽宁省等全国各地教研室的热情支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

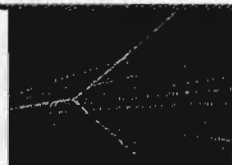
对于书中存在的缺点和错误,欢迎教师和物理教育工作者们及时批评、指正。来函请寄:100081 北京市海淀区中关村南大街17号院1号楼 人民教育出版社物理室 收。

人民教育出版社 物理室

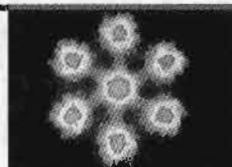
2010年4月

目 录

第十六章 动量守恒定律	1
一、本章教材概述	1
二、教材分析与教学建议	4
第1节 实验：探究碰撞中的不变量	4
第2节 动量和动量定理	8
第3节 动量守恒定律	12
第4节 碰撞	16
第5节 反冲运动 火箭	21
三、教学设计案例	24
反冲运动 火箭	24
四、教学资源库	27
(一) 概念、规律和背景资料	27
(二) 联系生活、科技和社会的资料	33
(三) 实验参考资料	38
五、补充习题	43



第十七章 波粒二象性	50
一、本章教材概述	50
二、教材分析与教学建议	53
第1节 能量量子化	53
第2节 光的粒子性	56
第3节 粒子的波动性	61
第4节 概率波	63
第5节 不确定性关系	65
三、教学设计案例	68
光的粒子性	68
四、教学资源库	72
(一) 概念、规律和背景资料	72
(二) 联系生活、科技和社会的资料	83
五、补充习题	86



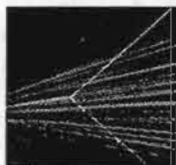
第十八章 原子结构	90
一、本章教材概述	90
二、教材分析与教学建议	93
第1节 电子的发现	93
第2节 原子的核式结构模型	97
第3节 氢原子光谱	100
第4节 玻尔的原子模型	103
三、教学设计案例	106
原子的核式结构模型	106
四、教学资源库	110
(一) 概念、规律和背景资料	110
(二) 联系生活、科技和社会的资料	121
(三) 实验参考资料	125
五、补充习题	129



第十九章 原子核	133
一、本章教材概述	133
二、教材分析与教学建议	136
第1节 原子核的组成	136
第2节 放射性元素的衰变	139
第3节 探测射线的方法	142
第4节 放射性的应用与防护	144
第5节 核力与结合能	146
第6节 核裂变	149
第7节 核聚变	152
第8节 粒子和宇宙	153
三、教学设计案例	154
放射性元素的衰变	154
四、教学资源库	157
(一) 概念、规律和背景资料	157
(二) 联系生活、科技和社会的资料	166
(三) 实验参考资料	170
五、补充习题	171



第十六章 动量守恒定律



课程标准的要求

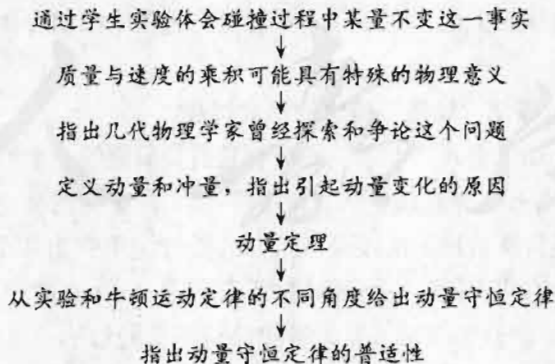
1. 探究物体弹性碰撞的一些特点。知道弹性和非弹性碰撞。
2. 通过实验，理解动量和动量守恒定律。能用动量守恒定律定量分析一维碰撞问题。知道动量守恒定律的普遍意义。
3. 通过物理学中的守恒定律，体会自然界的和谐与统一。

一、本章教材概述

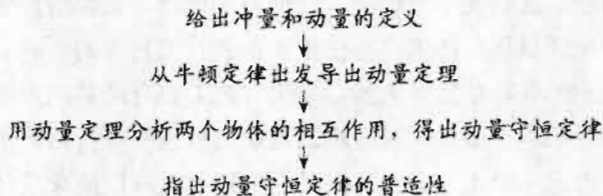
由于动量守恒定律是自然界的基本守恒定律之一，是研究微观粒子所必需的知识，具体来说，要学习原子结构和原子核的内容，动量的知识是不可缺少的，所以，《课程标准》将动量的内容后置于选修系列3—5模块，而不同以往动量的内容被设置于力学部分。这样调整的目的不仅要求学生学会用动量守恒定律来解决宏观物体的相互作用问题，更重要的是要求以新的观点来认识动量守恒定律，为进一步认识微观粒子的相互作用问题铺垫。

本章从结构设计上与过去相比变化较大，其核心是要体现学习中的探究精神，强调物理学中“守恒量”的思想。

新教科书具体的逻辑线索如下。



以往教科书的逻辑线索如下。



本章知识内容共5节，大致可以划分为两个单元。

第一单元包括第1、2、3节，即“实验：探究碰撞中的不变量”“动量和动量定理”和“动量守恒定律”，这部分内容侧重动量概念的引入、动量的变化以及动量守恒定律的建立。

第二单元包括第4、5节，即“碰撞”和“反冲运动 火箭”，这部分内容是从动量守恒定律应用的角度展开的。

在编写本章内容时有以下一些思考。

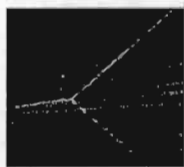
1. 在追寻“不变量”中感悟自然界的和谐与统一

编者在关于动量及其守恒定律的处理中力求突出两点：其一，体现学习中的探究精神；其二，强调物理学中“守恒”的思想。动量守恒定律在本教科书中既不是由牛顿运动定律推导出来的，也不是由学生的实验数据归纳出来的。这与能量守恒定律的建立相似，动量守恒定律不是哪个人在哪个确定的年代经过某个实验或某段数学推导而得到的，它是科学家们达到的“共识”。

本章的设计是从实验探究入手，引导学生追寻碰撞中的“不变量”。这种思想方法对学生来说并不陌生，如在学习《物理必修2》中“机械能守恒定律”一章时就曾有接触。这样处理的目的，一方面是为“动量”概念的引入提供实验基础；另一方面，是让学生亲身体验探究自然规律的过程，感悟自然界的和谐与统一。教科书设计的实验，探究性很强，实验的结论没有给出，这样就增加了实验的难度。不过，为帮助学生沿着正确的方向进行实验，课文在适当环节给出了提示。如，实验以“实验的基本思路”和“需要考虑的问题”展开。其中，实验的设计、对“不变量”的推测、实验的操作、数据的处理……都有明确说明。另外，由于《课程标准》没有对实验的具体做法、使用的器材等做出硬性的规定，为便于提出不同的实验方法，引导学生注重实验中的科学思想，教科书从不同角度呈现三种实验案例供选择，这样就可以因地制宜地进行实验教学。需要让学生明确的是：课文中提到的“不变量”并不是“守恒量”。要学生确切理解“守恒量”是学习物理的关键，而有限的几次简单的测量是得不出普适性的物理规律的。但是，应该看到，这样的结果会给我们一个强烈的提示：两个物体在碰撞过程中很可能存在“守恒量”的。应该说，这个猜测是具有实验基础的，但真正要发现规律，其结论不是能简单得出的，只有当从结论推导出的很多新结果都与事实一致时，它才能成为规律。尽管这样的过程学生不可能完成，但他们在追寻“不变量”过程中的切身体验，却是十分有教育价值的。

2. 渗透科学史教育，深化“动量”概念的形成过程

在中学物理教学中，如何引入“动量”的概念是需要研究的一个问题。过去的教科书多是通过具体实例，得出 $Ft=mv$ ，并直接引入“动量”和“冲量”的概念，然后推导动量定理，并说明前式是动量定理的特殊情形。应该说，这样的处理注重突出几个物理概念定义的给出。本书在这个问题的处理上有所不同。它所关注的不仅仅是 $p=mv$ 的定义，而是更关注在追寻“不变量”的实验基础上，由碰撞前后 mv 矢量和保持不变的启示，自然引出“动量”的概念的过程。同时从科学史的角度，展示几代科学家在追寻“不变量”的努力中，逐渐明确“动量”概念形成的历史过程。这就使学生明确，任何科学概念、规律的形成都不是简单拼凑得出的，它需要严格的科学论证过程。体现了在注重知识和技能目标的同时，更关注情感、态度和价值观方面的教育意义。另外，动量是矢量，学生对此必须有清楚的理解，这里再次涉及对矢量运算的认识问题。动量的运算服从矢量运算的规则，要按照平行四边形定则进行。动量矢量在同一条直线上时，在选定一个正方向之后，动量的运算就可以简化成代数运算。



3. 以新的观点处理动量守恒定律

以往的教科书多是从动量定理和牛顿第三定律直接推导出动量守恒定律,并通过实验验证动量守恒定律,这对快速解决碰撞问题是有效的。本书立足多角度引导学生正确认识动量守恒定律。在追寻“不变量”的探究实验和“动量”概念的基础上,引入系统、内力、外力的概念,并通过实例指明区分内力和外力的方法,以及对外力远小于内力情况下,外力可以忽略不计的具体实例的分析方法。需要特别指出的是:在动量守恒定律的表述上,本书力求简洁、严谨、明了,即“如果一个系统不受外力,或者所受外力的矢量和为0,这个系统的总动量保持不变”。其中最明显的改变是将过去教科书中表述的“外力之和”修改为“外力的矢量和”。目的是强调外力之和的矢量合成性质。所谓“外力的矢量和”是指把作用在系统上的所有外力平移到某点后算出的矢量和。这一点,教科书通过具体实例明确说明。为使学生深入理解动量守恒定律,理解力与运动的关系,本书将动量守恒定律与牛顿运动定律密切结合,使学生深刻认识到系统的动量在整个过程中一直“保持不变”的含义。换言之,“不变”不等于“守恒”,而“保持不变”才意味着“守恒”的存在,这一点会使学生逐步熟悉用“守恒”的观点来处理问题。同时,通过实例揭示了牛顿运动定律从“力”的角度反映物体间的相互作用,动量守恒定律从“动量”的角度描述物体间的相互作用的本质。另外,应该使学生知道,动量守恒定律不仅适用于碰撞,也适用于任何形式的相互作用。动量守恒定律的普适性,为学生深层次认识自然界的和谐与统一提供了很好的例证。同时应该看到,动量守恒定律也为解决力学问题开辟了新的途径。教科书以“弹性碰撞和非弹性碰撞”“对心碰撞和非对心碰撞”“散射”“反冲”“火箭”为例,展示了动量守恒定律解决碰撞问题的优势所在。其中特别应该指出的是,要引导学生以新的观点来认识动量守恒定律,如微观粒子间的相互作用问题——散射。

4. 尝试用动量概念表示牛顿第二定律

本章动量概念引入方式的改变以及动量定理的导出,目的是引导学生尝试用动量的概念表示牛顿第二定律,从而明确动量定理的物理实质与牛顿第二定律是相同的。这样处理有助于对动量概念以及描述力与运动的关系问题有更加深入的理解。动量定理和动量守恒定律不但适用于恒力,而且适用于变力,正因为适用于变力,它们才有广泛的应用。不过,因其理论推导较难,在中学阶段不宜做过高要求,教科书用积分的思想(必修物理模块部分有渗透)定性说明。这样可以开阔学生的思路,便于他们自觉地运用所学知识来处理问题。在变力的情况下,动量定理公式中的 F 应理解为变力在作用时间内的平均值。

5. 在真实、有意义的情境中应用动量守恒定律

本章“碰撞”一节设计的想法不是为了提高学生对碰撞知识的理解,而是把它作为载体,深入细致地贯彻科学探究的教学理念。

我们知道,碰撞问题是动量守恒定律、机械能守恒定律这些最基本内容的应用,研究碰撞问题可以在真实、有意义的情境中复习这些基本内容。因此,在碰撞这节的教学中教师心中不应想着学生是否掌握了碰撞的结论,而应想着学生是否能够灵活地运用动量守恒定律和机械能守恒定律解决问题。碰撞这一节实际上是学过动量之后的习题课。习题的结论是无需记忆的,所以,也不要让学生背诵各种情况下碰撞的结论,更不应让学生以这些结论为前提去解新的题目。

另外,教科书在得到碰撞后两球速度的关系式后,通过这个公式讨论了 $m_1 = m_2$ 、 $m_1 \gg m_2$ 、 $m_1 \ll m_2$ 这样几种情形下碰后速度的关系。这样做的目的是向师生传递一个信息:物理学中公式的作用远远不是只用于数值计算,通过公式可以看出不同物理量之间的依存关系、看出

某些物理量的变化趋势，可以从中得出很多定性的结论。这种能力对于学生学好物理学是很重要的。

应该看到，公式预言了以上三种情况下两球碰后速度的关系，这实际上就是根据动量守恒定律和机械能守恒定律给出的预言。对碰撞结论的检验就是对这两个基本定律的检验。所以，这节课是科学探究的一个片断。学生通过生活经验已经对于这几类碰撞的结果有了自己的预期，应用物理知识和数学知识进行分析后，看看结论是否与生活经验一致，这是对于分析过程的一种“评估”。

因此，这节课是一节科学探究的教学。新课程十分突出教学中的科学探究，但科学探究不能是形式主义的，它渗透于全部教学内容之中。

课时安排建议

第1节	实验：探究碰撞中的不变量	2学时
第2节	动量和动量定理	2学时
第3节	动量守恒定律	2学时
第4节	碰撞	1学时
第5节	反冲运动 火箭	1学时

二、教材分析与教学建议

第1节 实验：探究碰撞中的不变量

1. 教学目标

- (1) 了解生产、生活中的碰撞现象。
- (2) 经历两个物体碰撞前后会不会有什么物理量保持不变的猜想过程。
- (3) 通过实验探究，经历寻找碰撞中“不变量”的过程，领会实验的基本思路，感悟自然界的和谐与统一。
- (4) 培养学生的实验技能，特别是数据采集和分析的技能。

2. 教材分析与教学建议

本节教材从生产、生活中的现象（包括实验现象）中提出研究的问题——碰撞前后会不会有什么物理量保持不变呢？接着提出了猜想。为了证实猜想而提出了“实验的基本思路”和实验中“需要考虑的问题”。同时，提供三套实验方案供学校选择，最后让学生亲自动手，经历并体验寻找碰撞中“不变量”的过程。教学内容的核心是引导学生经历碰撞问题的研究过程。一方面为下两节“动量和动量定理”“动量守恒定律”的引入提供实验的基础；另一方面，让学生亲身经历探究自然规律的过程，感悟自然界的和谐与统一。同时，将实验技能的训练与科学探究过程的体验有机地结合也是不容忽视的。

教科书设计这样一节实验课,有意识地安排在“动量和动量定理”及“动量守恒定律”之前,教学中不要随意将其放到后面,否则就难以达到探究式学习的目的。

(1) 实验的基本思路

教师可以引导学生回顾《物理必修2》中“机械能守恒定律”一章的“追寻守恒量——能量”。一方面是强调物理学中“守恒”的思想;另一方面为物理概念的引入、物理规律的建立提供实验基础。

通过列举台球碰撞、两节火车车厢之间的挂钩靠碰撞连接等生产、生活中的事例引入课题。建议教科书图 16.1-1 所示的实验两个小球均用双线摆,引导学生分别观察质量相等的小钢球碰撞、质量相差较多的小钢球碰撞的现象,这样会极大地引起学生的兴趣,使他们在观察的基础上积极思考实验中出现的现象,也为学生猜想碰撞中的不变量提供了一定的实验依据。

教师要明确《课程标准》和教科书都只要求研究一维碰撞,这既符合物理学“从简单问题着手进行研究”的惯例,也符合学生的认知规律。

通过实验寻找“不变量”,在一定意义上增加了实验的难度。因此在实验前要下工夫引导学生思考问题,关注碰撞问题所表现出的物体运动状态的改变。物体的速度是描述物体运动状态的物理量,物体的运动状态变化是以速度这一物理量的变化表现出来的。通过课本中的演示实验的结果应该看出,两物体碰撞后质量虽然没有改变,但运动状态改变的程度与物体质量的大小有关。鼓励他们大胆猜想:寻找的“不变量”应该是与物体的质量、速度有关。让学生展开想象的翅膀,除教科书上罗列的三个猜想以外,还可以提出别的猜想。

(2) 需要考虑的问题

这个内容是承接前面的内容,进一步细化的。让学生猜想碰撞前后可能的“不变量”后,设计所要测量的物理量,即碰撞前后的速度以及物体的质量。为帮助学生沿正确的方向进行实验,课文在适当环节给出了提示。如保证实验的条件(一维)、质量和速度的测量、速度的矢量性、实验的操作、数据的记录和处理……都有明确说明。

教学中要针对具体的参考案例设计实验,要求说明其实验原理、实验条件、需要测量的物理量、重要的实验步骤、数据的记录、数据的处理等。

对于书中列出的三个参考案例,应结合学校和学生的实际,重点介绍其中之一,并准备好器材,做好分组实验进行探究。“实验”是本节教学的一个重中之重,引导学生要通过实验,亲自去发现隐藏在现象背后的自然规律。千万不要纸上谈兵,那样会失去教材编写者的本意。

①参考案例一

不仅能保证碰撞是一维的,还可以做出多种情形的碰撞,速度的测量误差较小,准确性较高,这个方案是本实验的首选。

在这一方案中,有可能出现这样的碰撞结果,数据记录和处理后,出现了 $m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 = m_1 v_1'^2 + m_2 v_2'^2$,这是由于进行的是弹性碰撞,此时要提醒学生,在其他的碰撞情形中, mv^2 也会变的,所以 mv^2 不是碰撞中的不变量。

可能的学校不一定能提供多套气垫导轨和光电门,可以考虑改为演示实验,也能达到探究的效果。

②参考案例二

要想办法确保碰撞是一维的,建议两个小球均用双线摆;由于角度的测量有困难,建议用下面的方法来较为准确地测量被撞小球摆起的角度:用一块木板,上面固定一张白纸,把它放在两个小球摆动、碰撞、摆动的那个竖直平面的后面,先用铅笔描下一个小球拉起静止时细线

和小球的位置，同时用铅笔描下被撞小球静止时细线和小球的位置。两个小球碰撞后，再用铅笔描下它们摆动所能达到最高时小球的位置，可以采取第一次先粗略描出，第二次再相对精确描出。

③参考案例三

为了确保碰撞是一维的，建议承载小车的木板是有导轨的，两辆小车只能在导轨上运动；由于只有一个打点计时器，适合于研究完全非弹性碰撞。建议用小车重力的下滑分力来平衡小车运动时所受到的阻力，把楔形木板放在导轨支承板下，使导轨倾斜到轻推一下放在上面的小车就能做匀速运动。

下面提供一个大多数学校均能准备分组实验器材的参考案例。

实验装置如图 16-1 所示。让一个质量较大的小球 m_1 从斜槽上滚下来，跟放在斜槽末端的另一质量较小的小球（半径相同） m_2 发生碰撞（正碰）。

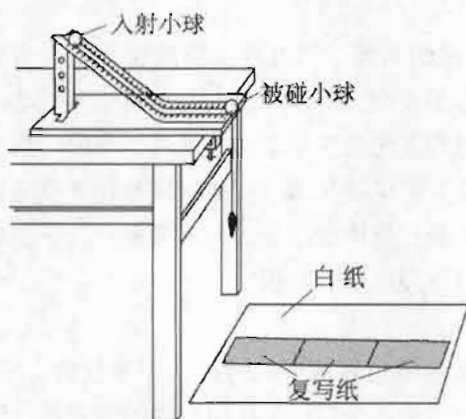


图 16-1

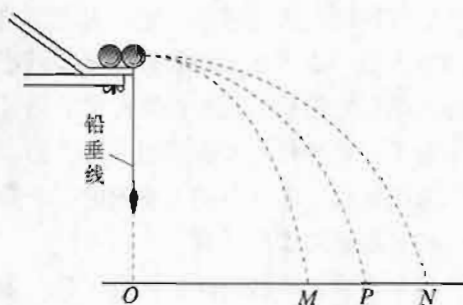


图 16-2

小球的质量可以用天平称出。怎样简便地测出两个小球碰撞前后的速度呢？两球碰撞前后的速度方向都是水平的，因此两球碰撞前后的速度可以利用平抛运动的知识求出。在这个实验中，做平抛运动的小球落到地面，它们的下落高度相同，飞行时间 t 也就相同，它们飞行的水平距离 x 与小球开始做平抛运动时的水平速度 v 成正比 ($x=vt$)。

设小球下落的时间为 t ，质量为 m_1 的入射小球碰前的速度为 v_1 ，碰撞后，入射小球的速度为 v_1' ，被碰小球的速度为 v_2' 。则在图 16-2 中

$$\begin{aligned} OP &= v_1 t & v_1 &= \frac{OP}{t} \\ OM &= v_1' t & v_1' &= \frac{OM}{t} \\ ON &= v_2' t & v_2' &= \frac{ON}{t} \end{aligned}$$

本实验设计思想巧妙之处在于通过运用平抛运动的规律，达到用长度测量代替速度测量的目的。



探究碰撞中的不变量

实验装置：指导学生分组安装好实验装置（图 16-1）。

实验设计：将斜槽固定在桌边，使槽的末端点的切线是水平的。被碰小球放在斜槽前端边缘处。为了记录小球飞出的水平距离，在地上铺一张白纸，白纸上铺放复写纸，当小球落在复写纸上时，便在白纸上留下了小球落地的痕迹。在白纸上记下铅垂线所指的位置 O （图 16-2）。

实验操作：先不放上被碰小球，让入射小球从斜槽上某一高处滚下，重复 10 次。用尽可能小的圆把所有的小球落点圈在里面。圆心 P 就是小球落点的平均位置。

把被碰小球放在斜槽前端边缘处，让入射小球从原来的高度滚下，使它们发生碰撞。重复实验 10 次。用同样的方法标出碰撞后入射小球的落点的平均位置 M 和被碰小球的落点的平均位置 N 。

用天平测出两个小球的质量，用刻度尺测量线段 OM 、 OP 、 ON 的长度。线段 ON 的长度是被碰小球飞出的水平距离； OM 是碰撞后小球 m_1 飞行的水平距离； OP 则是不发生碰撞时 m_1 飞行的距离。它们分别代表了入射小球碰前的速度为 v_1 、碰撞后的速度 v_1' 和被碰小球碰后的速度 v_2' 。把数据填入设计好的表格中。

改变入射球的高度，或者改变两个小球的材质，重复上述实验步骤，再做一次。

数据处理：分析表格中的实验数据，得出结论。

注意事项：①斜槽末端的切线必须水平；②入射球与被碰球的球心连线与入射球的初速度方向一致；③入射球每次都必须从斜槽上同一位置由静止开始滚下；④地面须水平，白纸铺好后，实验过程中不能移动，否则会造成很大误差。

思考：本实验中，如果用质量较小的电木球作入射球，用钢球作靶球可不可以？请试一试，并分析现象产生的原因。如果入射球和靶球都用相同质量的钢球可不可以？请试一试。

3. 问题与练习

内容分析

第 1 题仍然是让学生进行寻找两个小球碰撞中的“不变量”的猜想，鼓励学生大胆提出猜想。

第 2 题则是通过处理打点计时器打出的纸带，相当于在处理“参考案例三”的实验数据，从而验证猜想。

这两个习题很好地支持了本节教材，要认真对待。

解答与说明

1. 在碰撞中 2 球的质量与速度的乘积的增加量为 $0.1 \times 9 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 0.9 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，1 球的质量与速度的乘积的减小量为 $0.3 \times (8-5) \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 0.9 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 。

可见，在这次碰撞中 2 球增加的质量与速度的乘积与 1 球所减小的质量与速度的乘积相等。

2. 从打点计时器打出的纸带可以看出，A 车在碰撞前是做匀速直线运动，其速度大小为

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{3T} = \frac{5.55 \times 10^{-2}}{3 \times 0.02} \text{ m/s} = 0.925 \text{ m/s}$$

A车和B车碰后连在一起做匀速直线运动的速度为

$$v' = \frac{\Delta x'}{\Delta t} = \frac{\Delta x'}{5T} = \frac{4.50 \times 10^{-2}}{5 \times 0.02} \text{ m/s} = 0.450 \text{ m/s}$$

碰撞前两辆小车各自的质量与其速度的乘积之和为

$$m_A v = 0.6 \times 0.925 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 0.555 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

碰撞后两辆小车各自的质量与其速度的乘积之和为

$$(m_A + m_B) v' = (0.6 + 0.6) \times 0.450 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 0.540 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

从实验数据可以看出,在实验误差范围内碰撞前后两辆小车各自的质量与其速度的乘积之和是相等的。

第2节 动量和动量定理

1. 教学目标

- (1) 了解物理学中动量概念的建立过程。
- (2) 理解动量和动量的变化及其矢量性,会正确计算做一维运动的物体的动量变化。
- (3) 理解冲量概念,理解动量定理及其表达式。
- (4) 能够利用动量定理解释有关现象和解决实际问题。
- (5) 理解动量与动能、动量定理与动能定理的区别。

2. 教材分析与教学建议

本节在“探究碰撞中的不变量”的基础上提出了动量的概念,并从物理学史的角度来加以认识。进一步通过例题提出动量的变化,加深对动量是矢量的认识。并在计算动量的变化时注意它的矢量性。动量定理是一个重要的规律,它表示力在一段时间内连续作用的积累效果与物体动量变化之间的关系。教科书虽然是在恒力作用的情况下由牛顿第二定律推导出动量定理的,但是,动量定理不仅适用于恒力情形,也适用于变力情形。正因为如此,动量定理在实际中有广泛的应用。尤其是在解决作用时间短、作用力大而且随时间变化的打击、碰撞等问题时,动量定理要比牛顿运动定律方便得多。

(1) 动量

首先要明确教材是在前面科学探究的基础上提出了动量的概念,相当于回答了物理学中为什么要引入动量这一概念,同时从科学史的角度,展示几代科学家在追寻“不变量”的努力中,逐渐形成“动量”概念的历史过程。

其次,在理解动量时,一定要明确 $p = mv$ 中的 v 是指物体的瞬时速度,从而说明动量是状态量(与时刻或位置对应),而且是矢量,其方向与速度的方向一致。还应明确其单位为 $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ 。

第三要明确动量变化的意义,即动量的变化等于相互作用后的动量减去相互作用前的动量,是两个矢量的差。

最后在对例题的分析讲解中,应明确钢球与障碍物的碰撞虽然时间很短,但仍然是一个物理过程,动量的变化是这一极短过程的末动量与初动量的矢量之差,动量的变化也是矢量。在

处理一维问题时,动量的变化可以用两种方法得到。一是选取正方向,用正、负号表示动量和动量的变化的方向;二是用作图法求解,应注意初、末动量要画在同一起点上,从初动量的箭头指向末动量的箭头的有向线段就是动量的变化。教科书图 16.2-1 的右图用了三种颜色的有向线段来表示初、末动量和动量的变化,如果对此理解有困难,可以从矢量的加法的作图法过渡到矢量的减法的作图法。

动量的矢量性运算的训练,可以为动量守恒定律中碰撞前后动量的矢量和运算打好基础。在教学过程中,可以让学生回忆速度的变化量。另外要引导学生注意动量与动能的区别。

(2) 动量定理

在讲解动量定理之前,建议做好演示实验来引入课题。

教学片段 1

与动量定理有关的实验

在日常生活中,有不少这样的事例:跳远时要跳在沙坑里;跳高时在下落处要放海绵垫子;从高处往下跳,落地后双腿往往要弯曲;轮船边缘及轮渡的码头上都装有橡皮轮胎等,所有这些措施(或行为)的共性在哪里?在于延长相互打击、碰撞的过程,为什么要这样做呢?而在某些情况下,我们又不希望这样,比如要用铁锤钉钉子,不能用木锤钉钉子,这又是为什么呢?通过我们今天的学习来探究其中的奥秘。为了解释这类现象,我们先来观察两个实验。

实验一:

用线在鸡蛋上绕一圈,并用胶带把线贴牢,打一死结。将线的另一端穿过铁支架上端的挂钩,缓缓地把鸡蛋提升到顶端,在鸡蛋下方的台面上事先放置好泡沫塑料垫,将手拉线的一端释放。可以看到鸡蛋下落后弹起,但却并未损坏。

实验二:

用一条细线悬挂着一个重物,把重物拿到悬挂点附近,然后释放,重物可以把细线拉断。如果在细线上端拴一段橡皮筋,再把重物拿到悬挂点附近释放,细线就不会被拉断了(图 16-3)。想想这是什么道理?



图 16-3

根据同样的道理起重机的吊钩上都装有缓冲弹簧。

通过实验激发起学生的兴趣之后,让学生逐步建立起冲量的概念。

要注意对力的冲量这个概念的理解,加强对动量定理矢量性的理解。动量是矢量,它的方向就是速度的方向,冲量也是矢量,但它的方向不能笼统地说是力的方向。只有在作用时间内,力的方向不变时,冲量的方向才是力的方向。因为一般情况下,冲量矢量是在作用时间内,力矢量对这段时间的积分,而不是简单的力和力的作用时间的乘积。如果在作用时间内,力的方向不断变化,冲量的方向可能跟任何时刻力的方向都不相同。

注意动量定理中的冲量是指合力的冲量， F 是指合力。要认识到动量定理和牛顿第二定律的实质是相同的，但二者也有一些区别。动量定理反映了合力在时间上的积累效果——改变物体的动量，牛顿第二定律反映了合力的瞬时作用效果——使物体产生加速度。

教科书中给出的动量定理的表达式是矢量式。在处理一维问题时，需选定一个正方向，以简化成代数运算。在教科书的例题中，以初速度的方向为正方向，平均作用力 F 的方向和末动量的方向都以初速度的方向为标准。在分析例题时要明确研究对象（垒球）和研究的物理过程中的初、末状态，加深对动量定理矢量性的理解。

动量定理在工农业生产和日常生活中有广泛应用。用动量定理来解释生产、生活中的现象，应紧扣在某一物理过程中物体动量的变化、作用时间以及作用力，可以做一些演示实验来加深理解。还可以对汽车安全带、安全气囊和交通规则进行介绍，加强学生的安全意识，提高他们的科学素质。这也很好地体现了理论与实际相结合，从物理走向社会的理念。还可以列举分析一些应用实例，开阔学生眼界，活跃思维，培养他们运用所学知识来分析和解决实际问题的能力。



教学片段2

用动量定理解释物理现象

引导学生讨论：在动量的变化 Δp 一定的情况下， F 和 t 之间有什么关系？

用动量定理解释现象可分为下列三种情况：

- ① Δp 一定， t 短则 F 大， t 长则 F 小；
- ② F 一定， t 短则 Δp 小， t 长则 Δp 大；
- ③ t 一定， F 大则 Δp 大， F 小则 Δp 小。

引导学生解释新课引入中的实验现象。实验一中鸡蛋下落在泡沫塑料垫后弹起，并未损坏。鸡蛋碰撞的过程 Δp 一定，由于使用泡沫塑料垫后，作用时间 t 较长，则泡沫塑料垫对鸡蛋的作用力 F 较小。实验二中改在细线上端拴一段橡皮筋，再从同样的高度释放重物，细线就不会被拉断了。小球碰撞的过程 Δp 一定，由于使用橡皮筋后，作用时间 t 较长，则细线对小球的作用力 F 较小，同样的道理起重机的吊钩上都装有缓冲弹簧。

引导学生解释生产、生活以及体育运动中与动量定理有关的物理现象，例如，运送易碎物品时要用柔软材料包装，汽车装有安全气囊，装修地板砖的工人用的榔头是用木头做的，足球运动员使飞来的足球停下时，脚要顺着足球运动的方向摆一下再去停球等。

最后引导学生总结：在碰撞的生活实例中，我们要得到很大的作用力，就要缩短力的作用时间，而有时需要延长力的作用时间来减小力的作用。

在“科学漫步”栏目中介绍汽车碰撞实验，一方面加深对动量定理的理解，另一方面对学生进行产品质量与安全的教育。最后问题的答案应该是：轿车前面的发动机舱并不是越坚固越好，原因是轿车前面的发动机舱越坚固，发生碰撞时作用时间将会越短，导致碰撞时的相互作用力很大，造成轿车严重损坏。

通过“科学足迹”栏目，理解动量和动能、动量定理和动能定理的区别。动量定理反映了作用在物体上的合力在时间上的积累效果——改变物体的动量，动能定理反映了作用在物体上的合力在空间上的积累效果——改变物体的动能。在学生做过一定数量练习后，引导学生将所

学知识加以整理、比较。在学完动量守恒定律的应用以后,可引导学生将所学的牛顿运动定律、动量定理、动量守恒定律和动能定理加以比较,教师可启发学生从定律或定理的内容、研究对象、适用条件、分析问题的基本步骤和方法等方面去讨论。

通过“做一做”,让学生明确某一物体在同一状态下,其动量大小与动能的关系,即:

$$p = \sqrt{2mE_k} \text{ 和 } E_k = \frac{p^2}{2m}, \text{ 加深学生对动量、动能的理解。}$$

3. 问题与练习

内容分析

第1题是加深学生对概念的理解,区别动量和动能这两个概念。(1)(2)小问通过两种情形来理解动量、动量的变化、动能和动能的变化这四个基本概念,(3)小问侧重计算系统的总动量和总动能。目的是让学生明确动量是矢量,动能是标量,矢量的加、减法遵循平行四边形法则。

第2题是为了理解动量定理和动能定理的区别。

第3题既可以运用牛顿运动定律来求解,又可以运用动量定理来求解。

第4题是动量定理的简单应用。审题时要明确撞击后铁锤的速度为0。另外,还可以把题目改成铁锤以4 m/s的速度反向弹回,这样可以使学生更好地理解什么是动量的变化。

第5题是用动量定理来解释生活中的现象。应紧扣体操运动员在着地的物理过程中其动量的变化量不变,由于屈腿,延长了作用时间,从而减小了地面对体操运动员的作用力。

第6题是为了理解动量守恒定律中的“总动量”就是系统内各个物体动量的矢量和,为学习下一节的动量守恒定律打下伏笔。

解答与说明

1. (1) 初动量为 $p_0 = mv_0 = 2 \times 3 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 6 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$;

末动量为 $p = mv = 2 \times 6 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 12 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 。

因此,动量增大为原来的2倍。

初动能为 $E_{k0} = \frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2} \times 2 \times 3^2 \text{ J} = 9 \text{ J}$;

末动能为 $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 2 \times 6^2 \text{ J} = 36 \text{ J}$ 。

因此,动能增大为原来的4倍。

(2) 动量变化了,动能没有变化。

取向东为正方向,则物体的末速度为 $v' = -3 \text{ m/s}$, 动量变化量为

$$\Delta p = mv' - mv = [2 \times (-3) - 2 \times 3] \text{ kg} \cdot \text{m/s} = -12 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

负号表示动量改变量的方向与正方向相反,即向西。

(3) 取向东为正方向,则B物体的速度为 $v_B = -4 \text{ m/s}$, 两物体动量之和为

$$p = m_A v_A + m_B v_B = [2 \times 3 + 3 \times (-4)] \text{ kg} \cdot \text{m/s} = -6 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

动能之和为

$$E_k = \frac{1}{2}m_A v_A^2 + \frac{1}{2}m_B v_B^2 = \left(\frac{1}{2} \times 2 \times 3^2 + \frac{1}{2} \times 3 \times 4^2 \right) \text{ J} = 33 \text{ J}$$

说明:动量是矢量,单位是千克米每秒;动能是标量,单位是焦耳。运算法则不同,动量遵循矢量的平行四边形定则,动能遵循代数加减法则。

2. B、D 选项正确。

因为根据题意，由动量定理、动能定理和题意可知

$$Ft = p$$

$$Fl = E_k$$

解得

$$p = \sqrt{2mE_k} = \sqrt{2mFl}$$

$$E_k = \frac{p^2}{2m} = \frac{F^2 l^2}{2m}$$

由前两式可以判断 B、D 选项正确。

由第三式可判断 A 选项错误，由第四式可判断 C 选项错误。

3. 取初速度方向为正方向，根据动量定理，有

$$F(t' - t) = mv' - mv$$

$$F = \frac{mv' - mv}{t' - t} = \frac{10 \times (-2) - 10 \times 10}{4} \text{ N} = -30 \text{ N}$$

该力大小为 30 N，方向与初速度的方向相反。

4. 撞击前，铁锤只受重力作用，机械能守恒，因此

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$$

可以求出打击前铁锤的速度 v 为

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 10 \times 5} \text{ m/s} = 10 \text{ m/s}$$

撞击时，铁锤受到重力和桩对铁锤竖直向上的冲击力，撞击后铁锤的速度为 0。设桩对铁锤的冲击力大小为 F ，取竖直向下为正方向，根据动量定理，有

$$(-F + mg)\Delta t = 0 - mv$$

解出
$$F = mg + \frac{mv}{\Delta t} = \left(40 \times 10 + \frac{40 \times 10}{0.05} \right) \text{ N} = 8\,400 \text{ N}$$

根据牛顿第三定律，铁锤对桩的平均冲击力的大小也为 8 400 N，方向竖直向下。

5. 体操运动员在着地时，动量的改变量是一个定值，通过屈腿，可以增长作用时间，由动量定理可知，将会减小地面对运动员的作用力，从而使运动员避免受伤。

6. 因为在光滑冰面上的摩擦力可以忽略，因此可以认为甲、乙两人组成的系统所受外力的矢量和为 0，满足动量守恒定律的条件。所以，甲推乙后，他们的总动量仍为 0。甲、乙两人各自的动量大小相等、方向相反，矢量和为 0。

设甲、乙的速率分别为 $v_{\text{甲}}$ 和 $v_{\text{乙}}$ ，取甲的运动方向为正方向，根据动量守恒定律，有

$$0 = m_{\text{甲}}v_{\text{甲}} + m_{\text{乙}}(-v_{\text{乙}})$$

由此解出

$$\frac{v_{\text{甲}}}{v_{\text{乙}}} = \frac{m_{\text{乙}}}{m_{\text{甲}}} = \frac{50}{45} = 1.1$$

第 3 节 动量守恒定律

1. 教学目标

(1) 在了解系统、内力和外力的基础上，认识和理解动量守恒定律。

- (2) 能运用牛顿第二定律和牛顿第三定律分析碰撞现象, 导出动量守恒的表达式。
- (3) 了解动量守恒定律的普遍适用性和牛顿运动定律适用范围的局限性。
- (4) 深刻理解动量守恒定律, 练习用动量守恒定律解决生产、生活中的问题。
- (5) 知道求初、末动量不在一条直线上的动量变化的方法。

2. 教材分析与教学建议

动量守恒定律成立的条件是一个系统不受外力或者系统所受外力的矢量和为 0, 考虑的是由多个物体组成的系统, 因此在应用时需注意区分内力和外力。本节在了解系统、内力和外力的基础上, 以一维情况下两个相互作用的小球为例, 根据牛顿第二定律和牛顿第三定律, 导出具体的动量守恒定律的表达式。这样的处理, 使学生对动量守恒定律的理解更深刻, 同时也使学生对知识间的联系有了更深入的理解。

运用动量守恒定律解决实际问题, 只考虑物体相互作用前后的动量, 不考虑相互作用过程中各个瞬间细节, 即使在牛顿定律适用范围内, 它也能解决许多由于相互作用力难以确定而不能直接应用牛顿定律解决的问题。这正是动量守恒定律的特点和优点, 同时又为我们解决力学问题提供了一种新的方法和思路。

动量守恒定律并不是由牛顿运动定律导出的, 而是一条独立的实验定律, 教科书第 1 节“实验: 探究碰撞中的不变量”的设计目的就在于突出这一点。它比牛顿运动定律适用范围广泛, 是自然界客观存在的基本规律之一。从物理学发展史看, 动量守恒的思想早于牛顿运动定律的发现。

(1) 动量守恒定律与牛顿运动定律

在根据牛顿第二定律和牛顿第三定律推导动量守恒定律时, 由于在引导学生分析推导的过程中, 运用的知识比较综合, 比较抽象, 这在一定程度上增加了教学的难度, 所以要注意情景的设置, 明确研究对象、物理过程和物理状态, 理解作用力和反作用力的大小、方向和作用时间的关系, 要进一步明确力、速度、速度的变化、加速度、动量的矢量性。

理解自然规律的统一与和谐。同时应向学生指明, 两球之间的作用力是一对相互作用的变力, 推导过程中的 F_1 、 F_2 是两球相互作用力的平均值, 便于学生理解推导过程。

(2) 动量守恒定律的普适性

为避免给学生造成动量守恒定律“是牛顿运动定律的导出结果”的错误认识, 强调动量守恒定律作为自然界普遍适用的实验定律的地位, 教材专门安排了一段讲述动量守恒定律的普遍适用性和牛顿运动定律适用范围的局限性的内容。

牛顿运动定律和动量守恒定律不是等价的, 动量守恒定律是一个独立的实验定律, 它适用于目前为止物理学研究的一切领域, 而牛顿运动定律只适用于宏观、低速的情形。应用动量守恒定律解决碰撞等问题时不涉及过程中的复杂受力情况, 更为方便。

本节的例题 2 进一步加深了对动量守恒定律的守恒条件和矢量性的理解。在分析例题 2 时, 首先要说明如果系统所受的外力的矢量和不为 0, 但在某一方向上不受外力或在该方向上所受外力的矢量和为 0, 则在该方向上的动量 (即总动量在该方向上的分量) 是守恒的, 这种某方向上的动量守恒应用很广泛。其次在审题时明确题目中的 v 、 v_1 、 v_2 均是指的速度矢量, 包含大小和方向。最后要明确教材上列出的动量守恒的方程本质上是矢量方程, 解出结果后才根据选择的正方向来讨论 v_2 的方向。



对例题2的拓展

例题2还可以变化为：一枚在空中飞行的火箭，质量为 m ，在某点的速度为 v ，方向水平。火箭在该点突然炸裂成两块，已知爆炸后与初速度的方向一致的那块弹片（质量为 $m-m_1$ ）的速度为 v_2 ，求另一块弹片（质量为 m_1 ）的速度 v_1 。

分析与解：火箭爆炸过程内力远远大于导弹的重力，系统的动量守恒，选速度 v 的方向为正方向，有

$$mv = m_1 v_1 + (m - m_1) v_2$$

$$\text{解得：} v_1 = \frac{mv - (m - m_1) v_2}{m_1}$$

讨论：当 $mv > (m - m_1) v_2$ ， $v_1 > 0$ ；当 $mv = (m - m_1) v_2$ ， $v_1 = 0$ ；当 $mv < (m - m_1) v_2$ ， $v_1 < 0$ 。

可见，弹片 m_1 的速度有三种可能性：其方向仍然向前、反方向或速度为0。还可以用矢量图来反应这三种情况（图16-4）。

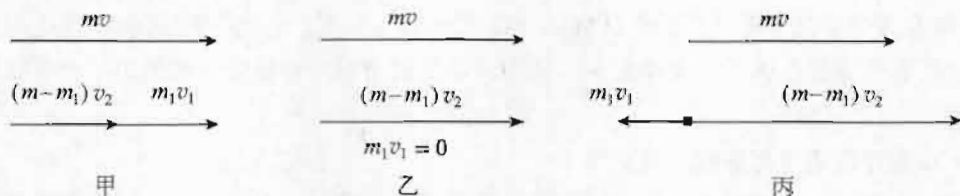


图 16-4

提出新的问题：火箭在炸裂前后，系统的机械能守恒吗？如果机械能不守恒，机械能是怎样变化的？

这类问题很典型，人从运动着的滑板车上向前跳出，就属于这类问题。

“思考与讨论”栏目中提出的问题，重在加深理解动量变化是末动量与初动量的矢量之差，也是矢量。其结果如图16-5所示。

思考一下这个问题，会帮助学生加深对动量的矢量性的认识，加深对矢量运算的作图法的理解，也为下一节的非对心碰撞中动量守恒中的“总动量”的理解埋下伏笔。

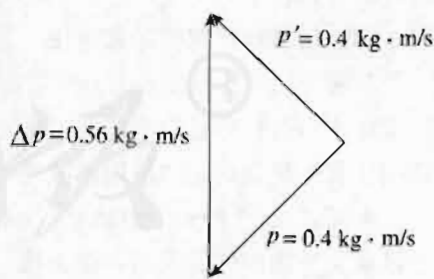


图 16-5

3. 问题与练习

内容分析

第1题是一个内力不改变系统的总动量的问题。

第2、3题则是运用动量守恒定律来解决简单问题。通过练习，理解动量守恒定律的守恒条件和矢量性。

第4题涉及库仑力的相互作用和临界状态的判断。

第5题涉及多个作用过程,体现动量守恒定律在解决多过程问题中的优越性。同时说明动量守恒定律不只适用于两个物体间的相互作用,也适用于更多个物体间的相互作用,以活跃学生思维,加深他们对这条定律的理解。

第6题实际上是提出了一种测量物体质量的方法。

第7题涉及两个物理过程,要运用动量守恒定律和机械能守恒定律来解决,也为下一节的学习埋下伏笔,同时也介绍了一种测量弹丸速度的实验方法。在条件允许的情况下,建议做一个“冲击摆测弹丸的速度”的演示实验,如图16-6所示。

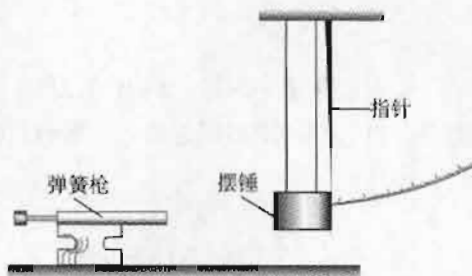


图 16-6

解答与说明

1. 研究对象是人(包括锤)和平板车组成的系统。用锤打车,是人、车系统的内力作用。在光滑水平面上,系统所受外力的矢量和为0,所以系统的总动量守恒。人和车的初动量为0。如果在锤的连续敲击下,平板车能持续向右行驶,则系统的总动量将不为0,这违反了动量守恒定律,因此是不可能的。根据动量守恒定律,举起锤头的过程,锤头向左运动,车就向右运动;把锤头打下去的过程,锤头向右运动,车就向左运动;用锤头连续敲击时,车只是左右运动,一旦锤头不动,车就停下来。

建议做一个演示实验来加深理解。

2. 由于在A、B的运动过程中,除了两者之间的相互作用力,其他的力可以忽略,即A、B组成的系统所受外力的矢量和为0,满足动量守恒定律的条件。取初速度方向为正方向,根据动量守恒定律,有

$$\begin{aligned} m_A v_A + m_B v_B &= m_A v'_A + m_B v'_B \\ \text{由此解出} \quad v'_A &= \frac{m_A v_A + m_B v_B - m_B v'_B}{m_A} \\ &= \frac{5 \times 9 + 2 \times 6 - 2 \times 10}{5} \text{ m/s} \\ &= 7.4 \text{ m/s} \end{aligned}$$

A的速度大小为7.4 m/s,方向与初速度方向相同。

3. 因为木块在光滑水平桌面上,所受的摩擦力为0,且子弹与木块的相互作用属于系统的内力,因此整个系统所受外力的矢量和为0,满足动量守恒定律的条件。

取子弹的初速度方向为正方向。

若子弹留在木块中,已知子弹的质量 $m_1 = 1.0 \times 10^{-2} \text{ kg}$,初速度 $v_1 = 300 \text{ m/s}$,木块的质量 $m_2 = 2.4 \times 10^{-2} \text{ kg}$,初速度 $v_2 = 0$,根据动量守恒定律,有

$$\begin{aligned} m_1 v_1 &= (m_1 + m_2) v \\ \text{由此解出} \quad v &= \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2} \\ &= \frac{1.0 \times 10^{-2} \times 300}{1.0 \times 10^{-2} + 2.4 \times 10^{-2}} \text{ m/s} \\ &= 88.2 \text{ m/s} \end{aligned}$$

若子弹穿过木块后,末速度 $v'_1 = 100 \text{ m/s}$,根据动量守恒定律,有

$$m_1 v_1 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

由此解出

$$\begin{aligned} v_2' &= \frac{m_1 v_1 - m_1 v_1'}{m_2} \\ &= \frac{1.0 \times 10^{-2} \times (300 - 100)}{2.4 \times 10^{-2}} \text{ m/s} \\ &= 83.3 \text{ m/s} \end{aligned}$$

4. A 以速度 v 向静止的 B 飞去时, A 的速度会减小, B 的速度会增大, 二者之间的距离缩小。当它们的距离最近时, 二者速度相同, 设这个速度为 v' , 根据动量守恒定律, 有

$$\begin{aligned} m_A v + 0 &= (m_A + m_B) v' \\ m_A v &= (m_A + 4m_A) v' \\ v' &= 0.2v \end{aligned}$$

5. 取机车和 15 节车厢为系统, 所有的碰撞过程中系统的合外力为 0, 故动量守恒。根据动量守恒定律, 有

$$mv_0 = (m + 15m) v'$$

由此解出

$$v' = \frac{v_0}{16} = \frac{0.8}{16} \text{ m/s} = 0.05 \text{ m/s}$$

6. 取甲物体碰撞前的速度方向为正方向。碰撞前, $v_{\text{甲}} = 6 \text{ m/s}$, $v_{\text{乙}} = -2 \text{ m/s}$; 碰撞后, $v'_{\text{甲}} = -4 \text{ m/s}$, $v'_{\text{乙}} = 4 \text{ m/s}$ 。根据动量守恒定律, 有

$$m_{\text{甲}} v_{\text{甲}} + m_{\text{乙}} v_{\text{乙}} = m_{\text{甲}} v'_{\text{甲}} + m_{\text{乙}} v'_{\text{乙}}$$

由此解出

$$\frac{m_{\text{甲}}}{m_{\text{乙}}} = \frac{v'_{\text{乙}} - v_{\text{乙}}}{v_{\text{甲}} - v'_{\text{甲}}} = \frac{4 - (-2)}{6 - (-4)} = \frac{3}{5}$$

7. 设子弹射入沙袋前的速度为 v_0 , 射入后子弹和沙袋的共同速度为 v_1 , 在子弹打沙袋的过程中, 根据动量守恒定律, 有

$$mv_0 = (m_1 + m) v_1$$

子弹和沙袋沿圆弧向上摆至最高点的过程, 根据机械能守恒定律, 有

$$\frac{1}{2} (m + m_1) v_1^2 + 0 = (m + m_1) gl (1 - \cos \theta)$$

联立上面两式, 解得

$$v_0 = \frac{m + m_1}{m} \sqrt{2gl(1 - \cos \theta)}$$

第4节 碰撞

1. 教学目标

(1) 了解弹性碰撞、非弹性碰撞和完全非弹性碰撞。会应用动量、能量的观点综合分析、解决一维碰撞问题。

(2) 了解对心碰撞和非对心碰撞。

(3) 了解散射和中子的发现过程, 体会理论对实践的指导作用, 进一步了解动量守恒定律的普适性。

(4) 加深对动量守恒定律和机械能守恒定律的理解,能运用这两个定律解决一些简单的与生产、生活相关的实际问题。

2. 教材分析与教学建议

本节教科书内容的设计是从动量守恒定律应用的角度考虑的。碰撞问题是动量守恒定律、机械能守恒定律这些最基本内容的应用,研究碰撞问题可以在典型的、有意义的情境中复习这些基本内容。通过回顾第1节的演示实验,提出了弹性碰撞的概念,进而提出非弹性碰撞的概念。通过“思考与讨论”,进行理论推导,从而解释了第1节的演示实验。明确对心碰撞和非对心碰撞的概念,进一步介绍了微观粒子的碰撞现象——散射。最后介绍了中子的发现过程,让学生进一步了解动量守恒定律的应用。

(1) 弹性碰撞和非弹性碰撞

在第1节的演示实验的基础上,演示非弹性碰撞和完全非弹性碰撞,只要在两个钢球间粘上少量的橡皮泥或双面胶即可。



教学片段1

几个弹性碰撞和非弹性碰撞的有趣实验

如图16-7所示,实验装置是由两根平行木杆和5个完全相同的金属球组成的。金属球直径1~2 cm,由两根细线组成双线摆,将这样的5个摆球沿直线排列并彼此邻接组成摆组。做如下的演示实验,在做每个实验前让学生猜测实验现象,以引起学生对碰撞的兴趣。

实验1:把球1向左拉高释放,撞向其余静止的4个球。猜测一下,将会发生什么现象?将会看到只有球5向右升起,如图16-8所示。然后球5返回,向左去撞击球4,结果也只有球1向左升起,返回撞击球2,球5又升起,如此循环往复。

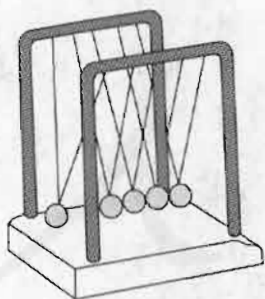


图 16-7

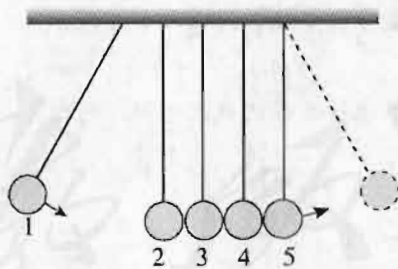


图 16-8

实验2:如果把球1和球2一起向左升起,同时释放,再猜测一下,将会发生什么现象?

实验3:将球1、2球向左、右升起相同高度,其余三个球拿开不用,同时释放,又将看到什么现象?

实验4:在1、2两个球间粘上少量的橡皮泥或双面胶,其余三个球拿开不用,将球1和球2同时向左、右升起相同高度,同时释放,又将看到什么现象?

引导学生分析碰撞现象，碰撞指的是物体间相互作用持续时间很短，而物体间相互作用力很大的现象。在这一现象中，一般满足内力远大于外力，故可以用动量守恒定律处理碰撞问题。之后可以向学生提出两个物体碰撞前后其能量是否守恒的问题。在处理碰撞问题过程中，学生往往关注的是动量及动量守恒定律的应用，而对系统的总机械能是否守恒的问题容易忽视。我们知道，碰撞系统机械能是不会增加的，只有在弹性碰撞的情况下，碰撞系统机械能守恒。

对于弹性碰撞和非弹性碰撞的教学，应该发挥学生的主观能动性，让他们根据教科书中的第一个“思考与讨论”，结合“教学片段”中演示的各种碰撞现象，先去大胆猜想碰撞过程中机械能是否守恒，然后自己分析，列出方程，解出结果后，再去验证猜想。同时可以提出新的问题：碰撞过程中能量守恒吗？系统减少的机械能转化成了什么形式的能量？

在此基础上，介绍弹性碰撞、非弹性碰撞和完全非弹性碰撞的概念。明确弹性碰撞过程机械能守恒，完全非弹性碰撞过程机械能损失最厉害，是非弹性碰撞的极端情况。

结合学校和学生的实际，对第二个“思考与讨论”可以先创设情景，引导学生根据动量守恒定律，列出一个方程，再引导学生根据机械能守恒定律，列出另一个方程，最后引导学生找到解上面的二元二次方程组的思路。解出结果后，再分三种情形进行讨论。并一定要与演示实验的现象结合起来。 $m_1 \gg m_2$ 、 $m_1 \ll m_2$ 的情形，可以用大小差不多的小钢球和乒乓球来演示。



教学片段2

第二个“思考与讨论”的分析以及求解

引导学生创设情景，明确研究对象，明确已知量、未知量，分析两个小球碰撞前后的状态，并假设碰撞后物体 m_1 的速度 v_1' 的方向与 v_1 一致，如图 16-9 所示。

根据动量守恒定律，列出一个方程

$$m_1 v_1 + 0 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad (1)$$

根据弹性碰撞过程机械能守恒，列出另一个方程

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + 0 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \quad (2)$$

由(1)式，得

$$m_1 (v_1 - v_1') = m_2 v_2' \quad (3)$$

由(2)式，得

$$m_1 (v_1 - v_1') (v_1 + v_1') = m_2 v_2'^2 \quad (4)$$

由(3)和(4)式，得

$$(v_1 + v_1') = v_2' \quad (5)$$

由(1)和(5)式，解得

$$v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1$$

$$v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1$$

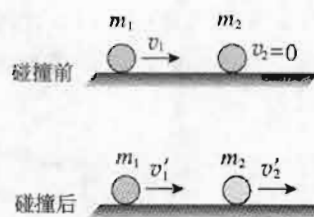


图 16-9

讨论： v_1 、 v_1' 、 v_2' 均是矢量，从上面的结果可以看出， v_2' 始终与 v_1 的方向一致。以 v_1 的方向为正方向， $m_1 > m_2$ 时， $v_1' > 0$ ，说明 v_1' 与 v_1 的方向一致， $m_1 = m_2$ 时， $v_1' = 0$ ， $m_1 < m_2$ 时， $v_1' < 0$ ，说明 v_1' 与 v_1 的方向相反。

(2) 对心碰撞和非对心碰撞

从对心碰撞到非对心碰撞，从一维动量守恒变为平面内的二维动量守恒，问题更复杂，也更普遍了。在解释台球相碰问题的同时，也加深了学生的思维活动，同时也为介绍微观粒子的散射现象打下了基础。

关于第三个“思考与讨论”，通过作图法加深对动量守恒定律的理解，加深对矢量的运算法则——平行四边形定则的理解。由于碰撞过程系统动量守恒，碰撞后A、B小球的动量的矢量和与碰撞前A小球的动量相同。而A、B小球的动量与A、B小球的动量的矢量和应该满足平行四边形定则，如图16-10所示；由于A、B小球的质量相同，因此，碰撞后A、B小球的速度矢量和与碰撞前A小球的速度相同，也应该满足平行四边形定则，可见 v_1' 、 v_2' 必然在 v_1 的两侧，就可以大致画出碰撞后A球的速度 v_1' ，如图16-11所示。这个“思考与讨论”也在一定程度上为下一章第一节的“康普顿效应”的教学埋下伏笔。

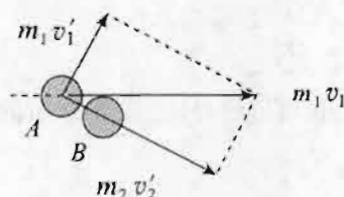


图 16-10

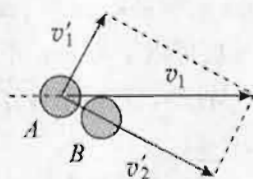


图 16-11

教学中还可以向学生介绍：进一步的理论分析可以证明，一个运动着的球与另一个质量相同的球发生非对心碰撞，最后二者的速度方向是互相垂直的，这种情形在台球运动中会经常遇到。

(3) 散射

教材强调了物理学中研究的碰撞不仅包括宏观物体间的相互作用，而且包括微观粒子间的相互作用，通过微观粒子发生散射的相互作用的例子，引导学生运用弹性碰撞和非对心碰撞的知识进行分析讨论，从而对卢瑟福的 α 粒子散射实验的理解更加深刻。

“科学足迹”中介绍了中子的发现过程，让学生进一步了解动量守恒定律的普适性，可以结合弹性正碰和“问题与练习”中的第5题来进一步说明。中子的发现过程体现了科学的猜想（卢瑟福预言中子的存在）和科学精神（合作与交流）的重要性。还应该让学生明白，认识和掌握了规律之后，能够对人类的认识活动和生产活动产生巨大的推动作用。

3. 问题与练习

内容分析

第1题是对动量守恒定律的简单运用。

第2题则是为了加深对弹性碰撞、非弹性碰撞和完全非弹性碰撞的理解。

第3、4题是对弹性碰撞的简单运用。

第5题通过定量计算来与“科学足迹”中介绍的中子的发现过程进行呼应。

第6题是对满足“内力远大于外力时系统动量也近似守恒”的应用。

解答与说明

1. 以质量为 600 g 的滑块的初速度 v_1 的速度方向为正方向, 根据动量守恒定律,

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v'$$

$$v' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} = \frac{600 \times 15 + 400 \times (-10)}{600 + 400} \text{ cm/s} = 5 \text{ cm/s}$$

碰后滑块的速度大小为 5 cm/s, 方向与质量为 600 g 的滑块的初速度的方向相同。

2. 若 A 和 B 的碰撞是弹性碰撞, 则根据动量守恒和机械能守恒可以解得 B 获得的最大速度为

$$v_{\max} = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v = \frac{2m}{m + 3m} v = 0.5v$$

若 A 和 B 的碰撞是完全非弹性碰撞, 则碰撞之后二者连在一起运动, B 获得最小的速度, 根据动量守恒定律,

$$m_1 v = (m_1 + m_2) v_{\min}$$

$$v_{\min} = \frac{m v}{m + 3m} = 0.25v$$

B 获得的速度 v_B 应满足: $v_{\min} \leq v_B \leq v_{\max}$, 即 $0.25v \leq v_B \leq 0.5v$ 。

可见, B 球的速度可以是 $0.4v$, 不可能是 $0.2v$ 和 $0.6v$ 。

3. 由于碰撞是弹性的, 根据动量守恒和机械能守恒可以解得碰撞之后二者的速度分别为

$$\text{氦核: } v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v = \frac{4m - m}{4m + m} v = \frac{3}{5} \times 10^3 \text{ m/s} = 6 \times 10^2 \text{ m/s}$$

$$\text{质子: } v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v = \frac{2 \times 4m}{4m + m} v = \frac{8}{5} \times 10^3 \text{ m/s} = 1.6 \times 10^3 \text{ m/s}$$

4. 中子和原子核的碰撞可以看成是弹性碰撞, 设中子的质量为 m_1 , 碰撞前速度为 v , 方向为正方向, 原子核的质量为 m_2 , 碰撞前可以认为是静止的, 则碰撞后中子的速度为 $v' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v$ 。

由于中子的质量一般小于原子核的质量, 因此 $|v'| = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} v = \left(1 - \frac{2m_1}{m_1 + m_2}\right) v$ 。可见, m_2 越小, $|v'|$ 越小。故应选用质量较小的原子核来降低中子的速率。核电站常常用石墨(碳)作为中子减速剂。

5. 设未知粒子的质量为 m , 碰撞前其速度为 v , 它与氢和氮原子核的碰撞都是弹性的, 所以碰撞后氢原子核的速度为

$$v_H = \frac{2m}{m + m_H} v$$

氮原子核的速度为

$$v_N = \frac{2m}{m + m_N} v = \frac{2m}{m + 14m_H} v$$

两式联立, 解得未知粒子的质量为 $1.16m_H$ 。

6. 没有重大影响。因为内力远大于外力时系统动量仍然近似守恒。

第5节 反冲运动 火箭

1. 教学目标

- (1) 经历实验探究，认识反冲运动，能举出几个反冲运动的实例。
- (2) 结合动量守恒定律对反冲现象做出解释；进一步提高运用动量守恒定律分析和解决实际问题的能力。
- (3) 知道火箭的飞行原理和主要用途，了解我国的航空、航天事业的巨大成就，激发学生热爱祖国的情感。

2. 教材分析与教学建议

本节介绍了动量守恒定律在生产和科技方面的应用，通过生活、生产中的现象介绍反冲运动，通过演示实验加深对反冲运动的理解，最后介绍了火箭的飞行原理——反冲运动。这一节一方面体现了动量守恒定律的应用，另一方面也体现了从物理走向社会的新课程理念。

(1) 反冲

做好反冲实验是教学中的重要环节，可以演示一些反冲现象。还可以让学生根据生活经验或视频资料举出其他的反冲运动的例子。

在做好实验的基础上，让学生理解反冲运动遵循的规律：反冲运动是系统内力作用的结果，虽然有时系统所受外力的矢量和不为0，但由于系统内力远远大于外力，所以系统的总动量可视为守恒的，可以用动量守恒定律来求解。解决这类问题时，还应说明所涉及的动量是相对于同一个惯性参考系成立的。

下面几个关于反冲运动的实验，供老师们选用。

①用水火箭演示

水火箭用空可乐瓶制作，用一段吸管和透明胶带在瓶上固定一个导向管，瓶口塞一个橡皮塞，在橡皮塞上钻一孔，在塞上固定一只自行车车胎上的进气阀门，并在气门芯上装上小橡皮管。

在实验时，瓶中先注入约 $\frac{1}{3}$ 体积的水，用橡皮塞把瓶口塞严。将固定在底座上的竖直向上的铁丝穿过可乐瓶上的导向管。将瓶的进气阀与打气筒相接，向筒内打气到一定程度时，瓶塞脱开，水从瓶口向下喷出，瓶竖直向上飞出。

②反冲船

取一只药瓶或一个一端有孔的蛋壳，在其盖上钻一小孔（瓶盖与瓶子需密封），再取一块厚泡沫塑料，参照图16-12做成船的样子，并在船上挖一凹坑，以容纳盛酒精的容器（可用金属瓶盖）。用两段铁丝，弯成环状以套住瓶的两端，并将铁丝的端头分别插入船中。

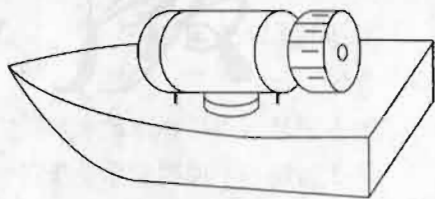


图16-12

将一棉球放入容器中，并倒入少量酒精，在瓶中装入半瓶开水。将船放入水中，点燃酒精棉球后一会儿产生水蒸气，当水蒸气从药瓶盖的孔中喷出时，小船便能勇往直前了。如果发现船一直在打转，说明船的对称性不好。（加热的酒精灯也可以用蜡烛代替）

③观察从旋转的盒中喷出的水流和纸盒的旋转。

如图 16-13 所示, 在一个空牛奶纸盒的每一侧面的右下角打一个小洞, 一共打四个小洞。通过纸盒顶部的一个小孔, 系一根细绳, 把它吊起来或者用手提起来。往纸盒里装满水, 观察水从洞中流出的情况。然后将悬线扭转绞合。松手后, 注意观察纸盒的旋转方向和从洞中喷出的水流方向。

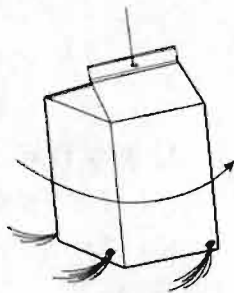


图 16-13

(2) 火箭

让学生认识到火箭是反冲运动的重要应用, 它是靠喷出气流的反冲作用而获得巨大速度的。火箭向前飞行所能达到的最大速度, 也就是燃料烧尽时火箭获得的最终速度。它跟什么因素有关呢?

“思考与讨论”栏目的内容就为回答这一问题奠定了基础。引导学生明确人和他抛出的小物体是一个系统, 以飞船为参照系, 抛出过程系统动量守恒。以速度 u 的方向为正方向, 小物体的动量改变量是 Δmu , 人的动量改变量是 $-\Delta mu$, 人的速度改变量是 $-\frac{\Delta mu}{m}$ 。

引导学生根据动量守恒定律, 完成书上的推导。理论上的计算表明, 火箭获得的最终速度主要取决于两个条件, 一个是喷气速度, 一个是质量比, 即火箭起飞时的质量与燃料烧尽时的质量之比。喷气速度越大, 质量比越大, 火箭的最终速度也越大 (忽略重力的影响)。

可以举例说明分级火箭有利于提高火箭的最终速度。假设有两枚火箭, 一枚是单级火箭, 一枚是两级火箭。第一枚火箭的发射重量是 2 t, 其中装有 1.5 t 的推进剂, 则其质量比是 4。第二枚火箭由各重 1 t 的两级火箭组成。它们分别装有 0.75 t 的推进剂。表面看来后者的总重与推进剂的重量都与前者相同, 但效果显著不同。由于在使用时, 第一级火箭推进剂燃烧完以后可以把它整个抛弃, 剩下第二级火箭单独前进, 所以它的最后质量只有 0.250 t, 因此它的质量比是 8, 比第一枚火箭提高了 1 倍。可见, 分级火箭有利于提高火箭的最终速度。不过, 级数太多, 每级之间的连接和分离机构部分也要相应增多, 这也会影响火箭的整体强度, 并带来一些复杂的技术问题。现代火箭往往用两级或三级来发射运载人造地球卫星, 用四级火箭来发射飞向星际空间的宇宙飞船, 宇宙飞船本身成为末级火箭。

在介绍了火箭的原理、结构之后, 可以介绍一下我国在航空、航天事业中的进步, 介绍一下“神舟”系列飞船以及我国的登月计划, 激发学生的学习热情。

3. 问题与练习

内容分析

第 1 题是运用反冲运动来解决实际问题。

第 2 题是为了说明应用动量守恒定律时, 各物体的速度必须是相对同一惯性系的速度。一般以地球为参考系。

第 3 题涉及多个物体组成的系统和多个作用过程, 体现动量守恒定律在解决这类问题中的优越性。同时说明应用动量守恒定律时, 各物体的速度必须是相对同一惯性系的速度。

解答与说明

1. 喷气后, 宇航员做匀速直线运动的速度为

$$v_1 = \frac{\Delta x}{t} = \frac{45}{10 \times 60} \text{ m/s} = 0.075 \text{ m/s}$$

设喷气前总质量为 m_1 ，喷气过程喷出的气体质量为 m_2 ，取喷气后宇航员的速度方向为正方向，由动量守恒定律，列方程

$$0 = (m_1 - m_2)v_1 + m_2v_2$$

解得
$$m_2 = \frac{v_1}{v_1 - v_2} m_1 = \frac{0.075 \times 100}{0.075 - (-50)} \text{ kg} = 0.15 \text{ kg}$$

2. 设飞机的质量为 m_1 ，喷出的气体质量为 m 。取飞机喷气前速度 v_0 的方向为正方向，喷出的气体的速度为 v_1 ， v_1 的方向与 v_0 相同，但 $v_0 > v_1$ ，由动量守恒定律，列方程

$$(m_1 + m)v_0 = mv_1 + m_1v_2$$

解得
$$v_2 = v_0 + \frac{m(v_0 - v_1)}{m_1}$$

由于 $v_0 > 0$ ， $v_1 > 0$ ，且 $v_0 > v_1$ ，故有 $v_2 > v_0$ ，因此飞机的速度还会增加。

3. 设皮划艇、枪（含子弹）及人整个系统的质量为 m ，每发子弹的质量为 m_0 ，子弹射出运动的方向为正方向，子弹相对步枪的速度大小为 u 。

(1) 设第 1 次射击后艇的速度大小为 v_1 ，由动量守恒定律有

$$0 = (m - m_0)v_1 + m_0(v_1 - u)$$

$$v_1 = \frac{m_0 u}{m}$$

设第 2 次射击后艇的速度大小为 v_2 ，由动量守恒定律有

$$(m - m_0)v_1 = (m - 2m_0)v_2 + m_0(v_2 - u)$$

$$v_2 - v_1 = \frac{m_0 u}{m - m_0}$$

设第 3 次射击后艇的速度大小为 v_3 ，由动量守恒定律有

$$(m - 2m_0)v_2 = (m - 3m_0)v_3 + m_0(v_3 - u)$$

$$v_3 - v_2 = \frac{m_0 u}{m - 2m_0}$$

同理，第 10 次射击后艇的速度大小为 v_{10} ，由动量守恒定律有

$$(m - 9m_0)v_9 = (m - 10m_0)v_{10} + m_0(v_{10} - u)$$

$$v_{10} - v_9 = \frac{m_0 u}{m - 9m_0}$$

所以，设射出子弹 n 发，则每次射击后皮划艇速度的改变量为

$$\Delta v = \frac{m_0 u}{m - (n-1)m_0} = \frac{8}{120.01 - 0.01n} \text{ m/s}$$

(2) 连续射击 10 次后，可得

$$\begin{aligned} v_{10} &= \frac{m_0 u}{m} + \frac{m_0 u}{m - m_0} + \cdots + \frac{m_0 u}{m - 9m_0} \\ &= \left(\frac{0.01 \times 800}{120} + \frac{0.01 \times 800}{120 - 0.01} + \cdots + \frac{0.01 \times 800}{120 - 9 \times 0.01} \right) \text{ m/s} \\ &= 8 \times \left(\frac{1}{120} + \frac{1}{120 - 0.01} + \cdots + \frac{1}{120 - 9 \times 0.01} \right) \text{ m/s} \\ &\approx 8 \times \frac{10}{120} \text{ m/s} \approx 0.67 \text{ m/s} \end{aligned}$$

(3) 对整个过程应用动量定理，得

$$Ft = (m - 10m_0)v_{10} - 0$$

$$F = \frac{(m - 10m_0)v_{10}}{t} = \frac{(120 - 10 \times 0.01) \times \frac{2}{3}}{2} \text{ N} \approx 40 \text{ N}$$

三、教学设计案例

反冲运动 火箭

1. 教学目标

(1) 知道什么是反冲运动，结合生产、生活中的实际例子，理解什么是反冲运动；体会物理就在身边。

(2) 经历实验探究，认识反冲运动，能结合动量守恒定律解释反冲现象。进一步提高运用动量守恒定律分析和解决实际问题的能力。

(3) 知道火箭的飞行原理和主要用途。了解我国的航空、航天事业的巨大成就和当前的航空、航天计划，激发学生热爱祖国的情感。

重点

(1) 知道什么是反冲。

(2) 应用动量守恒定律正确处理喷气式飞机、火箭一类问题。

难点

如何应用动量守恒定律分析、解决反冲运动。

2. 教具

气球、遥控小车、几根玻璃管、玻璃板、铝箔、火柴等，图片、多媒体课件等。

3. 教学过程

主要教学过程		学生活动
引入新课	投影神舟五号飞船发射时的照片，提出问题：神舟五号飞船和火箭为什么能离开地球，升上天空，实现我国的飞天梦？	创设情景 观察与思考
	大胆说出自己的想法！	
	演示：拿一个气球，给它充足气，然后松手，观察现象。	
	学生描述现象：释放气球后，气球内的气体喷出，气球向相反的方向飞出。	积极发言
	教师：在日常生活中，类似于气球这样的运动很多，本节课我们就来研究这种运动。	提出看法 积极思考

续表

	主要教学过程	学生活动
教 学 过 程 设 计	(一) 反冲 1. 教师分析气球所做的运动 给气球内吹足气, 捏紧出气孔, 此时气球和其中的气体作为一个整体处于静止状态。松开出气孔时, 气球中的气体喷出, 气体具有动量, 此时气体和气球之间产生相互作用, 气球就向与喷气方向相反的方向冲出。 2. 学生举例 你能举出哪些物体的运动类似于气球所做的运动? 学生: 节日燃放的礼花, 喷气式飞机, 反击式水轮机, 乌贼、章鱼游泳, 火箭等所做的运动。 演示: 在玻璃管上平放玻璃板, 在玻璃板上放一辆遥控小车。用遥控器启动小车, 同时看到玻璃板沿相反方向运动。 3. 学生概括上述运动的特点, 教师结合学生的叙述总结得到: 某个物体向某一方向高速喷射出大量的液体、气体或弹射出一个小物体, 从而使物体本身获得一个反向速度的现象, 叫反冲运动。在反冲现象中, 系统所受的合外力一般不为 0; 但是反冲运动中如果属于内力远大于外力的情况, 可以认为反冲运动中系统动量守恒。 同学们通过实验了解了什么是反冲运动, 那么反冲运动在实际生活中有什么应用呢? 下边我们来探讨这个问题。	亲自感受、观察、思考 举例 观察实验现象并思考 教师和学生一起分析、归纳
	(二) 反冲运动的应用和防止 1. 学生阅读课文有关内容 2. 学生回答反冲运动应用和防止的实例 反冲有广泛的应用: 灌溉喷水器、反击式水轮机、喷气式飞机、火箭等都是反冲的重要应用。 用枪射击时, 要用肩部抵住枪身, 这是防止或减少反冲影响的实例。 3. 引导要求学生解释说明几个物理过程中反冲的应用和防止。 对于灌溉喷水器, 当水从弯管的喷嘴喷出时, 弯管因反冲而旋转。 对于反击式水轮机: 当水从转轮的叶片中流出时, 转轴由于反冲而旋转带动发电机发电。对于喷气式飞机和火箭, 它们靠尾部喷出气流的反冲作用而获得很大的速度。	回答引起现象的原因, 亲自体验并思考 列举例子并思考
	对于反冲式水轮机: 当水从转轮的叶片中流出时, 转轴由于反冲而旋转带动发电机发电。对于喷气式飞机和火箭, 它们靠尾部喷出气流的反冲作用而获得很大的速度。 用枪射击时, 子弹向前飞去, 枪身向后发生反冲, 枪身的反冲会影响射击的准确性, 所以用步枪时我们要把枪身抵在肩部, 以减少反冲的影响。 通过对几个实例的分析, 明确了反冲既有有利的一面, 同时也有不利的一面, 在看待事物时我们要学会用一分为二的观点。 反冲现象的一个重要应用是火箭, 下边我们就来认识火箭。	分析和应用
	(三) 火箭 1. 演示: 用薄铝箔卷成一个细管, 一端封闭, 另一端留一个很细的口, 内装由火柴刮下的药粉, 把细管放在支架上, 用火柴或其他办法给细管加热。 现象: 当管内的药粉点燃时, 生成的燃气从细口迅速喷出, 细管便向相反方向飞去。指出上述装置就是火箭的原理模型。 2. 多媒体演示古代火箭, 现代火箭的用途及多级火箭的工作过程, 同时学生边看边阅读课文。 3. 用实物投影仪出示阅读思考题: (1) 介绍我国古代的火箭是什么样的? (2) 现代的火箭与古代火箭有什么相同和不同之处?	观察实验现象, 描述并思考

续表

	主要教学过程	学生活动
教学过程设计	(3) 现代火箭主要用途是什么? (4) 现代火箭为什么要采用多级结构? 4. 引导学生解答上述问题 (1) 我国古代的火箭是这样的: 在箭上扎一个火药筒, 火药筒的前端是封闭的, 火药点燃后生成的燃气以很大速度从火药筒的尾部向下喷出, 火箭由于反冲而向上运动。 (2) 现代火箭与古代火箭原理相同, 都是利用反冲现象来工作的。但现代火箭较古代火箭结构复杂得多, 现代火箭主要由壳体和燃料两大部分组成, 壳体是圆筒形的, 前端是封闭的尖端, 后端有尾喷管, 燃料燃烧产生的高温高压燃气从尾喷管迅速喷出, 火箭就向与之相反的方向飞去。 (3) 现代火箭主要用来发射探测器、常规弹头或核弹头, 人造卫星或宇宙飞船, 即利用火箭作为运载工具。 (4) 在现代技术条件下, 一级火箭的最终速度还不到发射人造卫星所需要的速度, 发射卫星时要使用多级火箭。用 CAI 课件展示多级火箭的工作过程, 多级火箭由多个单级火箭组成, 发射时先点燃第一级火箭, 燃料用完以后, 空壳自动脱落, 然后下一级火箭开始工作。 那么火箭在燃料燃尽时所能获得的最终速度与什么有关系呢? 5. 引导学生分析教科书中的“思考与讨论”, 再出示下面的问题 火箭发射喷射出来的燃气的质量为 m_1, 燃料燃尽后火箭的质量为 m_2, 火箭燃气的喷射速度为 v_1, 燃料燃尽后火箭的飞行速度 v_2 为多大? 引导学生分析并解答。 解: 在火箭发射过程中, 由于内力远大于外力, 所以动量守恒。发射前的总动量为 0, 发射后的总动量为 $m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0$ 则 $v_2 = -\frac{m_1}{m_2} v_1$ 负号表示速度的方向。可见, 燃料燃尽时火箭获得的最终速度由喷气速度及质量比 $\frac{m_1}{m_2}$ 决定。 可见, 多级火箭能及时把空壳抛掉, 使火箭的总质量减少, 因而能够达到很高的速度, 可用来完成洲际导弹、人造卫星、宇宙飞船等的发射工作, 但火箭的级数不是越多越好, 级数越多, 构造越复杂, 工作的可靠性越差, 目前多级火箭一般都是三级火箭。	思考并回答 学以致用 及时巩固 培养分析、解决问题的能力
小结	1. 当物体的一部分以一定的速度离开物体时, 剩余部分将获得一个反向冲量而向相反方向运动, 这种向相反方向的运动, 通常叫做反冲运动。 2. 对于反冲运动, 所遵循的规律是动量守恒定律, 在具体的计算中必须严格按动量守恒定律的解题步骤来进行。 3. 反冲运动不仅存在于宏观低速物体间, 也存在于微观高速物体间。	学生回顾并体会过程和方法, 巩固知识和技能
思考与练习	水平方向射击的大炮, 炮身重 450 kg, 炮弹射击速度是 450 m/s, 射击后炮身后退的距离是 45 cm, 则大炮受到地面的平均阻力是多大?	学生思考并回答

4. 教学设计说明

学生在生活中对反冲现象有肤浅的认识,学生对火箭的结构、飞行原理和主要用途还了解不够。通过实验演示和多媒体展示,可以提高学生的兴趣,向学生提供大量直观的感性材料,从而比较容易突破难点。

教学过程中发挥学生的主动性,培养学生善于从实验中总结规律和对科学研究的兴趣,培养勇于探索、进行合作与交流的品质。

通过多媒体介绍我国成功地研制和发射长征系列火箭的事实,结合我国古代对于火箭的发明和我国的航空航天事业的巨大成就,培养爱国主义精神,增强民族自豪感。

四、教学资源库

(一) 概念、规律和背景资料

1. 关于动量定理中的平均力问题

当物体受变力 F 作用时,力的冲量 $\int_0^t F dt$ 可以用力对时间的平均值 $\bar{F}$ 与时间 t 的乘积来代替,即 $\int_0^t F dt = \bar{F}t$ 。由此式,可得出力对时间的平均值是

$$\bar{F} = \frac{\int_0^t F dt}{t}$$

力不仅可以对时间取平均值,还可以对位移取平均值。有时一个力在同一过程中这两种平均值的大小往往不相等。动量定理 $\bar{F}t = p' - p$ 中的 $\bar{F}$ 是力对时间的平均值,这一点在教学中一定要注意。

高考试卷中曾有这样一道物理题:劲度系数为 k 的弹簧被压缩 x ,把一个质量为 m 的物体放置在它的自由端,释放弹簧,把这个物体弹出去,这个物体在光滑平面上将以多大速度运动?

对这一问题,有的学生是这样解答的:物体在位移 x 内受弹力作用,其作用力的平均值 $\bar{F} = \frac{1}{2}kx$ 。物体在位移 x 内做简谐振动,经历的时间 $t = \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{m}{k}}$, $\Delta v = v$, 根据动量定理

$$\bar{F}t = m\Delta v$$

得

$$v = \frac{\pi}{4}\sqrt{\frac{k}{m}}x$$

这个结果是错误的,其原因是用错了力的平均值。 $\bar{F} = \frac{1}{2}kx$ 是弹力对位移的平均值。在应用动量定理时,应该使用力对时间的平均值。做简谐振动的物体所受的力在 $\frac{1}{4}$ 周期时间内的平均值应是

$$\bar{F} = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{4}} kx \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t dt}{T/4} = \frac{2}{\pi}kx$$



其中 $T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, $\bar{F}$ 是最大值的 $\frac{2}{\pi}$, 以这样的平均值代入动量定理公式中才可求得正确的结果。但上述对力的平均值的计算, 超出了中学程度。所以本题要用机械能守恒定律来解答, 由

$$\frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}mv^2$$

故物体的速度 $v = \sqrt{\frac{k}{m}}x$ 。

2. 在竖直方向上的打击问题中, 重力都可以忽略吗?

中学教学中有这样一道例题: 用铁锤打击道钉, 知道铁锤的质量、打击时的速度及打击作用的时间, 求铁锤在竖直方向上打击道钉时平均作用力。该题一开始就不计铁锤所受的重力, 只考虑铁锤受到道钉的作用力。结尾又把打击力和铁锤所受的重力相比较, 重力仅为打击力的 2%, 说明计算打击过程中的平均作用力时, 不考虑铁锤所受的重力是可以的。教学中, 不少学生产生误解, 认为这类问题, 物体所受的重力都可以忽略不计。

其实, 在这类问题中忽略重力是有条件的。根据动量定理 $\bar{F}t = p' - p$, 在竖直方向上的打击问题中, 物体的动量变化 $p' - p$ 是一有限量, 当相互作用的时间极短, 即 t 是无限小量时, $\bar{F}$ 将是很大的量, 这时, 物体所受的重力可忽略。另外, 如果物体的初动量很大, 例如铁锤下落的距离很大, 因而打击道钉前的速度很大, 那么, 动量的改变量 $p' - p$ 也将很大, 这时 $\bar{F}$ 将很大, 重力也可忽略不计。除了这两种情况, 重力将不能被忽略, 应用动量定理时 $\bar{F}$ 中应包含重力。

3. 合外力的冲量为 0, 系统的动量守恒吗?

教学中, 学生常常产生这样的疑问: 从动量定理的表达式 $\bar{F}t = p' - p$ 来看, 动量守恒的条件为什么是外力的合力为 0, 而不是外力的冲量为 0?

出现这样的问题, 主要是由于中学阶段学生数学知识所限, 动量定理只能用初等数学表示成上式, 容易使学生产生一些误解。

在普通物理中动量定理是用高等数学表示的, 其微分形式和积分形式分别是

$$\frac{d}{dt}(mv) = F$$

$$mv_2 - mv_1 = \int_{t_1}^{t_2} F dt$$

微分形式适用于变力作用下的无限小时间内的力学过程, 积分形式适用于变力作用下有限时间内的力学过程。

下面, 以对质点的动量定理的理解为例, 进行对比分析。

(1) 对于动量守恒含义的对比分析

从中学的动量定理表达式来看, 当质点所受的合力保持为 0 时, 则有 $mv_2 = mv_1$ 。学生常常把质点的末动量等于初动量, 即把动量“不变”误认为是动量“守恒”; 从普通物理学的动量定理表达式看, 当 dt 时间内合力 $F=0$, 有 $mv = \text{恒矢量}$ 。这就是说, 所谓动量守恒, 不仅要求质点的末动量等于初动量, 而且还要求在整个过程中任一时刻的动量都相等。

(2) 对于动量守恒条件的对比分析

从中学动量定理表达式来看, 若在 t 时间内有 $F=0$, 则 $mv_2 = mv_1$ 。由此学生会想, 若合力 $F=0$, 则合力的冲量 $I=Ft$ 也必为 0, 自然会得到这样的结论: “合力的冲量为 0 也是动量守恒的条件”。从普通物理的动量定理积分形式来看, 合力 F 是被积函数, 冲量 I 是函数 F 的

积分值。由高等数学可知,当被积函数 $F=0$ 时,则积分值 $I=\int_{t_1}^{t_2} Fdt$ 一定为 0;反之,当积分值 $I=0$ 时,则被积函数 F 不一定为 0。用物理语言说,即当合力冲量 I 为 0 时,质点的动量不一定守恒。例如,轻绳的一端系一小球,手握绳的另一端使小球在光滑的水平桌面上做匀速圆周运动。如果选取小球运动一周的起始和终止时刻作为运动的初态和终态,在运动一周的时间内,绳对小球拉力的冲量为 0,小球初态动量等于终态动量,但不能认为小球在运动过程中的动量是守恒的,原因是小球运动过程中各时刻所受的合外力不为 0。

4. 应用动量守恒定律时应怎样选取参考系

应用动量守恒定律计算某一时刻系统的总动量时,系统内各质点的动量应是相对于同一惯性参考系的。关于这一点,学生往往搞错,请看下面的例题。

在静止的湖面上有一质量 $m_1=100\text{ kg}$ 的小船,船上站立一质量 $m_2=50\text{ kg}$ 的人,船长 $L=6\text{ m}$,最初人和船静止。当人从船头走到船尾(图 16-14),船后退多大距离?(忽略水的阻力)

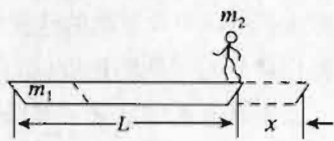


图 16-14

有的学生对这一问题是这样解答的。由船和人组成的系统,当忽略水的阻力时,水平方向动量守恒。取人前进的方向为正方向,设 t 时间内人由船头走到船尾,则人前进的平均速度为 $\frac{L}{t}$,船在此时间内后退了 x 距离,则船后退的速度平均为 $\frac{x}{t}$,水平方向动量守恒方程为

$$m_2 \frac{L}{t} + m_1 \left(-\frac{x}{t} \right) = 0$$

$$x = \frac{m_2}{m_1} L = 3\text{ m}$$

这一结果是错误的,其原因是在列动量守恒方程时,船后退的速度 $\frac{x}{t}$ 是相对于地球的,而人前进的速度 $\frac{L}{t}$ 是相对于船的。相对于不同参考系的速度代入同一公式中必然要出错。

本题正确的解法是:选地球为参考系,人在船上行走,相对于地球的平均速度为 $\frac{L-x}{t}$,船相对于地球后退的平均速度为 $\frac{x}{t}$,系统水平方向动量守恒方程为

$$m_2 \frac{L-x}{t} + m_1 \left(-\frac{x}{t} \right) = 0$$

$$x = \frac{m_2}{m_1 + m_2} L = 1.2\text{ m}$$

5. 应用动量守恒定律时应怎样选取瞬时速度

动量守恒定律表达式 $m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$ 中的四个速度,其中 v_1 与 v_2 系指相互作用的两物体初始时刻的瞬时速度。 v_1' 和 v_2' 系指相互作用的两物体末时刻的瞬时速度。由于速度 v 的瞬时性,决定了动量 p 的瞬时性。因此应用动量守恒定律时,应严格注意 v_1 与 v_2 必须同时, v_1' 与 v_2' 也必须同时。下面所举是教学中容易出错的题目。

平静水面上有一载人小船,船和人的共同质量为 m_1 ,船上站立的人手中拿一质量为 m_2 的物体。起初人相对船静止,船和人共同以 v_0 速度前进。当人相对船以 u 速度沿船运动的相反方向将物体抛出后(图 16-15),求人和船的速度。(忽略水的阻力)

教学中常见错误解法是：由船、人及物体组成的系统，当忽略水的阻力时，水平方向动量守恒。设物体抛出后人船的共同速度为 v ，取船前进方向为正方向，动量守恒方程为

$$(m_1 + m_2)v_0 = m_1v + m_2(v - u)$$

解得

$$v = \frac{m_1v_0 + m_2u}{m_1}$$

上述解法的错误在于计算抛出物体的动量时，抛出物体相对地面的速度用了 $(v_0 - u)$ ， v_0 是船初始时刻的速度， u 是抛出物体终了时刻的速度，二者不是同一时刻的瞬时速度。物体被抛出有个过程，在这短暂的时间里，被抛出的物体和人（人和船连成一体）之间存在大小相等、方向相反的作用力，因而被抛出物和人人都获得加速度，使被抛出物相对人的速度由 0 逐渐增大到 u ，而人对地的速度由 v_0 逐渐变为 v ，这就是说 u 和 v 是同一时刻的速度，终了时刻被抛出物相对地面的速度应是 $(v - u)$ 。

本题正确解法是：系统水平方向动量守恒方程是

$$(m_1 + m_2)v_0 = m_1v + m_2(v - u)$$

所以

$$v = v_0 + \frac{m_2u}{m_1 + m_2}$$

6. 大炮斜向射击问题的分析

在中学物理教学中，曾有过这样的题目：炮车以仰角 α 发射一炮弹，炮车和炮弹的质量分别为 m_1 和 m_2 ，炮弹在出口时相对炮车的速度为 v_r ，求炮车的反冲速度。在分析这一问题时，往往都说在大炮斜向射击过程中炮车和炮弹组成的系统在竖直方向动量不守恒，在水平方向，火药爆炸对炮弹的推力和对炮车的推力都很大，地面对炮车的摩擦力可忽略不计，因此，水平方向动量守恒。应用这一守恒公式，可求出炮车的反冲速度。

大炮斜向射击过程中竖直方向的动量为什么不守恒？水平方向的摩擦力一般都可以忽略不计吗？对此我们作一较详细的分析。

分别取炮车 m_1 、炮弹 m_2 为研究对象，在炮弹从炮膛到炮口的运动过程中，设火药的平均作用力为 F ，炮弹的这段运动近似地看成速度从 0 增加到 v_r 的匀加速直线运动，相对位移为 l 。炮车和炮弹的受力情况如图 16-16 所示，其中 F_N 为地面对炮身的支持力。在竖直方向上分别对炮车 m_1 及炮弹 m_2 应用牛顿第二定律，有

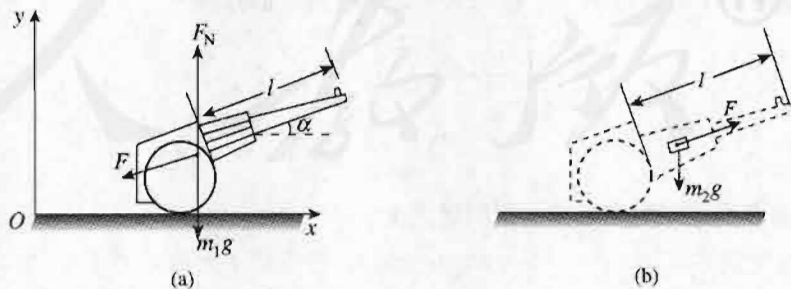


图 16-16

$$F_N - m_1g - F \sin \alpha = 0 \quad (1)$$

$$F \sin \alpha - m_2g = m_2a_y \quad (2)$$

又

$$v_y^2 = 2a_y l \sin \alpha \quad (3)$$

$$v_y = v_r \sin \alpha \quad (4)$$

解方程组, 得

$$F_N = (m_2 + m_1)g + \frac{m_2 v_r^2}{2l} \sin \alpha \quad (5)$$

由炮车和炮弹组成的系统, 竖直方向上的外力为 F_N 及 $(m_1 + m_2)g$, 从 (5) 式看出: 在开炮过程中, 地面对炮身的支持力 F_N 并不与 $(m_1 + m_2)g$ 相平衡, 系统在这个方向动量不守恒。

下面, 再来分析水平方向炮车受到地面的摩擦力与内力 F 比较是否可忽略掉。

假设 $m_1 = 1\,000\text{ kg}$, $m_2 = 10\text{ kg}$, $l = 2.5\text{ m}$, $\alpha = 40^\circ$, $v_r = 300\text{ m/s}$ 。将这些数据代入 (5) 式, 则

$$F_N = \left[(1\,000 + 10) \times 9.8 + \frac{10 \times 300^2}{2 \times 2.5} \times \sin 40^\circ \right] \text{ N} = 115\,300\text{ N}$$

假设炮车与地面之间滑动摩擦因数 $\mu = 0.2$, 则炮车与地面间的摩擦力

$$F_f = \mu F_N = 0.2 \times 115\,300\text{ N} = 23\,060\text{ N}$$

由 (1) 式, 此时内力

$$F = \frac{F_N - m_1 g}{\sin \alpha} = \frac{115\,300 - 1\,000 \times 9.8}{0.64} \text{ N} = 164\,531\text{ N}$$

而

$$\frac{F_f}{F} = 0.15$$

即当大炮仰角为 40° 时, 水平方向所受的摩擦力与火药爆炸的内力相比已占 15%, 已经不能忽略不计了, 此时水平方向动量不守恒。

将 α 换成不同的数值进行上述计算, 不难看出: 水平方向动量守恒与否是由仰角 α 决定的。当 α 较小时, 摩擦力与内力相比可忽略, 水平方向可应用动量守恒定律; 当 α 较大时, 摩擦力已不能忽略, 水平方向已不能应用动量守恒定律了。若支撑面很光滑, 水平方向也可应用动量守恒定律。

7. 自编习题时要防止数据出错

教学中有时需要自编一些关于动量守恒方面的习题。编写这方面习题一定要注意给出的数据必须恰当。对于弹性碰撞的习题中的数据, 既要满足系统动量守恒, 又要满足碰撞始末动能相等。下面的题目就是不妥当的自编习题:

质量 $m_1 = 100\text{ g}$ 的小球, 以 $v_1 = 5\text{ m/s}$ 的速度与质量 $m_2 = 400\text{ g}$ 静止的小球发生对心弹性碰撞 (图 16-17)。若碰撞后质量为 m_2 的小球的速度 $v_2' = 4\text{ m/s}$, 求小球 m_1 碰撞后的速度 v_1' 是多少?

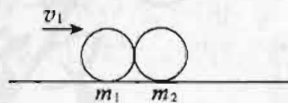


图 16-17

该题两小球组成的系统, 在水平方向上动量守恒, 有

$$m_1 v_1 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

故

$$v_1' = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2'}{m_1} = -11\text{ m/s}$$

这一答案从动量守恒的角度来看是没有问题的, 但从能量的角度来看却是不合理的。因两小球发生弹性碰撞, 碰撞始末系统的动能应不变。本题碰撞初系统的动能

$$E_{k1} = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = 1.25\text{ J}$$

碰撞后系统的动能

$$E_{k2} = \frac{1}{2}m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2'^2 = 9.25 \text{ J}$$

$E_{k2} > E_{k1}$, 系统的动能增大了, 不符合弹性碰撞的规律。

问题出现在题目给出的 m_2 碰后速度不恰当。我们知道, 根据碰撞理论, 就弹性碰撞、非弹性碰撞、完全非弹性碰撞进行比较, 弹性碰撞后, m_2 的速度最大, 其值

$$v_2' = \frac{2m_1 v_1}{m_1 + m_2} = 2 \text{ m/s}$$

本题给出的 m_2 碰后的速度 $v_2' = 4 \text{ m/s}$, 超出了 m_2 碰后速度的最大值, 必然要出现碰撞后系统的动能增加的错误结果。

8. 动量守恒定律的适用范围比牛顿运动定律更广

近代的科学实验和理论分析都表明: 在自然界中, 大到天体间的相互作用, 小到如质子、中子等基本粒子间的相互作用, 都遵守动量守恒定律。因此, 它是自然界中最重要、最普遍的客观规律之一, 比牛顿运动定律的适用范围更广。下面举一个牛顿运动定律不适用而动量守恒定律适用的例子。

在我们考察光的发射和吸收时, 会看到这样一种现象: 在宇宙空间中某个地方有时会突然发出非常明亮的光, 这就是超新星。可是它很快就逐渐暗淡下来。光从这样一颗超新星出发到达地球需要几百万年, 而相比之下超新星从发光到熄灭的时间就显得太短了。

当光从超新星到达地球时, 它给地球一个轻微的推动, 而与此同时地球却无法给超新星一个轻微的推动, 因为它已经消失了。因此, 如果我们想象一下地球与超新星之间的相互作用, 在同一瞬间就不是大小相等、方向相反了。这时, 牛顿第三定律显然已不适用了。

虽然如此, 动量守恒定律还是正确的。不过, 我们必须把光也考虑在内。当超新星发射光时, 星体反冲, 得到动量, 同时光也带走了大小相等而方向相反的动量。等经过几百万年之后光到达地球时, 光把它的动量传给了地球。这里要注意的是: 动量不仅可以为实物所携带, 而且可以随着光辐射一起传播。当我们考虑到上述这点时, 动量守恒定律还是正确的。

9. 相对论的动量

在牛顿力学里, 动量定义为 mv , 质量 m 是个不变的量。根据牛顿第二定律, 一个恒定的力, 持续作用于一个物体, 可以使该物体有任意大的高速度。但是在现实中, 真空中的光速是极限速度, 并且在任何条件下物体的速度都不可能超过真空中的光速。因此, 在高速运动时, 认为质量 (以及动量) 与速度无关的说法是不正确的。

相对论告诉我们, 在高速运动时质量不再是一个不变的量, 而是随着运动的速度接近光的速度 c 而增大。如果用 m_0 表示静止物体的质量, 则以速度 v 运动的物体的质量 m 可以用下式表示

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

相对论的动量仍定义为

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

在采用这样定义的情况下, 牛顿本人所用的第二定律的表达式

$$\frac{dp}{dt} = F \quad \left(F = \frac{d}{dt} \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right)$$

在接近光速的情况下也同样适用了。因为随着运动速度的增大,决定物体惯性大小的质量也增大。当 $v \rightarrow c$ 时, $m \rightarrow \infty$, 所以加速度趋于 0, 不论力作用多长时间, 速度也不会超过光速。

对于静止质量 $m_0 = 0$, 而速度为 c 的光子来说, 它的动量 $p = \frac{E}{c}$ 可以这样推得:

因为 $E = mc^2$, 所以

$$\begin{aligned} E^2 &= m^2 c^4 = m^2 c^4 - m^2 v^2 c^2 + m^2 v^2 c^2 \\ &= m^2 c^4 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) + p^2 c^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2 \end{aligned}$$

在 $v = c$ 、 $m_0 = 0$ 时, $E^2 = p^2 c^2$, 所以 $p = \frac{E}{c}$ 。

(二) 联系生活、科技和社会的资料

1. 火箭

靠火箭发动机喷射出的工作物质(简称工质)所产生的推力作用向前推进的飞行器。将火箭和燃烧后喷出的高温高压气流视为一个物体系统, 根据动量守恒定律, 向后喷出的工质使火箭获得向前的动量, 发动机连续喷射, 则使火箭不断加速前进。由于火箭自身携带着能源和工质(合称推进剂), 不需外界提供工质, 因此可以在大气层外飞行, 使人类脱离地球飞向宇宙的理想得以实现。

火箭技术在军事和民用上都有广泛的用途, 按用途分, 主要的有: 无控火箭弹(炮)、导弹、探空火箭、运载火箭。此外还有用作航天器姿态控制和末速控制的微调火箭, 使多级火箭分离的分离火箭, 在紧急情况下将驾驶员弹出的救生火箭等。

按火箭发动机所使用的能源分有:

(1) 化学火箭。化学火箭的推进剂既是能源, 也是工质, 推进剂在火箭中燃烧, 将化学能转换为内能, 再转换为机械能。具体又可以分为: ①固体火箭。推进剂是由燃料、氧化剂和其他添加剂组成的固态混合物, 制成一定几何形状的块状体, 置于固体火箭的燃烧室中。固体火箭结构简单、使用方便、可长期存放, 多用于军事。②液体火箭。使用常温下呈液态或低温下呈液态的推进剂。液体氧化剂有: 液氧、液氟、四氧化二氮、五氟化氯、二氧化氮等; 燃料有: 液氢肼、偏二甲肼、一甲基肼、煤油、甲烷等。优点是在一次飞行中可多次起动。③混合推进剂。以固体为燃料, 液体为氧化剂, 它兼有前两种火箭的优点。

(2) 电火箭。使用电火箭发动机, 利用电能加热工质, 形成高速喷出的气流, 产生推力, 电能可由太阳能、核能、化学能转换而来。工质用氢、氦、氙等。这种发动机可起动上万次, 工作上万小时, 其推力小于 100 N, 用于控制航天器的姿态、保持位置等方面。

(3) 核火箭。利用核反应和放射性衰变释放的能量加热工质产生推力的火箭, 适用于长期工作的航天器。其技术复杂, 并需注意防止污染。

(4) 太阳能火箭。利用太阳能直接加热工质以产生推力的火箭。太阳能由抛物面聚焦获得, 适用于长期工作的航天器, 现在尚处于研究阶段。

(5) 光子火箭。靠电磁辐射光子的定向流动产生推力的火箭, 在理论上具有最高的效能, 现尚处于探索阶段。

火箭有单级、多级之分, 单级火箭难以获得发射人造地球卫星所需要的第一宇宙速度

(7.9 km/s), 更不可能获得摆脱地球的引力成为太阳的人造行星的第二宇宙速度(11.2 km/s), 和摆脱太阳的引力飞向其他恒星系的第三宇宙速度(16.7 km/s)。多级火箭一般为2~4级, 工作时先点燃最下面一层的火箭, 即第一级火箭, 燃料用尽后自行脱落, 第二级火箭点燃并开始工作, ……最后末级火箭使载荷获得所需要的速度。多级火箭有很多优点, 最重要的是能够逐级减少飞行重量, 具有较好的加速性能; 又因为每一级都是独立的, 可以根据工作的高度、条件不同而选用不同类型的火箭发动机。但级数不宜太多, 级数越多, 结构越复杂, 越难于控制, 可靠性会降低。多级火箭有三种组合方式: ①串联式, 各级火箭首尾相接, 联成一个整体, 这种连接方式结构紧凑, 阻力小, 是最常使用的; ②并联式, 又称为捆绑式, 各级火箭横向连接, 长度短, 发射时可同时点火, 但因横向尺寸大, 发射设备复杂, 费用高; ③混合式, 串联并联同时使用, 它兼有两者的优缺点。美国“德尔塔”2910/2914型捆绑式火箭, 在箭体下部的四周捆绑着多台固体火箭助推器(称为零级火箭), 上面依次是一级火箭、二级火箭, ……逐级相串联, 我国的长征二号捆绑式火箭(简称“长二捆”)便属此类。

(摘自《物理与生活教学手册》, 段金梅、唐伟国、马子振主编, 高等教育出版社, 1995年, 有改动)

2. 火箭的运动

现代火箭技术的发展, 对于极其广泛的科学技术领域产生了深刻的影响, 使人类飞向月球和其他行星的梦想成为现实。现代火箭包含着众多学科的尖端科技问题。然而, 如果不去讨论这些科学技术问题, 只研究火箭推进的基本动力学原理, 那么, 它和我们祖先最早发明的“冲天炮”一样, 是应用动量守恒这一基本定律。

火箭由火箭壳体(包括各种仪器设备和载荷如弹头或卫星、乘员等)和燃料(包括燃烧剂和助燃剂)组成。燃料在燃烧室中燃烧, 产生高温高压的燃气, 通过喷口向后喷出, 同时, 给火箭主体以反冲。如果不计空气阻力和重力(假定火箭在无重力的空间运动), 并把火箭和由它喷出的燃气组成一个系统, 那么, 这个系统的动量守恒。火箭主体向后以高速推出燃气。燃气对火箭施以向前的反推力。对系统而言, 这是内部的相互作用, 不改变系统的总动量。然而对火箭主体来说, 燃气反冲产生向前的推力, 使之不断加速。

下面我们根据动量守恒定律, 得出火箭运动的基本方程。

设在任一时刻 t , 火箭主体(包括在以后的 dt 时间内即将燃烧的燃料在内)的质量为 m , 对于选定的惯性参照系的速度为 v ; 在 $t+dt$ 时刻, 由于已燃烧的喷气已经喷出, 火箭主体的质量变为 $m'=m+dm$ (由于喷出燃气, $m'<m$, 故主体质量的增量为负, $dm<0$)速度变为 $v+dv$ 。在时间 dt 内喷出的燃气质量为 $m-m'=-dm$, 喷出的燃气相对于火箭主体的速度为 u , 方向向后, 则在 $t+dt$ 时刻, 燃气相对于选定惯性系的速度为 $v+dv-u$ 。由于火箭主体和喷出的燃气所组成体系的动量守恒, 所以

$$mv = (m+dm)(v+dv) + (-dm)(v+dv-u) \quad ①$$

化简为

$$mdv = -udm \quad ②$$

这就是火箭在无重力空间中运动的基本微分方程式。式中喷射相对速度 u 与燃料的化学性质和喷口的形状有关, 对一定的火箭是一个常数。由于燃料不断燃烧并喷射出去, m 和 v 都是随时间而变化的。下面根据②式讨论火箭的推力和收尾速度。

(1) 火箭的推力

用时间 dt 去除②式两端, 得

$$m \frac{dv}{dt} = -u \frac{dm}{dt} \quad (3)$$

式中 m 为 t 时刻火箭主体的质量, $\frac{dv}{dt}$ 即为 t 时刻的加速度。与牛顿第二定律比较, 上式的右端就是由喷出的燃气反作用于火箭主体的力, 称为火箭的推力

$$F_{\text{推}} = -u \frac{dm}{dt} = u \left| \frac{dm}{dt} \right| \quad (4)$$

$\frac{dm}{dt}$ 是火箭主体质量的增加率。由于是不断喷出质量, 故 $\frac{dm}{dt} < 0$, 所以 $\left| \frac{dm}{dt} \right|$ 表示火箭主体的质量减小率。燃料燃烧后的产物从喷口喷出, 使主体质量减小, 故 $\left| \frac{dm}{dt} \right|$ 也就是燃料的消耗率。

④式表明火箭的推力等于喷射相对速度和燃料的消耗率之乘积。

阿波罗月球火箭 (三级土星 V 火箭) 第一级的平均喷射相对速度 $u = 2.8 \text{ km/s}$, 平均燃料消耗率 $\left| \frac{dm}{dt} \right| = 1.33 \times 10^4 \text{ kg/s}$ 。由④式可算出它的推力平均为

$$F_{\text{推}} = 37.2 \times 10^6 \text{ N}$$

实际上, 土星 V 一级火箭的推力从起飞时的 $34 \times 10^6 \text{ N}$, 增加到熄火时的 $40.4 \times 10^6 \text{ N}$ 。阿波罗火箭初始质量 (包括载体和燃料) 为 $m_0 = 2.94 \times 10^6 \text{ kg}$ 。所以, 在开始沿竖直方向起飞时, 火箭的加速度为

$$a_0 = \frac{1}{m_0} (F_{\text{推}} - m_0 g) \approx 1.76 \text{ m/s}^2$$

(2) 收尾速度

将②式改写为

$$dv = -u \frac{dm}{m} \quad (5)$$

设火箭开始发动时的初始质量为 m_0 , 速度为 v_i ; 当燃料耗尽, 火箭发动机停止工作 (熄火) 时, 火箭壳体的质量为 m_i , 速度——收尾速度——为 v_f 。对⑤式积分

$$\int_{v_i}^{v_f} dv = -u \int_{m_0}^{m_i} \frac{dm}{m}$$

得

$$v_f = v_i + u \ln \frac{m_0}{m_i} \quad (6)$$

这就是在无重力和阻力的空间中火箭的收尾速度公式。如果火箭从静止开始发动, 则 $v_i = 0$, 收尾速度为

$$v_f = u \ln \frac{m_0}{m_i} \quad (7)$$

这表明火箭的收尾速度与喷射相对速度和质量比 $\frac{m_0}{m_i}$ 的自然对数成正比。

阿波罗月球火箭第一级点火时总质量 $m_0 = 2.94 \times 10^6 \text{ kg}$, 熄火时的质量 $m_i = 0.79 \times 10^6 \text{ kg}$ (这二者之差即为第一级火箭的燃料质量 $2.15 \times 10^6 \text{ kg}$), 喷射相对速度 $u = 2.8 \text{ km/s}$ 。根据⑦式算出第一级火箭的收尾速度为

$$v_f = 2.8 \ln \frac{2.94}{0.79} \text{ km/s} = 3.68 \text{ km/s}$$

这是假定无重力和阻力情况下的计算值，实际上第一级火箭不能忽略重力和阻力的影响。土星 V 火箭第一级的工作时间是 $t_1 = 161 \text{ s}$ 。如果假定它保持竖直飞行，并计入恒定的重力作用（仍不计阻力）。则在第一级熄火时的速度为

$$v'_f = 2.8 \ln \frac{2.94}{0.79} \text{ km/s} - gt_1 = 2.1 \text{ km/s}$$

但是，阿波罗月球火箭的第一级是沿着曲线飞行的（当离地高 67 km 时，火箭离发射点水平距离 93 km ），重力的影响比竖直飞行小一些。实际上第一级火箭熄火时的速度为 2.75 km/s 。

从⑦式可知，为了提高火箭的收尾速度，应从两方面着手。一是研制新型的燃料以提高燃气的喷射速度 u 。一般通过化学反应（燃烧）过程可能达到的喷射速度的最高限度约为 5 km/s 。这对常见的宏观物体的运动来说，速度已经很高了，但是比起带电粒子在电场中的运动来说则是非常低的。因此为了大大提高火箭速度，人们共同期望发射离子火箭，甚至光子火箭（光帆）。从火箭喷口向后喷射高速的离子或具极限速度的光子。但是，由于离子或光子的质量喷射率太小，以致推力也非常之小，离子火箭或光帆仍只是人们的幻想。

提高火箭收尾速度的另一途径是提高质量比，但是由于收尾速度与质量比的对数成正比，故这一途径也要受到限制。下面列出收尾速度（用喷射相对速度 u 来表示）与质量比的关系：

v_f	u	$2u$	$3u$	$4u$
m_0/m_s	2.7	7.4	20.1	54.5
$(m_0 - m_s)/m_s$	1.7	6.4	19.1	53.5

（表中第三行是燃料装载量与火箭壳体质量的比值。）

从表中可见要使收尾速度达到喷射速度的三倍，质量比就为 20.1，这就是说，燃料的质量应当是火箭壳体质量的 19.1 倍！这是不可能做到的。试想通常用作容器的煤油桶，当满载煤油时，油与桶的质量比也不超过 10，更何况火箭壳体除装燃料外，还有其他载荷（如仪器、弹头、待发射的卫星等）。土星 V 火箭第一级的质量比仅为 $\frac{2.99}{0.79} = 3.72$ ，就足以说明提高质量比的实际困难。

3. 气功表演中的动量定理

有一磨盘放在躺着的气功演员的胸膛上，一人用铁锤用力打击磨盘，磨盘被打得粉碎，而气功演员却安然无恙。这种表演实际上是根据动量定理设计的，满足下述关系

$$\int_{t_1}^{t_2} F dt = m \Delta v$$

在铁锤冲量 $\int_{t_1}^{t_2} F dt$ 一定的情况下，由于磨盘质量 m 非常大，磨盘的速度增量 Δv 很小，又由于磨盘与人胸膛接触面较大，因此，铁锤打击磨盘的瞬间，人的胸膛受到的压强增量不大。而且磨盘越重，这种压强的增量越小。所以，人只要经得住磨盘的压力，就是安全的。

反过来，当物体的动量增量一定时，物体之间的相互作用时间越长，则相互的冲力越小。例如，包装玻璃器皿时，总是加些纸屑之类的东西，目的就是增加相互碰撞的时间，以减小碰击力，确保玻璃器皿的安全。用竹竿把小船推离岸边，用长竿比用短竿有利，这是因为用长竿推，推的时间较长，当推力一定时，船受到的冲量也就越大，因此，能使船得到较大的动量增量。

动量定理等式两端描写的是同一物体受到的冲量和它得到的动量的增量的对应矢量关系，

说明一个物体受到冲量, 则它的动量必然发生变化, 冲量是物体动量变化的量度。

4. 动量和体育运动

在许多体育运动中, 人们力图最大限度地转移动量。例如在拳击, 把动量传递给敌手时, 单纯伸臂一击远不如身体一起运动打出去的拳头有效。但是在日本拳术中动量的转移却常常不是依靠整个身体的运动而是靠四肢的高速运动来实现的。

接触式运动 (contact sports) 并不是动量转移在其中起重要作用的唯一领域。例如, 铅球运动员的基本目的就是要将整个身体的质量低速运动转换成小球的高速运动 (图 16-18)。在球类活动中动量也起着重要的作用。

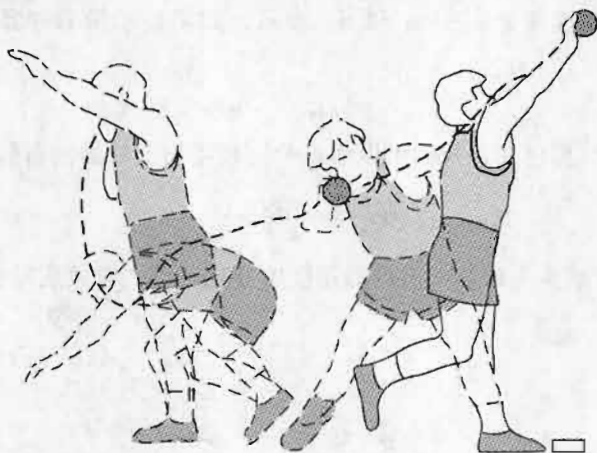


图 16-18 铅球运动员的动作过程。在理想情况下, 当把球刚推出去时身体的部分动量很小, 身体的动量都转移给了铅球。

下表列出了在各种球类运动中测量到的优秀运动员的典型速度和时间。击球器是用来击球的器械, 例如棒球棍, 网球拍, 或是脚。要想利用冲量和动量并由这些数据中得出有用的信息时, 我们必须搞清楚击球器的质量, 因而其动量并不总能算得十分精确。例如以网球为例, 击球器是质量为 0.4 kg 的网球拍, 但是当用拍子时, 手臂和部分身体也可看做是击球器的一部分; 球拍可当做是身体的延长。击球器的有效质量取决于利用身体的哪一部分, 以及怎样利用它们。当一个人基本上是通过手腕的动作来挥动网球拍时, 击球器的有效质量是很小的, 因而不能有力地挥动。

球的质量, 击球前后击球器的速度, 球和击球器接触时的撞击时间

球	球的质量/kg	球的速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		击球器速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		撞击时间/s
		前	后	前	后	
棒球(从静止时开始击球)	0.15	0	39	31	27	1.35×10^{-3}
足球(踢悬空球)	0.42	0	28	18	12	8×10^{-3}
高尔夫球(用力击球)	0.047	0	69	51	35	1.25×10^{-2}
手球(发球)	0.061	0	23	19	14	1.35×10^{-2}
英式足球(踢)	0.43	0	26	18	13	8×10^{-3}
橄榄球(发球)	0.032	0	49	44	34	3×10^{-3}
垒球(由静止时开始击球)	0.17	0	35	32	22	3×10^{-3}
网球(发球)	0.058	0	51	38	33	4×10^{-3}

击球的人通常是和地面接触的，这就是说球和击球器不能真正地当做不受外力作用的孤立系统的一部分。当网球拍击球时，根据牛顿第三定律，球也对球拍施加作用力，而人体也对地面施加作用力。因此，如果球拍把动量传给球的话，那么也把动量传给地面。

为了避免这种分析中的一些困难的细节，我们定义一个量——击球器的有效质量，这样做是方便的。也就是说，我们假想击球器和球是一个没有受到外力的系统的两个部分，因而可以认为击球器和球的总动量是不变的。有效质量并不只是用来计算无意义数值的手段，仔细研究运动员的运动可以帮助我们了解如何增大击球器的有效质量，从而提高球的速度。

我们以 m_2 表示球的质量，而以 v'_2 表示球的末速度，其初速度为 0。击球器的有效质量用 m_1 表示，其初速度和末速度分别用 v_1 和 v'_1 表示。如果运动沿着一条直线，那么动量是守恒的

$$m_1 v_1 = m_2 v'_2 + m_1 v'_1$$

假设 m_2 、 v'_2 、 v_1 和 v'_1 都已知，我们可以解这个方程得出击球器的有效质量

$$m_1 = -\frac{m_2 v'_2}{v_1 - v'_1}$$

注意，操作时尽量减少击球期间击球器速度的变化，那么有效质量就增大（图 16-19）。

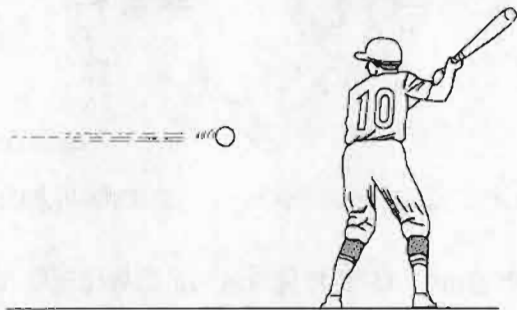


图 16-19 棒球运动员把脚站稳，击球时使身体朝着球运动，这就增大了击球时球棒的有效质量。

（摘自《生命科学物理学》[美] J. W. 凯恩、M. M. 斯特海姆著，王祖铨等译，科学出版社，1985 年，有改动）

（三）实验参考资料

1. 反冲运动

（1）用火箭筒演示

拿一个空摩丝瓶，在其底部用大号缝衣针钻一小洞，这样就制成了一个简易的火箭筒。

如图 16-20，在铁支架的立柱顶端装上顶轴，在旋转臂的两侧各装一只火箭筒，再把旋转系统放在顶轴上。往火箭筒内注入约 4 mL 的酒精，并在火箭筒下方的棉球上注少量酒精，点燃酒精棉球，片刻火箭筒内的酒精蒸气从尾孔中喷出，并被点燃。这时可以看到火箭旋转起来，带着长长的火舌，并伴随有呼呼的声响。

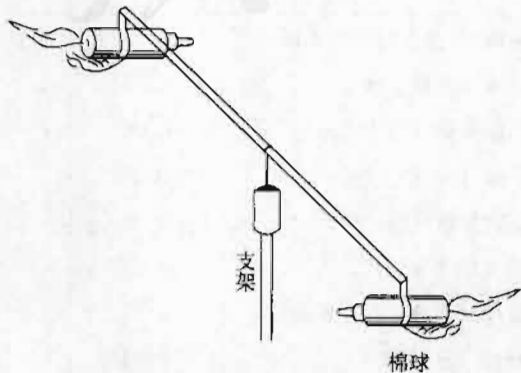


图 16-20

注意棉球上的酒精不要太多，下方的桌上不要放易燃物品。实验完毕，应将筒内剩余的酒精烧尽或倒出。

(2) 用水火箭演示

水火箭用空可乐瓶制作。用一段吸管和透明胶带在瓶上固定一个导向管。瓶口塞一橡皮塞，在橡皮塞上钻一个孔。在塞上固定一只自行车车胎上的进气阀门，并在气门芯内装上小橡皮管（图 16-21）。

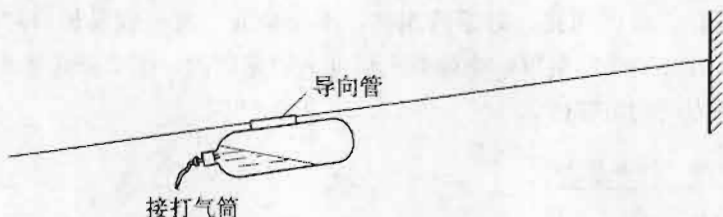


图 16-21

实验时，瓶中先注入约 $\frac{1}{3}$ 体积的水，用橡皮塞把瓶口塞严。将尼龙线穿过可乐瓶上的导向管，使线的一端拴在门的上框上，另一端拴在板凳腿上，要把线拉直。将瓶的进气阀与打气筒相接，向筒内打气到一定程度时，瓶塞脱开，水从瓶口喷出，瓶向反方向飞去。

(3) 反冲气球

如图 16-22，给气球内吹足气，捏紧出气口。释放气球，可见气球向放气的反方向飞出。



图 16-22

(4) 火柴火箭

将一根火柴和一根缝被的大针并在一起，用包香烟的铝箔将它们紧紧地包裹起来，再将火柴头一端的铝箔弯折过来密封捻紧，如图 16-23 所示。然后在靠近尾部的地方装上定向尾翼，把针拔出，就成了一个很简单的反冲火箭。

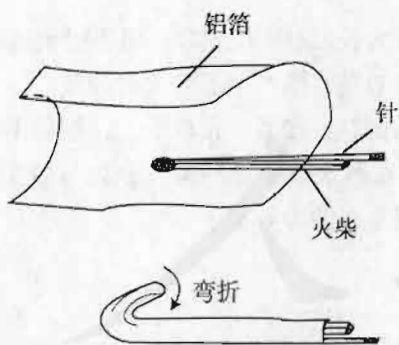


图 16-23

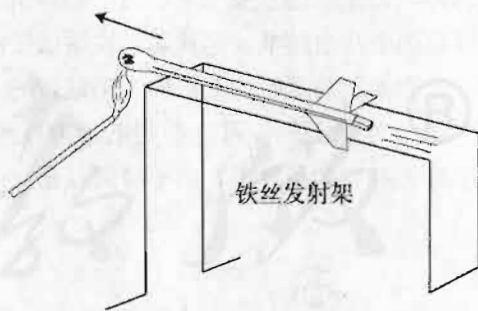


图 16-24

实验时，把小火箭放在铁丝架上，点燃一根火柴，对准铝箔筒包有火柴头的部位加热，当温度升高到火柴头的燃点时，筒里的火柴便被点燃，使周围的空气急剧膨胀，气体从尾口高速喷出。由于反冲作用，火箭筒便从架上向前飞了出去。如图 16-24 所示。

如果在铝箔中包两根头对头放置的火柴，两端都不封闭。将它放在架上，从中部加热。当筒内火柴点燃后，气体从两头喷出，铝箔筒仍停留在架上，从而说明了系统的动量守恒。

(5) 反冲炮车

用一个现成的小玩具卡通车和一支铝壳圆珠笔筒，你就能制作一辆很有趣的反冲炮车。

用罐头铁皮剪成如图 16-25 所示的“T”形，将上边的横边卷弯包在圆珠笔的铝筒上，并用螺丝钉或铆钉固紧铝筒。铁皮的直边作为支架，固定在卡通车的平板上，如图 16-26 所示。实验时在铝筒内放入几颗火柴头，用小塞子把铝筒口堵上，然后在铝筒封闭端下的铁盒里放一小团浸有酒精的棉花。点燃棉花，对铝筒加热，不一会儿，塞子就从炮口冲出，小车向后倒退。如果在炮口前方加一个收集罩，炮弹射出后即入收集罩内，炮车就几乎不动。这两种情况都说明系统在水平方向动量守恒。

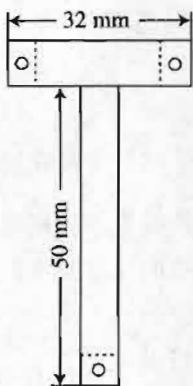


图 16-25

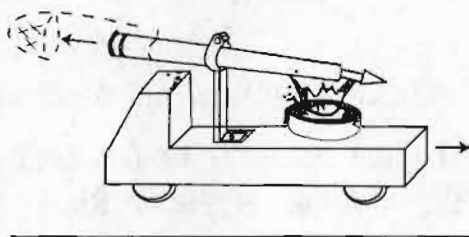


图 16-26

2. 验证动量定理

方法一

目的 说明当作用力 F 不变时，作用时间越短，物体动量的改变量越小。

器材 墨水瓶，纸带，木棍，图钉等。

操作

(1) 将纸带压在墨水瓶底下（另一端露出部分不要过长）（图 16-27），用手慢慢地拉动纸带，可以看到墨水瓶随纸一起移动。说明纸带的摩擦力对墨水瓶产生了较大的冲量。

(2) 让墨水瓶与纸带恢复原样，将纸带的另一端用图钉钉在另一张桌子上，然后用木棍快速由纸带 P 点处往下打，可以看到纸带由瓶底抽出，而墨水瓶平稳地留在原处（图 16-28）。说明在摩擦力不变的情况下，由于时间很短，纸带对墨水瓶的冲量很小。

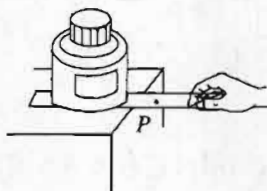


图 16-27

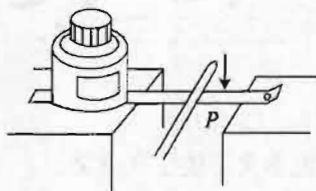


图 16-28

注意 墨水瓶的质量大一些好，因此应选用装满墨水的墨水瓶。

方法二

目的 说明当物体冲量的变化量一定时，力作用的时间越长，作用力越小。

器材 500 g 砝码, 细线, 橡皮筋, 支承架等。

操作

- (1) 一根细线一端固定在支承架上, 另一端悬挂一个 500 g 重的砝码。
- (2) 将砝码抬高适当的高度后释放。由于细线从松弛到张紧的变化过程历时很短, 因此细线因受到很大冲力而被拉断 (图 16-29)。
- (3) 用另一根细线, 上端通过一根橡皮筋与支承架相连, 下端仍然悬挂同一个砝码。
- (4) 将砝码抬高相同的高度后释放。由于橡皮筋的缓冲作用, 力作用的时间增长, 细线没有被拉断, 说明这时作用力较小 (图 16-30)。

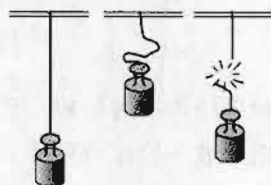


图 16-29

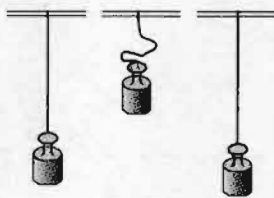


图 16-30

注意

- (1) 细线的强度, 砝码的质量大小、抬高的高度应经过反复试验后确定。
- (2) 支承架要牢固。

方法三

目的 说明如果作用时间较长, 即使是较小的力也能产生较大的冲量; 如果作用时间很短, 即使是较大的力产生的冲量仍然不大。

器材 槽码钩 2 个, 滑轮, 细绳, 槽码, 坏试管, 铁架台等。

操作

- (1) 将滑轮固定在铁架台上, 跨过滑轮的细绳两端各挂一叠质量相同的槽码 (如图 16-31)。

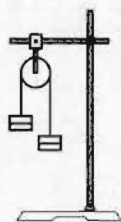


图 16-31

- (2) 将坏试管轻轻地放在任一侧的槽码上, 可看到系统慢慢地运动起来。这时虽然试管对槽码的作用力不大 (约等于试管的重力), 但由于作用时间较长, 仍能使系统的动量发生明显的变化。

- (3) 取下试管, 使两侧槽码恢复原样。手持试管后端用其前端迅速打击一下任一侧的槽码。可看到试管前端被击碎, 而系统几乎不动。这时虽然试管对槽码的作用力很大 (从试管被击碎可证实), 但因作用时间很短, 系统的动量未能发生明显的变化。

注意 槽码的质量大小应与试管的重力相配合, 太大了, 操作 (2) 不易运动; 太小了, 操作 (3) 试管不易破碎。

(摘自《中学物理实验大全》, 杨介信、张大同主编, 上海教育出版社, 1995 年)

3. 硬币碰撞

用碰撞实验验证动量守恒定律, 关键在于如何间接测出碰撞前后的速度。如果让质量为 m 的硬币在水平玻璃板上滑动, 初速度为 v_0 , 由于摩擦力 F_f 的作用, 经过 l 距离后停止下来。

$$F_f l = \frac{1}{2} m v_0^2$$

又 $F_f = \mu mg$, 所以 $\mu g l = \frac{1}{2} v_0^2$, 即 $v_0 = \sqrt{2\mu g l}$ 。当 μmg 恒定时, v_0 正比于 $\sqrt{l}$, 若取 $l = 1 \text{ cm}$ 时

的速度为单位,那么速度在数值上就等于 $\sqrt{l}$ (l 以厘米为单位),因此,可通过测量在摩擦力作用下前进的距离来表示速度的大小,这是下面实验的出发点。

所需的器材如下:玻璃台面,硬币(贰分2枚,壹分1枚),硬币发射架,直尺等。

硬币发射架的结构如图16-32所示,由底板、支架和打击杆组成。底板上开有一槽,槽宽略大于贰分硬币的直径。

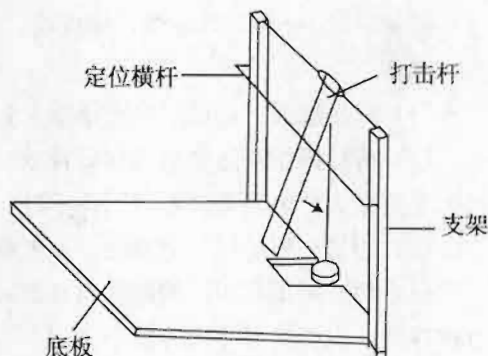


图 16-32

实验 1: 正碰实验

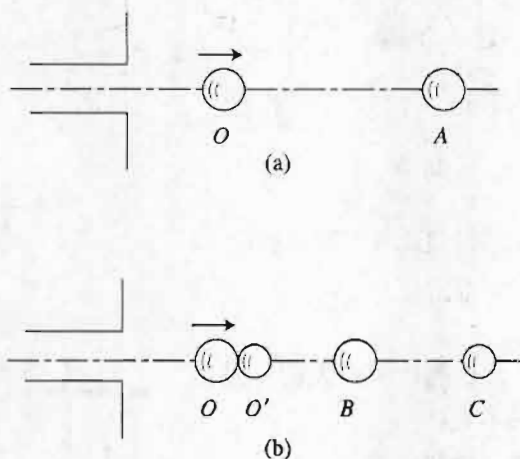


图 16-33

(1) 把硬币发射架放在玻璃台板上,在槽口外中心线上放一枚贰分硬币,再把一枚贰分硬币放入槽口,将打击杆偏离平衡位置靠在支架的定位横杆上,释放打击杆将硬币发射出去。正碰以后两硬币的速度发生交换,即原来运动的静止了,原来静止的运动了。

(2) 将贰分硬币放入发射槽口,释放打击杆,重复多次测出硬币中心从槽口外O点到静止点的距离平均值 $\overline{OA}$,如图16-33(a)所示。再把一枚壹分硬币放在O点前,使其圆心 O' 在发射线上,且 $OO'=R+r$ (R 、 r 分别为大小硬币的半径)。然后重新发射贰分硬币,碰撞后分别测出

两硬币前进的距离 $\overline{OB}$ 和 $\overline{OC}$,如图16-33(b)所示。已知贰分硬币的质量 $m_1=1.10\text{ g}$,壹分硬币的质量 $m_2=0.65\text{ g}$,则碰撞前系统的动量

$$m_1 v_1 = m_1 \sqrt{\overline{OA}}$$

碰撞后系统的动量

$$m_1 v_1' + m_2 v_2' = m_1 \sqrt{\overline{OB}} + m_2 \sqrt{\overline{OC}}$$

将测出的数值代入上两式中,即可验证是否满足动量守恒定律。

(3) 若取两枚贰分硬币作为发射和被碰物体,在它们的边缘上涂少许糨糊或乳胶,然后让它们发生正碰,碰撞后两硬币粘合在一起,测量的结果将近似满足 $\overline{OA}=4\overline{OB}$ 。

实验 2: 斜碰实验

取两枚贰分硬币实验,首先与上述方法相似测出 $\overline{OA}$,然后把另一枚硬币放在 O' 点,使 $OO'=2R$,且略偏于发射线。重新发射测出两硬币斜碰后静止的位置 C 、 B ,然后在 OB 线上截取 $OM=\sqrt{\overline{OB}}$,在 OC 线上截取 $ON=\sqrt{\overline{OC}}$,以 OM 和 ON 为边作平行四边形,如果满足动量守恒定律,则平行四边形的对角线 OP 与 $\sqrt{\overline{OA}}$ 相等,且重合在一条线上,如图16-34。

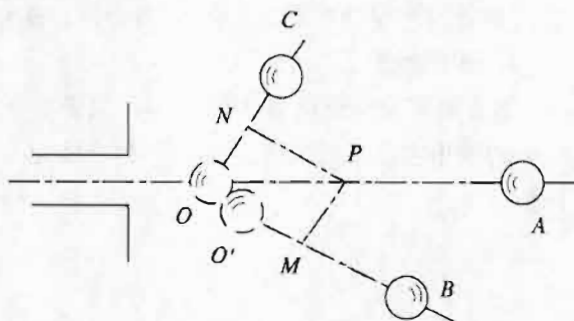


图 16-34

如果没有发射架,可以用两根塑料直尺平行地放在玻璃台板上,使其间距等于贰分硬币的直径。把硬币放在两尺之间,用手指或铅笔弹击硬币,与另一贰分硬币发生斜碰以后,测出 $O'B$ 和 OC , 以 O 点为一顶点,沿它们飞行的方向分别取 $\sqrt{O'B}$ 和 $\sqrt{OC}$ 为边长作平行四边形,其对角线应在发射线上。

4. 估测玩具枪子弹的出口速度

取一只乒乓球,在球上挖一个圆孔,向球内填一些橡皮泥或软泡沫塑料,测出球的质量 m_1 。然后将球像图 16-35 所示的那样,放在桌子的边缘处,再将玩具枪装弹上弦,支在桌面上,水平瞄准球的圆孔。扣动扳机后,子弹射入孔中,与球一同水平抛出。测出它们平抛的射程 l 和桌面距地面的高度 h 。

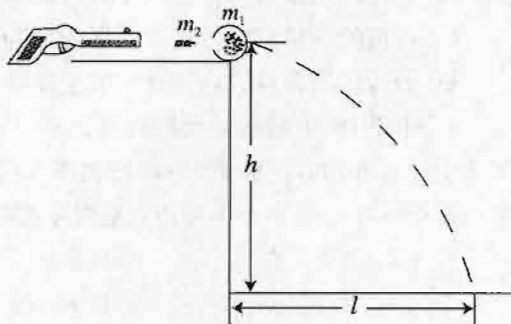


图 16-35

设子弹的质量为 m_2 , 出射时的速度为 v , 子弹射入球中后子弹和球的速度为 v' , 根据子弹与球非弹性碰撞的动量守恒定律,可列出方程

$$m_2 v = (m_1 + m_2) v'$$

又根据抛体运动规律

$$l = v' t, h = \frac{1}{2} g t^2$$

$$v' = \frac{l}{t} = \frac{l \sqrt{2gh}}{2h}$$

将 $v' = \frac{l \sqrt{2gh}}{2h}$ 代入第一式,可得

$$v = \frac{(m_1 + m_2) l \sqrt{2gh}}{2m_2 h}$$

请根据上述实验原理,测一测玩具枪子弹的出口速度,并与用直接平抛法测出的速度进行比较,分析两者不相等的主要原因在哪里。

五、补充习题

A 组

- 下列运动过程中,在任意相等时间内,物体的动量变化量相等的是 ()
 - 匀速圆周运动
 - 竖直上抛运动
 - 平抛运动
 - 任意的匀变速直线运动
- 在一平直公路上发生一起交通事故,质量为 1 500 kg 的小轿车迎面撞上了一质量为 3 000 kg 的向北行驶的卡车,碰后两车相接在一起向南滑行了一小段距离而停止。据测速仪测定,碰撞前小轿车的时速为 72 km/h,由此可知卡车碰前的速率 ()
 - 小于 10 m/s
 - 大于 10 m/s, 小于 20 m/s
 - 大于 20 m/s, 小于 30 m/s
 - 大于 30 m/s, 小于 40 m/s

3. 有一种气功表演, 表演者平卧地面, 将一大石板置于他的身上, 另一人将重锤举到高处并砸向石板, 石板被砸碎, 而表演者却安然无恙。假设重锤与石板撞击后二者具有相同的速度, 表演者在表演时要尽量挑选质量较大的石板。对这一现象, 下列说法中正确的是 ()

- A. 重锤在与石板撞击过程中, 重锤与石板的总机械能守恒
- B. 石板的质量越大, 它获得的动量就越小
- C. 石板的质量越大, 它所受到的打击力就越小
- D. 石板的质量越大, 它获得的速度越小

4. 如图 16-36 所示, 车厢长度为 l , 质量为 m_1 , 静止于光滑的水平面上。车厢内有一质量为 m_2 的物体以初速度 v_0 向右运动, 与车厢来回碰撞 n 次后静止于车厢内, 这时车厢的速度为 ()

- A. v_0 , 水平向右
- B. 0
- C. $m_2 v_0 / (m_1 + m_2)$
- D. $m_2 v_0 / (m_1 - m_2)$

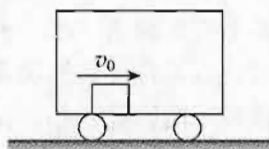


图 16-36

5. 某人站在静止于光滑水平面上的平板车上。若人从车头走向车尾, 人和车的运动情况为 ()

- A. 人匀速走动, 则车匀速前进, 人和车对地位移大小与质量成反比
- B. 人匀加速走动, 车匀加速前进, 两者对地加速度大小相等
- C. 不管人如何走, 任意时刻人和车动量总相同
- D. 人停止走动时, 车的速度不一定为 0

6. 载着人的气球静止悬浮在空中, 人的质量和气球 (包括设备) 的质量分别为 60 kg 和 300 kg。气球离地面的高度为 20 m, 为使人能安全着地, 气球上悬挂的软梯长度至少需要 _____ m。

7. 一炮艇在湖面上匀速行驶, 突然从艇头和艇尾同时向前和向后发射一发炮弹, 设两炮弹质量相等, 相对地面的速率也相同, 炮艇所受的牵引力和阻力均不变, 则炮艇的速度将 _____ (填“增大”“减小”或“不变”)。

8. 如图 16-37 所示, 质量为 m_1 的木块位于光滑水平面上, 在木块与墙之间用轻质弹簧连接, 当木块静止时刚好位于 A 点。现有一质量为 m_2 的子弹以水平速度 v_0 射向木块并嵌入其中, 则当木块回到 A 点时速度是多少? 在此过程中墙对弹簧的冲量是多少?

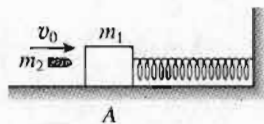


图 16-37

9. 质量为 m 的物块 A 上固定一轻质弹簧, 以 $v_1 = 3$ m/s 的速度在光滑水平面上运动, 另一质量也为 m 的物块 B 以 $v_2 = 4$ m/s 的速度与 A 相向运动, 如图 16-38 所示。则两物块相距最近时, 它们的速度分别是多少?

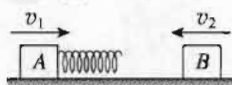


图 16-38

10. 如图 16-39 所示, 放在光滑水平地面上并靠在一起的物体 A、B 之间用一根长 1 m 的轻绳相连 (图中未画出), 两物体的质量分别为 $m_A = 4$ kg, $m_B = 6$ kg。现用大小为 8 N 的水平力 F 拉物体 A, 再带动 B 一起运动, 则 4 s 末两物体一起运动的速度为多少?

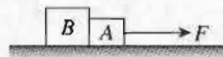


图 16-39

11. 设机枪子弹的质量为 50 g, 以 $v = 1.0 \times 10^3$ m/s 的速度从枪膛射出, 且每分钟连续发射子弹 120 颗, 则在射击时机枪手需用多大的力抵住机枪?

12. 质量为 $m = 4.0$ kg 的平板小车静止在光滑水平面上, 如图 16-40 所示。当 $t = 0$ 时, 两个质量分别为 $m_A = 2.0$ kg、 $m_B = 1.0$ kg 的小物块

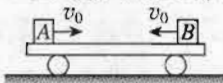


图 16-40

A、B 都以 $v_0 = 7.0 \text{ m/s}$ 、方向相反的水平速度，同时从小车板面上的左右两端滑上小车相向滑动。当它们在小车上停止滑动时没有相碰，A、B 与小车之间的动摩擦因数 $\mu = 0.2$ ，取 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。求：

(1) A 在小车上刚停止滑动时，A 和小车的速度大小；

(2) A、B 在小车上都停止滑动时，小车的速度及此时小车运动的时间。

13. 一质量为 $m_1 = 60 \text{ kg}$ 的人拿着一个质量为 $m_2 = 10 \text{ kg}$ 的铅球站在一质量为 $m_3 = 30 \text{ kg}$ 的平板车上，车正以 $v_0 = 3 \text{ m/s}$ 的速度在光滑水平面上运动（人相对车不动）。现人把铅球以相对车的速度 $u = 2 \text{ m/s}$ 向后水平抛出，车速增加了多少？

14. 一个长为 l ，质量为 m_1 的木板静止在光滑的水平面上，如图 16-41 所示。木板左端静止着一个质量为 m_2 的木块（可视为质点），木块与木板之间的动摩擦因数为 μ ，一颗质量为 m_0 、速度为 v_0 的子弹水平击中木块后随木块一起在木板上滑动。问：木板的长度 l 至少应为多少，木块才不至于从木板上滑出？



图 16-41

B 组

1. 三个相同的木块 A、B、C 从同一高度自由下落。其中，木块 A 在开始下落的瞬间被水平飞行的子弹击中，木块 B 在下落到一半高度时被水平飞来的子弹击中，子弹均留在木块中，则三木块下落的时间 t_A 、 t_B 、 t_C 的大小关系是（ ）

A. $t_A = t_B = t_C$

B. $t_A = t_C < t_B$

C. $t_A = t_B > t_C$

D. $t_A > t_B > t_C$

2. 两个质量、大小完全相同的正方体木块 A、B 靠在一起放在光滑水平面上，一水平射来的子弹先后穿透两木块后飞出。若木块对子弹的阻力恒定不变，子弹射穿两木块的时间相同，则 A、B 两木块被子弹射穿后的速度之比为（ ）

A. 1 : 1

B. 1 : 2

C. 1 : 3

D. 1 : $\sqrt{3}$

3. 在光滑水平桌面上有两个相同的弹性小球 A、B 质量都为 m ，现 B 球静止，A 球向 B 球运动，发生正碰。已知碰撞过程中总机械能守恒，两球压缩最紧时的弹性势能为 E_p ，则碰前 A 球的速度等于（ ）

A. $\sqrt{\frac{E_p}{m}}$

B. $\sqrt{\frac{2E_p}{m}}$

C. $2\sqrt{\frac{E_p}{m}}$

D. $2\sqrt{\frac{2E_p}{m}}$

4. 质量相等的 5 个物块在光滑水平面上间隔一定距离排成一直线。如图 16-42 所示，具有初动能 E_0 的物块 1 向其他 4 个静止物块运动，依次发生碰撞，每次碰撞后不再分开。最后，5 个物块粘成一体，这个整体的动能等于（ ）



图 16-42

A. E_0

B. $\frac{4}{5}E_0$

C. $\frac{1}{5}E_0$

D. $\frac{1}{25}E_0$

5. 有两个质量分别为 m_1 、 m_2 的星体，它们在同一个平面内绕同一点 O 做匀速圆周运动，轨道半径分别为 r_1 和 r_2 ，线速度大小分别为 v_1 和 v_2 ，如图 16-43 所示。若它们的相对位置始终保持不变，其他天体的影响可忽略不计，则 m_1 _____ m_2 ， v_1 _____ v_2 。（填“大于”“小于”或“等于”）

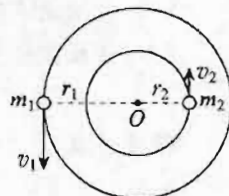


图 16-43

6. 如图 16-44 所示, 有两个物体 A、B 紧靠着放在光滑水平桌面上, A 的质量为 2 kg, B 的质量为 3 kg, 有一颗质量为 100 g 的子弹以 800 m/s 的水平速度射入 A, 经过 0.01 s 又射入物体 B, 最后停在 B 中。A 对子弹的阻力为 3×10^3 N, 求 A、B 最终的速度。

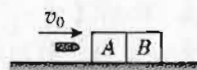


图 16-44

7. 高压采煤水枪出水口的横截面积为 S , 水的射速为 v , 水柱水平垂直地射到煤层后, 速度变为 0。若水的密度为 ρ , 假定水柱截面不变, 则水对煤层的冲击力是多大?

8. 在光滑的水平轨道上放置一门质量为 m_1 的旧式炮车, 炮弹的质量为 m_2 。当炮杆与水平方向成 θ 角发射炮弹时, 炮弹相对炮口的速度为 v_0 , 试求炮车后退的速度为多大。

9. 一人站在静止于光滑平直轨道的平板车上, 人和车的总质量为 m_1 。现在让此人双手各握一个质量均为 m_2 的铅球, 以两种不同的方式顺着轨道方向水平抛出铅球。第一次是一个一个地投, 第二次是两个一起投。设每次投掷时铅球相对车的速度相同, 则这两种投掷方式小车的末速度之比为多少?

10. 如图 16-45 所示, 固定在轻质弹簧两端质量分别是 $m_1=0.5$ kg、 $m_2=1.49$ kg 的两个物体置于光滑水平面上, m_1 靠在光滑竖直墙上。现有一颗 $m=0.01$ kg 的子弹水平射入 m_2 中, 使弹簧压缩而具有 12 J 的弹性势能, 然后 m_1 和 m_2 都将向右运动。试求:

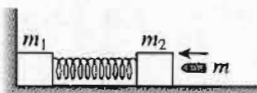


图 16-45

- (1) 子弹入射前的速度;
- (2) 竖直墙对 m_1 的冲量;
- (3) 运动过程中弹簧可能具有的最大弹性势能。

11. 如图 16-46 所示, A 为有光滑曲面的固定轨道, 轨道底端的切线方向是水平的。质量 $m_1=40$ kg 的小车 B 静止于轨道右侧, 其上表面与轨道底端在同一水平面上。一个质量 $m_2=20$ kg 的物体 C 以 2.0 m/s 的初速度从轨道顶端滑下, 冲上小车 B 后经过一段时间与小车相对静止并一起运动。若轨道顶端与底端的高度差 $h=1.6$ m, 物体与小车板面间的动摩擦因数 $\mu=0.40$, 小车与水平面间的摩擦忽略不计。取 $g=10$ m/s², 求:

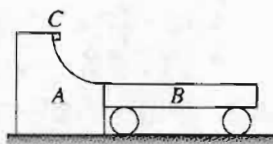


图 16-46

- (1) 物体与小车保持相对静止时的速度 v ;
- (2) 物体冲上小车后, 与小车发生相对滑动经历的时间 t ;
- (3) 物体在小车上相对滑动的距离 l 。

12. 如图 16-47 所示, 有一内表面光滑的金属盒, 底面长为 $L=1.2$ m, 质量为 $m_1=1.0$ kg, 放在水平面上, 与水平面间的动摩擦因数为 $\mu=0.20$ 。在盒内最右端放一半径为 $r=0.10$ m 的光滑金属球, 质量为 $m_2=1.0$ kg。现在盒的左端给盒施加一个水平冲量 $I=3.0$ N·s。若盒壁厚度、球与盒发生碰撞的时间和碰撞时的能量损失均忽略不计, g 取 10 m/s², 求:

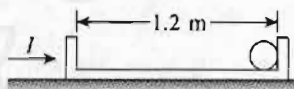


图 16-47

- (1) 金属盒能在地面上运动多远?
- (2) 金属盒从开始运动到最后静止所经历的时间多长?

参考答案

A 组

1. B、C、D 2. A 3. D 4. C 5. A 6. 24 7. 增大

8. 木块和子弹回到 A 点时的速度大小等于子弹打入木块瞬间的速度大小。设 v_0 方向为正方向, 由动量守恒定律有 $m_2 v_0 = (m_1 + m_2) v$, 解得 $v = \frac{m_2 v_0}{m_1 + m_2}$ 。

所以, 木块回到 A 点时速度大小为 $\frac{m_2 v_0}{m_1 + m_2}$, 方向与 v_0 方向相反。

木块和子弹的动量变化量 $\Delta p = -m_2 v_0 - m_2 v_0 = -2m_2 v_0$ 。由动量定理知, 这个动量的变化是弹簧对木块和子弹的冲量引起的, $I = \Delta p = -2m_2 v_0$, 而弹簧的动量大小未变化, 故墙壁对弹簧的冲量大小也为 $2m_2 v_0$, 方向与 v_0 方向相反。

9. A、B 两物块在弹簧压缩过程中, 动量守恒, 且弹簧压缩至最短时 A、B 相距最近, 此时它们的速度相等, 设为 v 。设 A 的初速度 v_1 方向为正方向, 由动量守恒定律有 $mv_1 - mv_2 = 2mv$ 。代入数据解得 $v = -0.5 \text{ m/s}$, 负号表示方向与 A 的初速度方向相反。

10. 以 A、B 为研究对象, 初状态动量 $p_1 = 0$; 设 A、B 一起运动时的速度为 v , 则末状态动量 $p_2 = (m_A + m_B) v$ 。取外力 F 方向为正方向, 由动量定理有 $Ft = (m_A + m_B) v$ 。解得 $v = \frac{Ft}{m_A + m_B} = \frac{8 \times 4}{4 + 6} \text{ m/s} = 3.2 \text{ m/s}$ 。

11. 设每颗子弹质量为 m_0 , 每秒发射子弹 n 颗, Δt 时间里发射的子弹质量为 $\Delta m = m_0 n \Delta t$, 机枪对子弹的冲量为 $F \Delta t$ 。根据动量定理有 $F \Delta t = \Delta m \cdot v = m_0 n \Delta t \cdot v$, 即 $F = m_0 n v = 100 \text{ N}$ 。根据牛顿第三定律, 子弹对机枪的冲力大小也为 100 N , 机枪手也需要这么大的力才能抵住机枪。

12. (1) 当 A、B 都在车上滑行时, 在水平方向上 A 受到向左的摩擦力 $F_1 = \mu m_A g$ 而做减速运动, 加速度 $a_A = \mu g$; B 受到向右的摩擦力 $F_2 = \mu m_B g$ 而做减速运动, 加速度 $a_B = \mu g$; 小车受到向右的摩擦力 $F_3 = \mu(m_A + m_B)g$ 而做加速运动, 加速度 $a_{\text{车}} = \frac{\mu(m_A + m_B)g}{m}$ 。

所以首先是 A 物块减速到与小车速度相等, 设用时 t_1 , 其速度大小为 v_1 , 则 $v_1 = v_0 - a_A t_1$, $v_1 = a_{\text{车}} t_1$ 。联立求解得 $v_1 = 1.4 \text{ m/s}$, $t_1 = 2.8 \text{ s}$ 。

(2) 根据动量守恒定律有, $m_A v_0 - m_B v_0 = (m + m_A + m_B) v$, 解得 $v = 1.0 \text{ m/s}$ 。

当物块与小车速度相同时, 物块与小车之间将不会发生相对滑动, 设经过时间 t 小物块 A、B 与小车速度相同, 则 $-v = v_0 - a_B t$, 解得 $t = 4.0 \text{ s}$ 。所以 A、B 在小车上停止滑动时, 小车的运动时间为 4.0 s 。

13. 人、车和球组成的系统动量守恒, 以车原来的运动方向为正方向, 由动量守恒定律有

$$(m_1 + m_2 + m_3) v_0 = (m_1 + m_3) (v_0 + \Delta v) + m_2 (v_0 + \Delta v - u)$$

$$\text{解得 } \Delta v = \frac{m_2 u}{m_1 + m_2 + m_3} = \frac{10 \times 2}{100} \text{ m/s} = 0.2 \text{ m/s}。$$

平板车的速度增加了 0.2 m/s , 仍沿原运动方向运动。

14. 子弹击中木块后的瞬间, 共同速度为 v_1 , 该过程动量近似守恒, 有 $m_0 v_0 = (m_0 + m_2) v_1$ 。这以后木块在木板上滑行, 子弹、木块及木板组成的系统动量守恒。设最后的共同速度为 v_2 , 有 $(m_0 + m_2) v_1 = (m_0 + m_1 + m_2) v_2$ 。由这两式可得 $v_1 = \frac{m_0 v_0}{m_0 + m_2}$, $v_2 = \frac{m_0 v_0}{m_0 + m_1 + m_2}$ 。

在此过程中, 木块和子弹做匀减速运动, 加速度大小 $a_1 = \frac{F}{m_0 + m_2} = \mu g$; 木板做匀加速运动, 加速度大小 $a_2 = \frac{F}{m_1} = \frac{\mu(m_0 + m_2)g}{m_1}$ 。到三者相对静止时, 木块位移 s_1 , 木板位移 s_2 , $s_1 = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2a_1}$, $s_2 = \frac{v_2^2}{2a_2}$, 且 $s_1 - s_2 = l$ 。

由前面各式可得 $l = \frac{m_1 m_0^2 v_0^2}{2(m_0 + m_2)^2 (m_0 + m_1 + m_2) \mu g}$ 。

B 组

1. B 2. C 3. C 4. C 5. 小于; 大于

6. 设 A、B 的质量分别为 m_A 、 m_B ，子弹的质量为 m ，子弹离开 A 时的速度为 v ，物体 A、B 的最终速度分别为 v_A 、 v_B 。在子弹射穿 A 的过程中，以 A、B 整体为研究对象，以子弹初速度方向为正方向，应用动量定理有 $Ft = (m_A + m_B)v_{共}$ 。解得 $v_{共} = 6 \text{ m/s}$ ，即为 A 的最终速度 v_A 。

对子弹、A 和 B 组成的系统，应用动量守恒定律有 $mv_0 = m_A v_A + (m + m_B)v_B$ 。代入数据解得， $v_B = 21.94 \text{ m/s}$ 。物体 A、B 的最终速度分别为 $v_A = 6 \text{ m/s}$ 、 $v_B = 21.94 \text{ m/s}$ 。

7. 设 t 时间内有 V 体积的水打在煤层上，则这些水的质量为 $m = \rho V = \rho Svt$ 。以这部分水为研究对象，它受到煤层的作用力为 F ，由动量定理有 $Ft = mv$ ，即 $F = \frac{mv}{t} = \rho S v^2$ 。由牛顿第三定律知，水对煤层的冲击力大小也为 $\rho S v^2$ 。

8. 炮车与炮弹系统水平方向动量守恒，设炮弹出膛时，炮车后退速度为 v ，则水平方向炮弹相对地面的速度为 $v_0 \cos \theta - v$ ，系统原来的总动量为 0，所以 $0 = m_2(v_0 \cos \theta - v) - m_1 v$ 。解得 $v = \frac{m_2 v_0 \cos \theta}{m_1 + m_2}$ 。

9. 人、铅球、车组成的系统所受合外力为 0，系统的动量守恒。设铅球相对车的速度为 v_0 。

第一种情况，一个一个地投掷时，有两个作用过程。投第一个球时，有 $0 = (m_1 + m_2)v - m_2(v_0 - v)$ ，投第二个球时，有 $(m_1 + m_2)v = m_1 v_1 - m_2(v_0 - v_1)$ 。解得 $v_1 = \frac{(2m_1 + 3m_2)m_2 v_0}{(m_1 + m_2)(m_1 + 2m_2)}$ 。

第二种情况，两个球一起投掷时 $0 = m_1 v_2 - 2m_2(v_0 - v_2)$ ，解得 $v_2 = \frac{2m_2 v_0}{m_1 + 2m_2}$ 。

所以 $\frac{v_1}{v_2} = \frac{2m_1 + 3m_2}{2(m_1 + m_2)}$ 。

10. (1) 子弹射入 m_2 时，弹簧还没有来得及压缩，根据动量守恒有 $mv = (m + m_2)v_1$ 。弹簧压缩后根据机械能守恒，有 $\frac{1}{2}(m + m_2)v_1^2 = E_p$ 。解得， $v = \frac{(m + m_2)v_1}{m} = \frac{m + m_2}{m} \sqrt{\frac{2E_p}{m + m_2}} = 600 \text{ m/s}$ 。

(2) $I = 2(m + m_2)v_1 = 12 \text{ N} \cdot \text{s}$ ，方向水平向右。

(3) 运动过程中，弹簧弹性势能最大时为三者速度相同时，有 $(m + m_1 + m_2)v_2 = (m + m_2)v_1$ ，则 $v_2 = \frac{m + m_2}{m + m_1 + m_2}v_1 = 3.0 \text{ m/s}$ 。解得 $E'_p = E_p - \frac{1}{2}(m + m_1 + m_2)v_2^2 = 3 \text{ J}$ 。

11. (1) 下滑过程机械能守恒，有 $m_2 gh + \frac{1}{2}m_2 v_1^2 = 0 + \frac{1}{2}m_2 v_2^2$ 。物体相对小车板面滑动过程动量守恒， $m_2 v_2 = (m_1 + m_2)v$ 。联立解得 $v = \frac{m_2 v_2}{m_1 + m_2} = 2.0 \text{ m/s}$ 。

(2) 对小车由动量定理有 $\mu m_2 gt = m_1 v$ ，解得 $t = \frac{m_1 v}{\mu m_2 g} = 1.0 \text{ s}$ 。

(3) 对物体与小车组成的系统, 由能量守恒有 $\mu m_2 g l = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 - \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v^2$ 。代入数据, 解得 $l = 3.0 \text{ m}$ 。

12. (1) 由于冲量作用, 使 m_1 获得的速度为 $v = \frac{I}{m_1} = 3.0 \text{ m/s}$ 。金属盒所受的摩擦力为 $F = \mu(m_1 + m_2)g = 4.0 \text{ N}$ 。

由于不计碰撞的能量损失, 且最终均静止, 由动能定理有 $-Fs = 0 - \frac{1}{2} m_1 v^2$ 。代入数据, 解得 $s = 1.125 \text{ m}$ 。

(2) 当金属盒前进 $s_1 = 1.0 \text{ m}$ 时与球发生碰撞。设碰前盒的速度为 v_1 , 碰后速度为 v'_1 , 碰后球的速度为 v_2 。在碰前对盒由动能定理得 $-Fs_1 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 - \frac{1}{2} m_1 v^2$, 解得 $v_1 = 1.0 \text{ m/s}$ 。由于碰撞过程动量、机械能均守恒, 有 $m_1 v_1 = m_1 v'_1 + m_2 v_2$, $\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 v'^2_1 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2$ 。解得 $v'_1 = 0$, $v_2 = 1.0 \text{ m/s}$ 。

当球前进 1.0 m 时与盒发生第二次碰撞, 碰前球的速度为 1.0 m/s , 盒的速度为 0 , 碰后球的速度为 0 , 盒子的速度变为 $v'_2 = 1.0 \text{ m/s}$ 。

以金属盒为研究对象, 由动能定理有 $-Fs_2 = 0 - \frac{1}{2} m_1 v'^2_2$, 解得 $s_2 = 0.125 \text{ m}$ 。所以球与盒不会再碰撞。

设盒子前进 $s_1 = 1.0 \text{ m}$ 所用时间为 t_1 , 前进 $s_2 = 0.125 \text{ m}$ 所用时间为 t_2 , 则有一 $Ft_1 = m_1 v_1 - m_1 v$ 和 $-Ft_2 = 0 - m_1 v'_2$ 。又 $v_1 = v'_2 = 1.0 \text{ m/s}$, 代入数据解得 $t_1 = 0.50 \text{ s}$, $t_2 = 0.25 \text{ s}$ 。在盒两次运动之间还有一段时间 t_3 , $t_3 = \frac{s_1}{v_2} = 1.0 \text{ s}$ 。所以金属盒从开始运动到最后静止所经历的时间为 $t = t_1 + t_2 + t_3 = 1.75 \text{ s}$ 。

人教版®

第十七章 波粒二象性

课程标准的要求

1. 了解微观世界中的量子化现象。比较宏观物体和微观粒子的能量变化特点。体会量子论的建立深化了人们对于物质世界的认识。
2. 通过实验了解光电效应。知道爱因斯坦光电效应方程以及意义。
3. 了解康普顿效应。
4. 根据实验说明光的波粒二象性。知道光是一种概率波。
5. 知道实物粒子具有波动性。知道电子云。初步了解不确定性关系。
6. 通过典型事例了解人类直接经验的局限性。体会人类对世界的探究是不断深入的。

一、本章教材概述

本章根据科学发展的历史脉络展现了人类认识微观粒子的波粒二象性的过程。

第一节通过黑体辐射的实验规律与经典电磁辐射理论的矛盾，引出普朗克的能量量子化假说。普朗克的能量量子化假说向人们揭示了微观世界物质客体运动的一个基本特征，并给出了微观客体能量量子化的最基本的规律 $E_n = nh\nu$ 。在此之前，人们都认为由宏观世界过渡到微观世界只不过是物理量的数量变化，而宏观现象所遵从的基本规律则一成不变地适用于微观领域。正是能量量子化第一次冲击了这种传统，成为物理学发展史上一个重大的转折点，具有深刻的意义。

由于把光看成是电磁波并运用经典电磁理论无法解释光电效应的实验规律，1905年爱因斯坦推广了普朗克假说，指出不仅谐振子的能量以及它的电磁辐射是量子化的，而且辐射场本身也是量子化的，即光本身是由不连续的能量单元所组成的能量流，每一份单元能量为 $h\nu$ ，称为光子。由此，光电效应的全部实验结果就可得到圆满解释。光电效应和此后的康普顿效应证实光子是基本粒子之一，具有质量、能量和动量等通常粒子所具有的一般属性。于是，从宏观角度看来，波在微观上也是量子化的，或者反过来说，光子也具有波动性。

1924年，德布罗意提出，电子等微观粒子也应具有波动性，波的频率 ν 和波长 λ 与粒子的能量 ϵ 和动量 p 一如光子和光波的关系，分别为 $\nu = \frac{\epsilon}{h}$ 和 $\lambda = \frac{h}{p}$ 。他的理论三年之后被实验证实。这就表明微观粒子具有波粒二象性，它是微观领域物质客体运动的又一特征，而波动性与粒子性相互联系的最基本规律表现为德布罗意给出的关系。而玻恩的概率波给出了光波和物质波的一个诠释。

微观粒子运动特征还表现为描述粒子的位置和动量不可能同时具有确定值，它们不确定度的乘积为

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}, \Delta y \Delta p_y \geq \frac{h}{4\pi}, \Delta z \Delta p_z \geq \frac{h}{4\pi}$$

这就是海森伯不确定关系。它直接表明微观粒子的运动不存在轨道，从而经典力学描述质点运动的方法失去意义。此外，它也意味着，在微观世界里谈论静止的粒子是没有意义的。因为粒子静止意味着动量为 0，且位置确定，而这是违背不确定关系的。

除了位置和动量的不确定关系之外，还有能量和时间的不确定关系

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

式中 Δt 是粒子处于某状态的时间（寿命）， ΔE 是该状态的能量不确定度。这也是与经典理论完全不同的。

在本章的编写中，还注意了以下问题：

1. 物理学的每一重大发现都改变着人类的自然观、科学观和思维方式

物理学不仅以其概念、原理和规律揭示了自然界中物质运动的诸多真理，而且还在建立这种知识体系的过程中，发展了科学思想方法，推动着科学的继续进步。除此之外，还应指出的是，它的知识和思想对人类活动的广阔领域都会产生影响，成为人类文化的重要组成部分，也就是说，它的每一次重大发现，都改变着人们的自然观、科学观和思维方式，成为人类思想和观念进步的伟大阶梯。

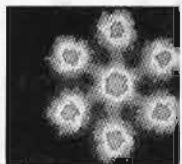
我们知道，场（引力场、电磁场）与物质经常相互作用着，因而它们在交换能量。但是长期以来，人们把这种能量交换过程想象成是连续的。例如，物体在热辐射，也就是辐射电磁波时，就把自己的一部分能量交给场，但它可以交出去稍微多一点，也可以稍微多一点或稍微少一点。就是说这个“稍微”可以随便多么小。另一方面，当物体吸收电磁波时，也同样可以从场中接收随便多少能量，就好像你可以随便从杯子里喝下多少水一样。这种交换能量的数量的连续性，用科学的语汇来说，就是可以任意分割的。在以往的物理学中，甚至在整个自然科学中，人们总认为能量具有连续的物理性质，也总是把物理过程想象成是连续的。

这条公理般的自然信仰，仿佛不需要证明，也从未被任何人证明过，但它又似乎是那样地深入人心。莱布尼兹曾经说过：“现在把未来抱在怀中，任何一个给定的状态只能用紧接在其前面的那个状态来解释……自然界不会突变。如果要对此提出疑问，那么世界将会出现许多间隙，这就迫使我们去乞求神灵来解释自然现象了。间断性同科学格格不入。”可是，在黑体辐射面前，普朗克做出了经典观念所不允许的事情，而实验证实他是正确的。科学深入到一个新的领域，在这里没有神灵的位置，有的只是一种新的思想，一种新的观念产生了。

1900 年，普朗克告诉人们，辐射的能量是一份一份地向外发出的。但是，事实上真的有什么量子吗？人们更多地认为，被某种未知的自然机制辐射出去的这一份一份的量子，立刻就融合进连续的量子流，即电磁场之中了。量子不过像落进大海中的水滴，它在那里立刻就失去了自身的独立性，失去了自身的空间位置和液滴形状。

1905 年，爱因斯坦告诉人们，辐射出去的量子是一种小的实体，它在空间中还保有自身的个性，光一份一份地发出，它事实上是以量子流的形式存在着，当它照射到金属上时，有可能激起电流。光电效应成了光量子的见证。

于是，普朗克的一份份辐射变成了爱因斯坦的光量子，电磁场的微粒特性被揭示了。当普



朗克为能量子假说领取诺贝尔奖时，他指出是爱因斯坦跨出了说明物质世界具有量子性质的真正一步。杰出的思想结出了科学进步的果实。随之导致了德布罗意实物粒子具有波动性的见解，并很快被实验所证实。

一种新的自然观，物质具有波粒二象性的认识树立起来了，物质要么是粒子，要么是波的观念被破除了。

鉴于海森伯的不确定关系，我们不可能准确地知道单个粒子的运动情况，因而在微观世界不再存在决定性的因果律。但是我们可以准确地知道大量粒子运动的统计行为，即在微观世界存在着统计性的因果律。

所有这些都深刻地改变着人们的思维方式，也包括人们对科学本身的认识。在经典物理学中，对于不同的宏观对象，我们分别建立了粒子模型和波动模型，并得出了它们的运动规律。粒子模型和波动模型都以我们的直接经验为基础。然而，对于微观对象的属性，我们缺少直接的感知。可是我们也要设想一些模型，以分析和研究它们的运动规律，微观粒子的波粒二象性就是这种模型。只是以我们的宏观经验来衡量，这种模型的行为显得十分古怪，以至于连爱因斯坦都说，古怪得让我们的想象力都力所不及。但是，只要基于这种模型建立的概念及理论与实验结果一致，它就能在一定范围内正确地代表我们所研究的现象。在这个意义上，海森伯曾说：“自然科学并不是自然界本身，它是人类和自然界关系的一部分。”

总之，通过装载经验的理论以及负荷理论的观察和实验，科学可以让人类领悟客观实在。这一信念以已有的科学成果为基础，也是一切未知科学的基础。

2. 像科学家那样去思考

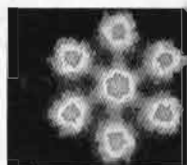
科学文化素质不仅指科学知识方面的素养，它还有更高的层次，就是科学方法、科学意识和科学精神。

知识是方法的基础，但这并不意味着知识可以自动地转化为方法。培根说过：“学问并不把它们本身的用途教给我们，如何运用这些学问乃是学问以外的、学问以上的一种智慧。”他所说的“学问”就是具体的知识，而“智慧”则是对科学方法的把握。物理学的重要概念是怎样形成和演变的？它的理论体系又是如何发展和完善起来的？这些历史的追问能使受教育者感悟物理学的发展是由一次次重大思想的突破和研究方法的进步所结晶出来的。这其中包含着对传统观念的一次次解脱和前辈科学家的独特思考与探索。引领学生从中接受科学思维和科学方法的熏陶，从科学嬗变的历史轨迹中，领悟科学探究的精髓，激发学习科学、探索未知的勇气与信心，是物理教学的“画龙点睛”之笔。

由于人们探求新光源以及工业上高温测量的需要，导致了黑体辐射的实验研究；经典物理理论难以解释其实验结果导致普朗克提出能量子的假说；以能量子假说和相关物理知识为基础的推理导致理论与实验结果的完满吻合，从而开启了物理学的新纪元。

光电效应实验规律与经典电磁理论的矛盾导致爱因斯坦提出光量子假说；基于光量子假说得出的光电效应方程圆满解释了光电效应并得到密立根实验的进一步支持，这就跨出了真正说明物质世界量子性的科学脚步。

在普朗克能量量子化和爱因斯坦光量子理论成功的基础上，德布罗意从类比和对称性思考的科学思想方法出发，提出：“整个世纪（指19世纪）以来，在光学上，与波动方面的研究相比，忽视了粒子方面的研究；而在实物粒子的研究上，是否发生了相反的错误呢？是不是我们把粒子方面的图像想得太多，而忽视了波的现象？”这导致人类对微观粒子波粒二象性的崭新认识，揭开了量子力学的帷幕。



所有这些不都鲜明地表明了科学探究的一般特征，展示了对传统观念的解脱以及重大科学思想的萌发与突破吗？

我们不可能使每一个中学生都具有科学家那样渊博高深的知识，但却可以引导他们像科学家那样去思考问题，增长一点科学创造的灵性与聪慧。

诺贝尔物理学奖获得者汤川秀树说：“对旧有知识的熟知和对新事物的敏感是一个人创造力的基础和源泉。”物理教学应该培育学生对新事物敏感的思维品质，鼓励他们敢于解脱传统观念，勇于提出新见解。假以时日，也许就可以改变学生习惯于墨守成规，批判与创新意识淡薄的状况。

课时安排建议

第1节	能量量子化	1学时
第2节	光的粒子性	2学时
第3节	粒子的波动性	1学时
第4节	概率波	1学时
第5节	不确定性关系	1学时

二、教材分析与教学建议

第1节 能量量子化

1. 教学目标

- (1) 了解黑体辐射，感悟以实验为基础的科学探究方法。
- (2) 了解能量子的概念及提出的科学过程，领会这一科学突破过程中科学家的思想。
- (3) 通过观察热辐射的强度与波长的关系图象培养学生观察能力。
- (4) 了解宏观物体和微观粒子的能量变化特点，体会量子论的建立深化了人们对于物质世界的认识。

2. 教材分析与教学建议

本节由黑体与黑体辐射、黑体辐射的实验规律和能量子三部分内容组成。对黑体辐射的研究及由此引发的“紫外灾难”是19世纪末20世纪初物理学天空中的“第二朵乌云”，然而正是在拨开这“第二朵乌云”的过程中，物理学终于迎来了量子物理的曙光。

本节的重点是对黑体辐射能量在不同温度下与波长的关系的研究，难点是如何让学生理解能量量子化假说。教材着重介绍了在研究不同温度下黑体辐射强度与波长关系时，经典理论结果与实验事实之间产生的矛盾：维恩公式在短波区与实验几乎一致，而在长波区则偏离很大；瑞利公式在长波区与实验几乎一致，而在短波区出现了“紫外灾难”。为了解决此矛盾，德国物理学家普朗克认为黑体辐射的能量是不连续的，是能量子 ϵ 的整数倍关系，提出了能量量子

化观点。

对于这部分内容,教材是按物理学史的发展展开的,目的是使学生能从前辈大师的工作中体会科学探究的真实过程。教学中要注意引导学生感受科学家进行探究的科学方法与科学精神。

本节的知识线索:

冶金工业的发展及对恒星研究的需要促进了对黑体辐射问题的研究

↓
经典理论对黑体辐射实验规律的解释

↓
难以解决的矛盾(维恩公式在长波区,瑞利公式在短波区)

↓
普朗克能量子假设

↓
数学推理(黑体辐射的强度按波长分布的公式)

↓
与实验事实的对照

本节的知识对学生来说相关的经验较少,理解起来有一定困难。比如黑体辐射实验规律、为什么要研究黑体、黑体理想模型有什么用、为什么叫“紫外灾难”、“量子化”和“连续性”到底有什么差别等问题都是学生先前没有接触过的。本节教法建议在学生预习的基础上以教师的生动讲解为主,在讲解过程中作好知识铺垫,多设疑。

(1) 黑体与黑体辐射

教材“思考与讨论”是想让学生明确热辐射就在我们身边,学生可能回答会感到“热”,教师追问“热”是怎样传到人身上的,从而引出热辐射的概念。对于辐射的本质可让学生结合电磁学的知识和物质结构的知识讨论,认识到这是一种电磁波。

为了让学生理解热辐射强度与波长的关系,可以先复习物体的颜色与频率或波长的关系,让学生通过观察被加热铁块呈现暗红、赤红、橘红等颜色的照片想象出:一方面随温度的升高,辐射强度在增大,同时辐射电磁波的频率或波长也在变化。

对于黑体概念的引入,可以用设问的方式引导:有没有能完全吸收电磁波的物体?它是怎样吸收电磁波的?

通过教科书图 17.1-1 让学生思考:从小孔射入空腔的光能反射出来吗?能看清里边的情形吗?进而引入绝对黑体的概念。

教科书设计的用黑体概念解释生活现象的“思考与讨论”最好提前让学生观察,然后在课堂上交流、讨论。从远处看没有安装窗户的大楼时,一方面由于射入的光线反射出来的较少;另一方面由于人站得远,能够反射进入人眼的光线与外墙相比更少,所以即使墙已经粉刷,看起来也比外墙暗得多。

学生可能会问这样的问题:为什么要研究黑体呢?生活中有黑体吗?可以这样解答:因为一般物体的热辐射除了与物体的温度有关外,还与材料的种类、表面状况有关,而黑体辐射电磁波的强度按波长的分布只与黑体的温度有关;而且黑体材料在加热到同样温度时,发出的热辐射比其他物体强,因此黑体是用来建立热辐射定律的理想辐射体。为了理论研究的需要,基尔霍夫提出了绝对黑体的理想模型,从而促进了黑体辐射研究。在生活中烟煤是很接近理想黑体的材料。

(2) 黑体辐射的实验规律

重点培养学生观察图象并总结规律的能力,这个实验图象对学生来说难度较大,教师应作好学生观察这一图象的引导。



黑体辐射的实验规律

明确实验对象：教科书图 17.1-1 中的空腔，空腔加热后的辐射从小孔向外射出，小孔就成了不同温度下的黑体。利用分光技术和热电偶设备，就能测出它所辐射的电磁波强度按波长的分布情况。

引导观察：学生不容易看懂这个图，应提醒学生看懂横坐标和纵坐标所表示的物理量，从 1100 K 图线看起，图线的起伏说明了什么问题？说明在相同的加热温度下，黑体辐射的强度是变化的，但不与波长成正比，中间有一个峰值。

由图线可以看出辐射强度与温度有什么关系？不同的温度辐射强度不同，温度越高，各种波长的辐射强度都有增加。

辐射强度的极大值是怎样变化的？温度越高，辐射强度的极大值越大；辐射强度的极大值随温度升高向波长较短的方向移动。

关于“紫外灾难”，可向学生作进一步的说明：瑞利公式在长波区与实验基本一致，但在短波区与实验严重不符，不但不符，而且当波长趋于 0 时（紫外区），辐射强度竟变成无穷大，这显然是荒谬的。瑞利公式是完全根据经典物理学理论推出来的，其结果竟会导致荒谬的事实，这就是物理学上所称的“紫外灾难”。一种理论推出荒谬的结论，那说明这种理论可能存在某些缺陷，所以也可以说它是经典物理学理论上的灾难。“紫外灾难”一说是荷兰物理学家埃伦菲斯特提出的。

当用经典电磁理论无法解释黑体辐射实验规律时，伟大的科学家们怎么对待这个问题呢？

(3) 量子

这部分内容是本节精华之所在，应尽量让学生感受在科学的转折关头科学家是怎样思维的。

教学时建议先让学生通读教科书，然后让学生结合教科书上的例子及生活实例讨论他们心中的连续性和量子化有什么区别。学生只有对连续性和量子化有了认识之后才能认识到普朗克那句话：微观世界的某些规律，在我们宏观世界看来可能非常奇怪。

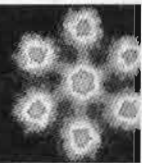
在讨论时教师可做如下引导：比如知道了一个箱子的体积，里面装满了苹果，如果我们用苹果的密度乘以箱子的体积（用连续性的观点处理），其重量会大于实际重量，我们只有把苹果想成量子化的，才能与实际吻合。又比如，人就是量子化的，不能说某个家庭有 2.2 个小孩，因为一个小孩就是一个基本单位；楼梯也是量子化的，一个人上楼梯，他可以一次上一阶、二阶或三阶，但他绝不可能上一阶半且定在那里。还可以让学生举例，让学生对量子化这一重要概念有所感悟。

关于普朗克提出量子观点的过程，教师可以结合物理学史的内容适当补充。要让学生明白普朗克为了解释实验现象做了多种尝试，进行了激烈的思想斗争。在所有这些尝试都失败后，他才提出了量子观点。让学生体会尝试的重要性，并树立失败并不可怕的思想。

3. 问题与练习

内容分析

第 1 题让学生了解“量子化”就在我们生活中，还可以让学生举更多的例子。



第2题通过计算让学生真切感受能量子有多大。

第3题与第2题可以结合起来解释,通过解释让学生知道宏观的连续性其实也是量子化的,只是由于人的感觉能力有限,感觉不到罢了。

解答与说明

1. D

2. 由 $\epsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$ 得

$$400 \text{ nm 电磁辐射的能量子 } \epsilon = h \frac{c}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{4 \times 10^{-7}} \text{ J} = 4.97 \times 10^{-19} \text{ J};$$

$$700 \text{ nm 电磁辐射的能量子 } \epsilon = h \frac{c}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{7 \times 10^{-7}} \text{ J} = 2.84 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

3. 开水向外辐射的每一份能量子能量很小(微量),而水降低 1°C 释放的能量很大(宏观量),由于温度计的精度不够,所以观察到的温度计温度不是一段一段地降低的。

第2节 光的粒子性

1. 教学目标

- (1) 了解光电效应及其实验规律,感受以实验为基础的科学研究方法。
- (2) 知道爱因斯坦光电效应方程及其意义,感受科学家在面对科学疑难时的创新精神。
- (3) 了解康普顿效应及其意义。

2. 教材分析与教学建议

本节知识由光电效应的实验规律、光电效应解释中的疑难、爱因斯坦的光电效应方程、康普顿效应和光子的动量五部分组成,内容较多,难度也较大,教材把这些内容放在一节里,是希望通过这一节的学习能让学生对光子有一个全面的认识。

本节知识也是本章的重点内容。光电效应和康普顿效应是认识光的粒子性的重要依据,爱因斯坦用量子思想对光电效应的解释是科学转折的重大信号,更多的科学家开始关注普朗克提出的量子观点,并开创了新的局面。

光电效应实验是本节的“根”,要创造条件做好实验。

教材的编写思路:

用经典的光的电磁理论来解释光电效应实验规律遇到了疑难

↓
爱因斯坦应用普朗克提出的量子观点提出了光子说,并成功地解释了光电效应,证明光具有粒子性

↓
康普顿效应进一步证实了光的粒子性,说明了光子既具有能量,还具有动量

教材将密立根实验安排为例题,其意图在于揭示密立根实验验证爱因斯坦光电效应方程正确性的思想方法,应注意发挥它的方法论价值。

(1) 光电效应的实验规律

对于这部分内容,教材是按历史的发展展开的,目的是使学生能从科学家的工作中感悟科学探究的精髓。与上一节的教学思路基本相同,从光电效应的实验规律出发,为正确解释该现象,提出光子假说,在此基础上推出理论方程,并得到实验的实证。具体来说,在教学上建

议沿这样的线索展开：



在这样一个科学探究的历史过程中，提出问题、猜想与假设、分析论证等要素十分突出，实验所起的作用也十分明显。做好演示实验，是教好与学好本节知识的前提。要创造条件做好实验，紫外线的强度应尽可能地强些，验电器的灵敏度尽可能地高些，实验前用吹风机吹干或烤干验电器。若不成功，可先使验电器带负电，使指针张开一个角度，然后用紫外线灯照射锌板，指针就迅速落下，表示锌板上的电子从表面飞出去了。再使验电器带正电，使它的指针张开大致相同的角度，用紫外线灯照射锌板时，指针并不立刻落下，表示正电荷不能从锌板表面飞出去。根据学校的条件，也可以把锌板换成光电管并改用可见光照射。

“光电效应的实验规律”的教学要突出实验规律的物理意义。首先利用教科书图 17.2-2，结合静电力做功的原理、光电效应的概念说明实验电路的工作原理。由于受实验器材精度的影响，该实验不易做成功，可结合教科书图 17.2-3 着重分析说明实验规律和饱和电流、遏止电压、截止频率等概念，为下一段教学打下基础。

教学片段

光电效应规律

提出问题：让学生讨论“在光的照射下锌板为什么会带电？”

分析论证：电子在原子外振动着，当光照射电子时，它吸收光子的能量，振动加剧，当这个能量足够大时，就会使电子逸出，从而发生光电效应现象。

介绍教科书 17.2-2 实验原理：当光照射到阴极 K 上时，有电子逸出，如果不加电压，电子逸出后向各个方向运动，有少部分电子会打在阳极 A 上，在电路中有微弱的电流产生。

怎样才能增大电流呢？先让学生提出方案。

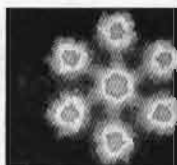
教师引导：增大电流可以有两种办法，其一是在两极上加电压（教科书图 17.2-2），因为在光照条件不变的情况下，更多的电子在静电力的作用下会运动到阳极，从而增大电流。另一种办法就是加大入射光照射的强度，这样会有更多的电子逸出并运动到阳极。

存在着饱和电流

问题导引：改变教科书图 17.2-2 中滑线变阻器的阻值就可以改变加在两个极板上的电压，随着电压的增大，电路中的电流会怎么变化呢？会无限增大吗？

引导分析：实验表明，在光照条件不变的情况下，随着所加电压的增大，光电流趋于一个饱和值。也就是说，在电流较小时电流随着电压的增大而增大；当电流增大到一定值之后，即使电压再增大，电流也不会增大了。

这说明，在一定的光照条件下，单位时间内阴极 K 发射的电子的数目是一定的，电压增



加到一定值时,所有光电子都被阳极A吸收,这时即使再增大电压,电流也不会增大。

实验还表明,在光的颜色(频率)不变的条件下,入射光越强,饱和电流越大。也就是说,对于一定颜色(频率)的光,入射光越强,单位时间内发射的光电子数越多。

存在着遏止电压

学生思考:如果A、K两极加的电压为0,电路中的电流为0吗?怎样才能使电路中的电流为0呢?

引导分析:如果阴极和阳极所加电压为0,仍然有电子运动到阳极上,电路中的电流并不为0。但如果将阳极接电源负极,阴极接电源正极,电子在减速电场的作用下就不能到达阳极,此时电路中的电流减为0。

使光电流减小到0的反向电压称为遏止电压。

问题导引:教科书中遏止电压的公式是用什么原理得出的?为什么要强调上限速度?

引导分析:由动能定理可以得到遏止电压的公式。由于电子射出的初速度不一样,要达到遏止的目的,就必须用上限速度。

引导观察:让学生认真观察教科书图17.2-3,任取其中一根图线结合横纵坐标说明该图象表达的物理意义,说明通过图线可以得到什么信息。

引导分析:该图的横坐标表示在阴极和阳极之间加的电压,在右侧加的是正向电压,即阳极A加正电压,阴极K上加负电压;在左侧加的反向电压,即阳极A加负电压,阴极K上加正电压。纵坐标表示电路中形成的光电流。图象表示电路中的光电流随所加电压的变化情况。

从该图线能读出如下信息:当电压为0时,电路中有光电流存在;加逐渐增大的反向电压后光电流会逐渐减小,加逐渐增大的正向电压后光电流会逐渐增大,但有一个饱和值;不同频率的光,遏止电压不同,同一种颜色的光有相同的遏止电压,与光的强弱无关,频率越大的光,遏止电压越大,这表明光电子的能量只与入射光的频率有关,而与入射光的强弱无关;光电流的大小与入射光的强弱有关,入射光越强光电流越大。

存在着遏止电压的实验事实可以让学生去推测:射出的光电子的能量与入射光的强度没有关系,只与其频率有关,进一步猜测说明电子不能连续地吸收能量。引发学生的认知冲突。

学生思考:在教科书图17.2-2的实验中,如果改用红光做实验(即减小入射光的频率),保持入射光的强度不变(或增大强度),对电路中的电流有影响吗?

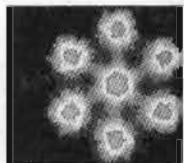
许多学生认为,只要有光照射光电管的阴极就会发出光电子,电路中就会有光电流。如果红光的强度不变,电流就不变;如果增大红光的入射强度,电子吸收到的能量越多,跑出来的动能也越大,电流会增大。

引导阅读:此时引导学生阅读教科书,让学生认识到他们根据经典理论推导的结果是错误的。当入射光的频率减小到某一数值时,即使不施加反向电压也没有光电流,这表明已经没有光电子了。这就是截止频率,当入射光的频率低于截止频率时不能发生光电效应。而且不同金属的截止频率不同。

引导阅读:让学生阅读几种金属的截止频率表,加深对截止频率的认识。

(2) 光电效应解释中的疑难

在“光电效应解释中的疑难”的教学中,最好提前铺垫能量连续性和积累效应的相关思想。如光照到金属表面会发热,其实是电子吸收能量后振动加强的反应,按经典理论,能量具



有积累效应，即只要光不间断地射来，电子吸收光的能量就会不断增加。可以让学生大胆猜测：如果光不断地照射，这些电子会怎样（可能跑出来）？为后面的教学铺好路。另外，要充分揭示经典电磁理论遇到的疑难以引起学生的注意。例如，可采用列表的方法将经典电磁理论应该得出的结论与实验现象的矛盾对应地展示出来，便于进行具体分析。

注意教材的说法“光的电磁理论只能部分地解释光电效应”，教学时最好引导学生讨论，看能不能用经典电磁理论解释，学生通过讨论认识到的确需要新思想、新观念、新理论。

(3) 爱因斯坦光电效应方程

“爱因斯坦的光电效应方程”的教学既是本节的重点，也是本章的重点。教学中要让学生理解爱因斯坦光量子假说的具体含义，也要明确爱因斯坦光量子假说与普朗克能量量子假说的区别。学生可能会认为爱因斯坦光量子假说只不过是普朗克能量量子观点的简单移用。应告诉学生这不是简单的移用，而是一种大踏步的进步：首先是他从思想上完全接受量子观点，而普朗克还在犹豫，甚至在退步；另外他发展了量子化观点，认为电磁波不仅在发射和吸收时是不连续的，而且电磁波本身就是不连续的，并提出了光子的概念。

在此基础上，引导学生对金属中一个电子应用能量守恒定律分析光电子的逸出过程，从而得出爱因斯坦光电效应方程，并阐述方程中各物理量的意义和单位，指导学生应用光电效应方程解释光电效应的实验规律。

教科书关于研究 U_c 与 ν 、 W_0 三者关系的“思考与讨论”，根据动能定理 $eU_c = E_k = \frac{1}{2}m_e v_c^2$ ，有 $eU_c = h\nu - W_0$ 。该思考题为密立根实验作了铺垫。

爱因斯坦光电效应方程的正确性是密立根实验证明的。通过例题的教学，要让学生理解密立根实验的科学方法。另外，该实验还能测出神秘的普朗克常量，具有重大意义。教学时应引导学生自己作图并求普朗克常量。

教材旁批对图线没有过原点作了说明，让学生领会这种数学方法。

本节第二个“思考与讨论”是为康普顿效应作准备的。在大气层内向四面看，到处都是亮的，这是由于大气尘埃将太阳光向四面八方散射的缘故。宇航员在大气层外飞行时，周围是真空，没有光进入人的眼睛，所以到处都是黑的；而星星是可以直接发光的物体，它发出的光能进入人眼，故能看见。

(4) 康普顿效应

康普顿效应是爱因斯坦的光量子说的又一重要例证。它同样为我们展示了科学家所进行的科学探究的过程。即：



在这样一个科学探究的过程中，提出问题、猜想与假设、分析论证等要素仍然十分突出，教学中同样应该引起足够的重视。

教科书图 17.2-5 应对照“动量守恒定律”一章的图 16.4-3 进行解释。

康普顿最成功的地方在于引入了光子也有动量的观点,将光的粒子学说完善了。对康普顿效应的解释有两种办法:一是定量解释,光子与晶体中电子碰撞时遵守能量守恒定律(电子的能量: $E=mc^2$) 和动量守恒定律(光子的动量: $p=\frac{h\nu}{c}$),联解方程求得 $\Delta\lambda$,理论与实验结果相符;二是定性解释,根据光子的动量表达式 $p=\frac{h\nu}{c}$,动量变小,波长变大。为降低难度可用第二种方法。教学中要引导学生了解以下观点:光电效应和康普顿效应都说明光子具有粒子性,光电效应表明光子具有能量,康普顿效应表明光子既有能量又有动量。了解这样的观点对学生理解电磁波的物质性是很必要的。我们知道,从初中物理学习磁场的时候开始,我们就告诉学生电磁场是一种物质。为什么电磁场是一种物质?它与通常理解的物质,例如水、石块有什么共性?这些都不涉及。所以,在此之前关于电磁场物质性的说法都只是停留在字面上,无法理解它的真正含义。如收音机能够收到电台的广播,这是因为电磁波在收音机的天线中激发了感应电流,所以我们说电磁波具有能量。康普顿效应要用动量守恒的关系来处理,表明电磁场不但具有能量而且具有动量。能量和动量是物质的最基本属性,这与流动的水和飞行的石块是一样的,因此我们断定,电磁场也是一种物质。

(5) 光子的动量

光子的动量公式可以用已学的理论推出来,教学中只要求了解,不要求计算,但要明确这里的质量是爱因斯坦相对论质量。

教材的旁批对能量表达式和动量表达式有提示作用,要让学生感受科学公式的对称美。

3. 问题与练习

内容分析

- 第1题了解光子的能量与光的亮度的区别。
- 第2题让学生理解光强和截止频率的关系。
- 第3题加深对不同金属逸出功的理解。
- 第4题练习用爱因斯坦光电效应方程解决问题。
- 第5题练习用爱因斯坦光电效应方程解决问题。
- 第6题加深对康普顿效应的理解。

解答与说明

1. 在可见光范围内,紫光的光子能量最大,因为其频率最高。但紫光不是最亮的,因为光的亮度由两个因素决定,一为光强,二为人眼的视觉灵敏度。在光强相同的前提下,由于人眼对可见光中心部位的黄绿色光感觉最灵敏,因此黄绿色光应最亮。

2. (1) 当入射光频率高于截止频率时,光强增加,发射的光电子数增多;当入射光频率低于截止频率时,无论光强怎么增加,都不会有光电子发射出来。

(2) 当入射光的频率高于截止频率时,入射光的频率增加,发射的光电子的最大初动能增大。

3. 紫光能产生光电效应,红光不能。因为不同的金属其逸出功不同,根据爱因斯坦光电效应方程,用紫光照射两种金属时,逸出金属表面的光电子的最大初动能不同,因此光电子的最大速度也就不同。

4. (1) 由爱因斯坦光电效应方程 $E_k=h\nu-W_0$ 可得

$$E_k = h \frac{c}{\lambda} - W_0 = \left(\frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{2 \times 10^{-7}} - 4.2 \times 1.6 \times 10^{-19} \right) \text{ J} = 3.23 \times 10^{-19} \text{ J} = 2.01 \text{ eV}$$

(2) 由 $eU_c = E_k$ 得遏止电压 $U_c = \frac{E_k}{e} = 2.01 \text{ V}$ 。

(3) 由 $W_0 = h\nu_0$ 得截止频率 $\nu_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{4.2 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} \text{ Hz} = 1.01 \times 10^{15} \text{ Hz}$ 。

5. 将教科书图 17.2-2 中电源的正负极对调, 当入射光频率分别为 ν_1 、 ν_2 时, 测出遏止电压 U_1 、 U_2 , 由爱因斯坦光电效应方程可得

$$eU_1 = h\nu_1 - W_0$$

$$eU_2 = h\nu_2 - W_0$$

联立上两式, 解得 $h = \frac{U_1 - U_2}{\nu_1 - \nu_2} e$ 。其中 e 为电子的电荷量, 测出 U_1 与 U_2 就可测出普朗克常量。

实验步骤:

(1) 将图 17.2-2 中电源的正负极对调, 滑动变阻器滑动触头滑至最左边, 用频率为 ν_1 的光照射, 此时电流表中有电流。将滑动变阻器滑动触头缓慢右滑, 同时观察电流表, 当电流表示数为 0 时, 停止滑动。记下电压表的示数 U_1 ;

(2) 用频率为 ν_2 的光照射, 重复 (1) 的操作, 记下电压表的示数 U_2 ;

(3) 应用 $h = \frac{U_1 - U_2}{\nu_1 - \nu_2} e$ 计算 h ;

(4) 多次测量取平均值。

6. 散射光子的频率变小。由光子与电子碰撞过程动量和能量守恒可知, 散射光子的能量变小, 所以, 散射光子的频率变小。

第 3 节 粒子的波动性

1. 教学目标

- (1) 通过实验分析, 了解光的波粒二象性的内容, 感受微观粒子运动的复杂性。
- (2) 知道实物粒子具有波动性, 领会对称性的研究方法, 感悟科学家的探求精神。
- (3) 通过对物质波的实验验证内容的学习, 感受实验研究这一重要的研究方法。
- (4) 通过对科学漫步的阅读, 感受科学的成就推动了技术的进步。

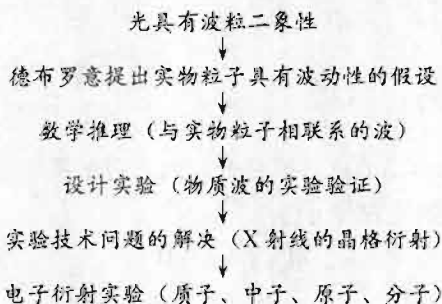
2. 教材分析与教学建议

本节教材通过对光的本性认识的历史过程的简单回顾, 引入光的波粒二象性理论, 并介绍了 1924 年德布罗意如何受到普朗克能量子和爱因斯坦光子理论的启发, 以类比的方法大胆提出实物粒子也具有波粒二象性的假设, 并提出德布罗意波的概念。实物粒子具有粒子性已是不争的事实, 实物粒子的波动性还有待于实验的验证。1927 年, 戴维孙 (C. J. Davisson) 和 G. P. 汤姆孙 (G. P. Thomson) 分别利用晶体做了电子束衍射的实验, 成功地观察到了电子束的衍射图样, 从而证实了实物粒子也具有波动性。

本节教材是对学生进行类比思想方法培养的好题材, 在教学中应当高度重视。

本节的教学与前两节的教学思路基本相同, 目的仍然是使学生能从科学家的工作中感悟科

学探究。特别是科学家如何向固有的观念、认识挑战，提出大胆的猜想和假说，如何寻找有效的方法加以验证。具体说来，在教学上建议沿这样的线索展开：



（1）光的波粒二象性

主要是引导学生进行知识回顾，可让学生阅读教材回顾主要的历史事实，填写下表：

光具有波动性的实验事实		光子的能量、动量关系式： $\epsilon=h\nu$ $p=\frac{h}{\lambda}$ （对称美）
光具有粒子性的实验事实		

然后抓住光子的能量、动量关系式，分析其对称性，感受普朗克常量 h 的重要性。

光同时具有波动性和粒子性学生较难理解，在经典物理学中，物质的粒子性和波动性是互不相容的，二者是两种不同的研究对象，波和粒子这两个概念是互相排斥的。经典的粒子任意时刻的位置、速度是确定的，而波是一种可以在空间弥散开的东西，光具有波粒二象性就意味着光子既是一个限制于很小体积内的实体，又是一个扩展到一个大空间的场。光子将完全对立的矛盾的两面集中在自己身上，从当时的科学角度讲这是很荒谬的（现在理解起来也很困难）。

明确告诉学生，光具有波粒二象性是一种实验事实，它不是经典意义上的粒子和波，我们只能根据事实去想象。由于当时的科学家对光具有波粒二象性都还持怀疑态度，所以当德布罗意提出粒子的波动性后，大多数科学家都不理解。

教学时应注意引导学生领会德布罗意如何用类比的方法大胆提出粒子的波动性假说的。

（2）粒子的波动性

让学生阅读教材的这部分内容，体会德布罗意是如何受普朗克能量子和爱因斯坦光量子理论的启发，以类比的方法大胆提出实物粒子也具有波动性假设的思想的。

（3）物质波的实验验证

在物质波的实验验证的教学中，要求学生认识实验技术手段与科学发现的关系。进一步了解验证物理理论的基本方法——实验。

引导学生通过对“科学漫步”材料的阅读，感受科学的成就推动了技术的进步。



教学片段

物质波的实验验证

展示问题：将教材最后自然段的飞行的子弹及运动的电子的波长设为例题，让学生应用光子的能量、动量关系式计算子弹及电子的波长。

提出问题：若要验证子弹及电子的波动性应该怎么办？并让学生回顾能观察明显衍射的条件，同时要求学生寻找能观察明显衍射的小孔（缝）或障碍物。

教师引导：让学生回顾热学中学过的分子的直径的数量级，通过回忆让学生明白在宏观物体中是不可能找到这样的小孔（缝）或障碍物的。教师提出问题：紧密排列的分子间距多大？能否让电子通过分子间缝隙从而发生明显衍射现象？

引导看书：让学生通过阅读了解粒子波动性的实验验证的历史过程，并且观察教科书图17.3-1的电子穿过铝箔后的衍射图样。最后让学生明确，运动的物体都有波动性，像太阳、地球这样巨大的物体也有对应的波长，但由于其动量太大，波长太小，其波动性无法观察到。

让学生了解实验技术手段的进步可以促进科学研究的大发展。

3. 问题与练习

内容分析

第1题了解光的波粒二象性的证明依据。

第2题通过练习让学生领会如何求微观粒子的波长。

第3题通过对比加深对德布罗意波长的理解。

解答与说明

1. 光的干涉和衍射说明光具有波动性，光电效应和康普顿效应说明光具有粒子性，因此我们说光具有波粒二象性。

2. 电子的德布罗意波长。因为由 $E_k = \frac{p^2}{2m}$ 可知，动能相同时，电子质量小，其动量就小；又由 $\lambda = \frac{h}{p}$ 知，动量小，德布罗意波长长。因此当具有同样的动能时，电子比质子的德布罗意波长长。

3. 不会。因为宏观的子弹质量、速度大，动量大，德布罗意波长非常小。

第4节 概率波

1. 教学目标

- (1) 了解经典粒子和波的模型。
- (2) 了解概率波的内容。
- (3) 通过分析实验，体会微观粒子波粒二象性模型的建立过程。

2. 教材分析与教学建议

本节内容安排的核心是光子、电子干涉条纹对玻恩的概率波理论的验证。教材分为两部分，第一部分为经典的粒子和经典的波的特征概述，第二部分为概率波理论及其验证。

教学时应让学生明确经典的粒子和经典的波的模型是两种不同的研究对象，具有非常不同的表现，物质要么具有粒子性，要么具有波动性。通过观察电子干涉条纹图示让学生了解概率波是如何将波粒二象性集于一身的。

(1) 经典的粒子和经典的波

让学生通过阅读领会,经典的粒子和经典的波的物理模型及其特征。指导学生明确:经典的粒子任意时刻的位置、速度是确定的,经典的波的频率、波长是确定的,但在经典物理学中,物质的粒子性和波动性是互不相容的,二者是两种不同的研究对象,只有通过概率波才能将二者集于一身。

(2) 概率波

教材从实验结果开始探讨光的波动性质,教师应注意教材是用对比的方法来说明问题的。按照波动理论双缝干涉的明条纹表示光的强度大的地方,按照光子说,明条纹应是光子到达数目多的地方。引导学生思考一个问题:这些光子为什么不在屏上均匀分布呢?是光子本身的原因呢,还是光子之间的相互作用呢?

提出问题后让学生思考怎样在实验中解决这些问题。要排除光子的相互作用只有让光子一个一个地通过狭缝,引导学生分析单个光子穿过后的图样,发现长时间曝光后,仍然会出现干涉条纹。通过排除法让学生理解“波动性是光的本性”。

学生对单个光子大量累积形成干涉条纹感到神奇、不可思议,教师应抓住学生心理引导学生分析单个光子的落点问题。通过阅读玻恩那句话,学生会对概率波有一个基本的认识。

关于物质波也是概率波的问题,可以让学生分析教科书图 17.4-2。学生从图中直观“看到”一个一个的电子,让学生明确这些明暗相间的条纹其实是电子干涉形成的。这个图可以直观而深刻地让学生感受到用概率波的理论可以将微观粒子的粒子性和波动性巧妙集于一身。



教学片段

概 率 波

引导观察:观察光的双缝干涉实验结果(教科书图 17.4-1),让学生分别从波动理论和光子说分析明暗条纹所表示的物理意义。

教师引导:按照波动理论双缝干涉的明条纹表示光的强度大的地方,按照光子说,明条纹应是光子到达数目多的地方。正是因为光子到达数目多少的不同而导致光子分布呈现出周期性变化,即产生了波动性。

教师设问:同样是频率相同的光子,为什么会出现这样的变化规律呢?

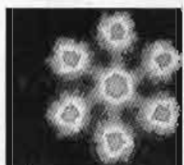
学生猜想:可能是屏上不同部位的吸引力不同,也可能是缝的边沿对光子的吸引力造成的,还可能是光子之间的相互作用造成的,或者是光子本身就有这个特性。

教师引导:怎样才能让光子之间没有相互作用呢?只有让光子一个一个通过狭缝。

引导观察:让学生观察教科书图 17.4-2,这虽然是电子的干涉图样,但与光子的干涉图样规律相同。通过类比让学生想象教科书上图 17.4-1 的明条纹就是一个个光子打到屏上形成的。

教师引导:实验表明,让光子一个一个通过狭缝之后,尽管单个光子的落点不可预知,但是长时间曝光之后仍然得到图 17.4-1 所示的条纹分布。可见光的波动性不是光子之间的相互作用引起的,而是光子自身的固有的性质。

引导思考:“能不能准确预测单个光子的落点?”通过分析让学生明确,光子打到哪一点是随机的、不确定的,进而阐明光子没有确定的位置和轨道,而且是可以扩散的,与经典粒子不



同，与波有类似性。德国物理学家玻恩指出：虽然不能肯定某个光子落在哪一点，但由屏上各处明暗不同这个事实推知，光子落在各点的概率是不一样的，即光子落在明纹处的概率大，落在暗纹处的概率小。这就是说，光子在空间出现的概率可以通过波动的规律确定。所以，从光子的概念上看，光波是一种概率波。

引导学生从两个角度理解概率波：其一，光子的落点是随机的，即单个微观粒子的运动具有不确定性；其二，大量随机现象服从波的规律，即单个粒子在空间某点附近出现的概率却可通过波动规律确定。微观粒子就这样将粒子性和波动性集于一身。

引导阅读：阅读教材最后一段，让学生明确，不仅光波是一种概率波，与其他的微观粒子相联系的物质波也是概率波。

教学中要让学生初步认识经典物理与近代物理的区别：微观世界不再遵从经典物理的决定论式的因果律，而是满足大量粒子运动的统计规律。

教科书以旁批形式区别了宏观的概率和量子理论强调的概率的不同之处，应指导学生阅读。

3. 问题与练习

内容分析

第1题通过分析让学生明确，波动性是光子的基本属性。

第2题是让学生知道光子表现出波动性，而且光波是一种概率波。

第3题让学生通过计算明确人能感知光的道理，并用数据说明光子的粒子性和波动性与波长的关系。

解答与说明

1. 不对。可以让光源非常弱，使前一个光子到达屏幕后再发射第二个光子，这样排除了光子之间相互作用的可能性。长时间曝光后仍得到明暗相间的条纹，说明光的波动性不是光子之间相互作用的结果。

2. 不能预测某光子打在光屏上的落点的准确位置，但能预知它落在某一点的概率。大量光子打在光屏上的落点服从统计规律。在双缝干涉图样中，亮纹处就是光子落点概率大的位置，暗纹处就是光子落点概率小的位置。

3. 一个无线电波光子的能量 $\epsilon_1 = h\nu_1 = 6.63 \times 10^{-34} \times 10^6 \text{ J} = 6.63 \times 10^{-28} \text{ J}$ ；

一个绿色光子的能量 $\epsilon_2 = h\nu_2 = 6.63 \times 10^{-34} \times 6 \times 10^{14} \text{ J} = 3.98 \times 10^{-19} \text{ J}$ ；

一个 γ 光子的能量 $\epsilon_3 = h\nu_3 = 6.63 \times 10^{-34} \times 10^{18} \text{ J} = 6.63 \times 10^{-16} \text{ J}$ 。

粒子的能量 $\epsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$ ，动量 $p = \frac{\epsilon}{c}$ ，波长 $\lambda = h \frac{c}{\epsilon}$ ，根据上面的计算和这三个表达式可知，低频电磁波的能量小、动量小、波长长，高频电磁波的能量大、动量大、波长短。由概率波的波粒二象性特点可知，低频电磁波的波动性显著而高频电磁波的粒子性显著。

第5节 不确定性关系

1. 教学目标

(1) 初步了解不确定性关系的内容，感受数学工具在物理学发展过程中的作用。

(2) 了解模型在物理学发展中的重要作用及其局限性。体会人类对自然界的探究是不断深入的。

2. 教材分析与教学建议

本节内容是在上一节基础上进一步深化的。学生已经知道单个微观粒子的运动具有不确定性，但它在空间某点出现的概率却可通过波动规律确定。本节通过光的单缝衍射实验，具体分析了这种不确定性的数量关系，给出量子力学中一个著名的数学关系式——不确定性关系： $\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$ 。通过介绍经典物理学和微观物理学中物理模型与物理现象的巨大差异、量子力学对社会进步的重要作用以及对量子理论的论争，为学生用新的观点来认识微观物理世界提供了有效的空间。同时也为学生今后学习量子力学搭建过渡之桥。

(1) 不确定性关系

不确定性关系描述的是微观现象，教学内容抽象、难懂。它是量子力学的精髓，教学中可以不做过多的具体要求，但它所蕴涵的深刻思想应着重强调。

教材第一段以实验事实说明处理微观粒子的运动绝不能用处理经典粒子的方法。要向学生说明，不能同时用位置和动量来描述微观粒子的运动。学生接受这种思想是困难的，应在接下来的讲解中突出这种思想。

教材由单缝衍射实验引出概率分布曲线，让学生明确明条纹的分布具有周期性，但光子到达它们的几率也是不一样的，结合上一节内容让学生感受光子运动规律的神秘性以及宏观粒子的不同特性。

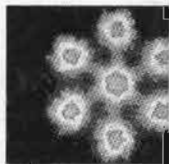
有的学生对入射粒子在挡板左侧的位置的不确定性有错误理解，他们心中的不确定是指入射粒子太多了，不知道是哪一个会穿过狭缝，但对某一个粒子而言，它应该沿着某条轨迹运动。这时告诉学生，科学研究表明，对单个粒子而言，它也没有所谓的轨迹和位置，它的运动也是不确定的。对位置的不确定量要强调当缝变窄时只是其不确定量减小了，不能说光子的位置确定了。

教材所说的通过狭缝后有些粒子“具有了与其原来运动方向垂直的动量”，要让学生从矢量分解的角度去理解，即动量可以分解为与挡板垂直和与挡板平行的分量。

对于动量的不确定性要引导学生分析实验事实。从实验现象可以看出，当位置的不确定量减小时，动量的不确定性增大了；当缝比较宽时，动量的不确定量减小，但位置的不确定性却增大了。从而让学生对不确定性公式有一个定性的认识。

不确定性关系的公式是对不确定性描述的定量表示，对公式的来龙去脉和相关计算都不作要求，但要让学生明确：不确定性关系不是从单缝衍射推导出来的。人们在研究微观粒子时，恰恰以不确定性关系为基本原理，通过逻辑关系得到很多结论。这里所说的基本原理就像平面几何中的公理，是不需要证明也无法证明的，它的正确性在于由它得到的所有推论都与事实相符。

教材将经典物理对运动的描述与微观粒子的运动进行了对比，目的是要帮助学生尽快建立描述微观粒子运动规律的模型。要让学生真正理解不确定关系的内涵是很难的，教学时通过不确定关系式 $\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$ 强化一种意识：即不可能同时准确地知道微观粒子的位置和动量。描述粒子的位置和动量不可能同时具有确定值，即对微观粒子而言“位置与动量不可兼测”，它直



接表明微观粒子的运动不存在“轨道”，这是所有微观粒子运动的基本特征，从而经典力学描述质点运动的方法在解决微观粒子运动中失去意义。

虽然我们不可能知道单个粒子的运动情况，但是大量粒子的运动却是有规律的。这种随机现象遵从统计规律，要从波的理论去推测它到哪个地方的几率有多大。反复强化这个观念，不确定性关系的模型才能逐渐在学生心中建立。

(2) 物理模型与物理现象

通过物理模型与物理现象的教学，要让学生明确：模型是人类认识自然的一种方式，模型是对自然的一种抽象、纯化，但模型并不是自然本身。了解量子力学对现代社会的重要作用。

教学片段

物理模型与物理现象

引导阅读：先让学生认真阅读教材旁批海森伯的那句话，“自然科学并不是自然本身，它是人类和自然关系的一部分。”让学生发表见解。

教师引导：自然太复杂了，比如要分析一个放在桌上的杯子的受力情况就是一个不可能的任务，杯子随地球旋转，太阳系和宇宙都在运动，所有宇宙中的物体（明的和暗的）都对这个杯子有影响，如果要完全弄清其受力情况显然是不可能的。在这样的情况下科学家想到了模型，模型是对自然界的一种理想化、纯化、简化，是一种高度的抽象，完全剔除了次要因素的影响，突出了矛盾的主要方面。这也就是科学，所以它是人与自然关系的一部分。

提出问题：请列举我们已经学过的物理模型。对照海森伯的那句话思考：这些模型是不是反映了真实的自然？如果没有这些模型，我们能认识自然吗？

教师引导：我们学过很多物理模型，匀速直线运动、光滑的滑块、两个满足动量守恒的撞球、单摆、弹簧振子、圆周运动、行星模型等等。比如匀速直线运动模型，在自然界是找不到的，但如果没有这个基础模型，我们对各种复杂运动将永无可知。所以模型不是真实的自然，是人与自然关系的一部分。

提出问题：请想象“电子具有粒子性”和“光具有波动性”，并用语言描述你心中的电子和光波是怎样的。

教师引导：科学家们创造的这些模型会在人们心中形成一种印象，认为我们想要了解的东西就是模型术语描述的那样。在经典物理学中，物理模型与直接经验一致，物理现象直观可感。但随着研究的深入，科学家们发现，微观粒子的性质并不像科学家想象的模型所描述的那样。比如电子、轨道、微观粒子、光波、正电、负电等，这些现象中没有一个是严格按照字面意思表达出来的东西。我们说电子是“粒子”，头脑里立即就反映出一个圆圆的撞球，我们很想知道它到底藏在原子中的何处，怎样在跃迁、怎样在运动、占了多大的空间。我们说电子有波动性，头脑里便泛起水的“涟漪”，这会把我们带入歧途，让我们离真相越来越远。

不确定性关系是对微观粒子波粒二象性的进一步认识，让学生明确一切物体都有波动性。

教材简要介绍了量子力学对人类社会的重要贡献，告诉学生我们已学的能量子、光子、波粒二象性、不确定性关系正是量子力学的基础内容。尽管以量子理论为基础建立起来的现代技术已经取得了巨大的成功，但是，对于“量子”的图景和哲学意义，却一直存在着严重的分歧

和激烈的争论。

这部分内容要简要介绍,让学生树立科学是不断发展的思想,将争议回归到爱因斯坦那句话:“整整50年有意识的思考,并没有使我更接近‘光量子是什么’这个问题的答案。”现在的理论并不是对微观粒子运动规律的终极观念,这种为了满足我们“肉眼凡胎”而创立的模型虽然比较完美地解释了现在所观测到的一切,但随着认识的深入,我们现在认为的单个微粒运动的随机规律也可能是不完备的模型,我们也可能会了解它的真实图景,科学研究没有终点站。

引导学生认真阅读“科学漫步”,初步了解量子力学发展的过程,牢固树立人类对世界的探求是不断深入的思想。

3. 问题与练习

内容分析

第1题让学生明确在经典力学中可以同时确定物体的位置和动量。

第2题让学生进一步明确牛顿运动定律乃至其他定律的成立总是有条件的。

第3题让学生明确:单个粒子的位置和动量虽然具有不确定性关系,但粒子出现在某处是满足概率规律的;另外,不满足牛顿运动定律的机械决定论并不意味着粒子不满足其他规律,统计规律就是支配微观粒子的运动规律。

第4题让学生正确理解不确定性关系的意义。

解答与说明

1. 例如,火车以一定的速度在一定时刻经过某站,可以准确确定其位置和动量。

2. 电子在原子核外运动,其位置和动量具有不确定关系,牛顿运动定律不再成立。

3. 这种说法不准确。虽然我们不可能同时准确地知道某个粒子的位置和动量,但粒子的运动却有规律可循,那就是统计规律。比如,干涉、衍射的亮斑位置就是粒子出现概率大的位置。

4. 光子动量的不确定量变大。因为在光的单缝衍射实验中,狭缝变窄时,屏上中央亮条纹变宽,衍射现象更明显。

三、教学设计案例

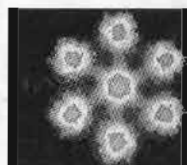
光的粒子性

1. 教学目标

(1) 通过本节的学习,让学生了解光电效应和康普顿效应,体会光子理论和光电效应方程建立的历史过程。

(2) 领会密立根实验验证光电效应方程正确性的科学思想方法,认识光子模型成功解释光电效应现象的重要意义。

[教学重、难点] 光电效应规律及爱因斯坦光电效应方程。



2. 教具：锌板，紫外灯，验电器。

3. 教学过程

第1课时

(1) 导入新课

【教师讲解】光究竟是什么（学生可能会回答光是一种电磁波）？让我们再次回顾历史上对光的本性之争。最初，牛顿认为光是一种微粒，惠更斯认为光是一种波，二者都各自能解释一些现象，由于牛顿在学术界的地位，而波动学说又缺少有力的实验事实，人们倾向于光是一种粒子的看法。直到发现了光的干涉、衍射这一波特有的现象之后，人们才开始从波的角度研究光。麦克斯韦提出光是一种电磁波，并建立了完善的电磁场理论，光的波动理论似乎很完美了。

既然如此，为什么本节又要谈论“光的粒子性”呢？让我们先做一个实验。

【实验演示】（参见教材图 17.2-1）教师介绍实验器材，然后演示，引导学生观察验电器指针偏转情况。

【启发猜想】为什么用紫外线灯照射锌板会引发验电器的指针偏转？

（学生会提出多种猜想，有的学生会主动提出验电器带电的种类，可以直接告诉学生验电器带正电。）

【引导分析】锌板本身是电中性的，现在它带正电，说明在紫外线的照射下，锌板中的自由电子跑了。

【教师提问】为什么在紫外线的照射下锌板中的自由电子会跑出来呢？

【引导分析】让学生结合以前的知识回想电子在核外的运动情况；光波是一种电磁波，它要形成电场，电子处在电场中要受到电场力的作用。

【启发猜想】改用其他的光（比如红光）来照射会不会照射出电子？或用其他的材料做实验会不会照射出电子？

学生根据已有的知识，猜想一定会发生与刚才相同的现象，然而这时做实验却没有发现有电子跑出来。激起学生的认知冲突，学生急于想弄懂：为什么用紫光能照射出电子而用红光就不能照射出电子呢？

(2) 新课教学

(一) 光电效应的实验规律教学

【教师讲解】我们刚才做的实验是科学史上一个非常重要的实验，这个实验的焦点就在于“为什么用红光照射锌板打不出电子”，科学家将实验装置进行了改进，得到了很多出人意料规律。下面我们一起来学习：

（板书）光电效应的实验规律

让学生阅读总结：光电效应现象（板书）

引导学生分析实验装置教科书图 17.2-2，介绍实验原理。

【教师提问】为什么要加正向电压？不加正向电压电路中有电流吗？

分析解答：光束照在阴极 K 上会发生光电效应现象，但只有极少的电子能到达阳极 A，电路中电流很小。加了正向电压后，大量的电子在电场力的作用下向阳极运动，形成较大电流（加正向电压的目的是放大实验效果，增强实验“可见性”）。

【教师提问】保持光照条件不变，逐渐加大两极之间的电压，大家分析电流会怎么变化？

【引导分析】学生根据电场力知识会得到电流增大的结论。有的学生会分析出电流会增大到一个极限值。

教师解答：同学们的分析会与实验结果一致吗？我们一起来阅读科学家的实验结果。

引导看书：存在饱和电流。

（板书）存在饱和电流：对于一定颜色（频率）的光，入射光越强，单位时间内发射的光电子数越多。

【教师讲解】当所加电压为0时，电流并不为0。只有施加反向电压，也就是阴极接电源正极，阳极接电源负极，在光电管两极间形成使电子减速的电场，这时电流才可能为0。使光电流减小到0的反向电压称为遏止电压。

（板书）遏止电压及其公式

【教师提问】对刚才的实验，加了遏止电压后，如果再增大入射光的强度，电路中会有光电流吗？减弱光的强度，遏止电压会减小吗？

【引导分析】学生按照经典理论解释一定会有光电流，因为入射光越强，电子吸收到的能量越多，电子跑出来的动能也越大，刚才这个电压就不能遏止住了。减弱光的强度，遏止电压肯定会减小。

【教师讲解】同学们分析得很好，但科学家经过实验研究发现：此时无论入射光的强度增大到多大，都没有光电流产生。而且实验发现只要是同一频率的光都有相同的遏止电压，与光的强度无关。如果改变光的频率，遏止电压也会随之改变。

（板书）光电子的能量只与入射光的频率有关，而与入射光的强弱无关。

引导看书：截止频率。

（板书）截止频率：当入射光的频率低于截止频率时不能发生光电效应。不同金属的截止频率不同。

【教师分析】实验结果是射出的光电子的能量与入射光的强度没有关系，只与其频率有关。刚才的分析认为，有光电流是因为光的能量在电子身上叠加，进一步说明入射光的能量并没有在电子身上叠加，引发学生的认知冲突。

【引导猜测】电子是怎样吸收入射光的能量的呢？

教师让学生尽情猜测，但不作答。告诉学生，当年爱因斯坦等大量的科学家也在做像你们这样类似的猜测。

【教师提问】如果入射光的频率超过截止频率，做两次实验，第一次用很弱的光照射，第二次用很强的光照射，请问哪一次光电子从锌板跑出来的时间长些？

【引导分析】学生会根据积累效应分析：如果入射光很弱，光子积累到跑出来的能量需要更多的时间。

教师：但实验的结果又是怎样的呢？

引导看书：效应具有瞬时性。

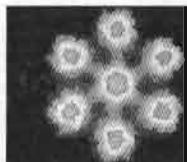
（板书）效应具有瞬时性：发生光电效应几乎不需要反应时间。

（二）光电效应解释中的疑难教学

引导看书：光电效应解释中的疑难。

（板书）逸出功

【教师总结】同学们根据自己已有的知识对光电效应可能发生的现象进行了猜测和分析，我们发现我们的推测与实验结果大相径庭，是我们学的知识错了还是面对新的实验事实应该建



立新的理论呢？我们来看科学家是怎样面对的？

引导看书：爱因斯坦的光电效应方程

【教师讲解】爱因斯坦一辈子很少做实验，他是一个伟大的理论物理学家，但他非常尊重实验事实，当理论与实验事实矛盾时，他倾向实验。为了解释光电效应实验规律，他接受并发展了普朗克都惶惑的能量子观点，提出了光子说，从而成功地解释了光电效应规律。

（板书）光子：光本身就是由一个个不可分割的能量子组成的，频率为 ν 的光的能量子为 $h\nu$ ，其中 h 为普朗克常量，这些能量子就叫光子。

（板书）爱因斯坦光电效应方程：

$$E_k = h\nu - W_0$$

（其中， E_k 为电子从金属表面逸出的最大初动能， $h\nu$ 为一个光子的能量， W_0 为逸出功，与截止频率 ν_c 的关系是 $\nu_c = \frac{W_0}{h}$ 。）

【教师提问】爱因斯坦是如何用光子说成功解释光电效应规律的？

解释：（1）光电子最大初动能与频率成线性关系，只有 $h\nu \geq W_0 = h\nu_c$ 时才会发生光电效应。成功地解释了截止频率的存在。

光照频率一定，对一定的金属，光电子逸出的最大初动能一定，由 $eU_c = E_k$ 知，其遏止电压一定，成功地解释了遏止电压的存在。

（2）电子一次性吸收一个光子的能量，不需要时间积累。成功地解释了光电效应的瞬时性问题。

（3）光强一定，光子数一定，从金属表面逸出的光电子数一定，饱和电流一定。成功地解释了饱和电流存在。光越强，饱和电流越大。

教师：光子既然是一种粒子，除了有能量外，还应该有动量。引导学生阅读旁批，加深对粒子性的理解。

（3）课堂练习及课后作业

课堂练习：教材 36 页“问题与练习”的第 1、2、3、4 题；课后作业：阅读教材 33 页“思考与讨论”和 34 页的例题，并完成 36 页“问题与练习”的第 5 题。

4. 教学设计说明

本节内容比较难讲，到底怎样讲学生易于接受？教学界一直在探索，一般有两种讲法，第一种讲法完全按照书的顺序，先讲光电效应的实验规律，再讲解释中的疑难，这种讲法的困难在于讲实验规律时学生完全不知所云，更无法参与教学。第二种讲法，把发现规律和解释对照起来讲，即发现一个规律就用经典理论进行解释，让学生一直沉浸在矛盾之中，这种讲法学生易于接受一些。

本节案例推荐第三种讲法：即用经典理论主动预先探讨实验结论并与实验结果对照而激发矛盾的教学方法。这种方法用学生已有的认知经验引出结论，与实验结果产生矛盾，产生认知冲突，进而产生探究和解决问题的强烈欲望。这种方法比较符合学生的认知心理特点，不仅易于接受，而且学生可以参与到教师的教学中来一起讨论、猜想，是一种较好的方法。这是本节课总的设计思想。

本课以实验引入，在引入阶段让学生充分讨论两个问题：“为什么在紫外线的照射下锌板中的自由电子会跑出来呢？”“为什么用红光照射锌板打不出电子？”这样的引入激发了学生的

兴趣,为即将进行的教学作好了准备。

光电效应的实验规律部分是激发学生想象力的关键,不能简单地将知识灌输给学生,“存在饱和电流、遏止电压、截止频率、效应的瞬时性”每一个问题都让学生从已有的知识出发去探讨,再和实验结果进行比较,学生会真切感受到经典理论的局限性和光电效应的神奇性,增强教学效果。

有了前面的铺垫,爱因斯坦对光电效应的解释便呼之欲出,顺理成章了。

整个设计,以贯穿三维目标为基调,以培养学生想象力为主轴,以教材知识线索为主线。

四、教学资源库

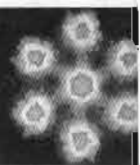
(一) 概念、规律和背景资料

1. 普朗克生平

德国理论物理学家。量子论的奠基人之一。1858年4月23日生于基尔,少年时代在慕尼黑度过。在中学时他热爱劳动,责任心强,聪慧勤奋。成绩单上的评语是:“尽管在班里年龄最小,但头脑非常清醒而又逻辑性强”。有条不紊、一丝不苟是他的作风。1874年入慕尼黑大学,1878年毕业,次年获该校哲学博士学位。1880~1885年在慕尼黑大学任教。1885~1888年任基尔大学理论物理教授。1888年基尔霍夫逝世后,柏林大学任命他为基尔霍夫的继任人,先任副教授,1892年后任教授。由于1900年他在黑体辐射研究中引入能量量子,荣获1918年诺贝尔物理学奖。

普朗克早年的科学研究领域主要是热力学。他以热力学的观点对物质聚集态的变化、气体和溶液理论等进行了研究。可是不久,他了解到美国物理学家吉布斯早已做过这方面工作。于是,便把注意力转向黑体辐射问题。1893~1896年维恩发表了他的对黑体辐射的研究成果,提出一个辐射密度 ρ 的分布公式,即维恩公式。这结果为当时实验所证实,但只有波长较短、温度较低时才适合,而且立论的根据是通过与麦克斯韦分子速率几率分布律类比而得的,不能完全令人信服。普朗克从1896年开始研究热辐射的能量分布问题。

普朗克想到一个特别有意义的问题:为什么理想黑体的光谱竟像万有引力一样与物质成分的化学性质无关?这里是否隐藏着更普遍的规律?他说:“这个所谓的正常能量分布代表着某种绝对的东西,既然在我看来,对绝对的东西所作的探求是研究的最高形式,因此我就劲头十足地致力于解决这个问题了。”他独创性地将熵这个基本概念引入振子、电磁波能量分布等问题中,认为黑体辐射的能量分布是最稳定即熵值最大的分布。1900年6月,瑞利根据黑体空腔内形成驻波及能量均分原理导出另一黑体辐射公式,其中的系数经金斯修正,在长波部分与实验很符合,即瑞利-金斯公式。普朗克由此受到启发,利用内插法得出他的新公式,并于1900年10月19日在柏林德国物理学会提出报告《维恩辐射定律的改进》,第二天一早鲁本斯(H. Rubens, 1865—1922)就告诉他,这一公式与自己已得的实验数据十分相符。普朗克没有满足于“侥幸揣测出来的内插公式”,而是“致力于找出这个等式的真正的物理意义”。最后他终于接受了玻耳兹曼关于熵的统计诠释,找到了 $S=k\ln W$ 这一重要的普适公式,它代表了宏观态与微观态的结合,即所有微观态的总组合是分立的集合,即必须假定物质辐射的能量 E 是不连续的,是一份量出现的,只能是某一最小能量单位 ϵ 的整数倍。这样就可以解释他推导



出来的绝对黑体辐射的能量分布公式。而且他首先推出 $\epsilon=h\nu$, 其中 h 是普朗克常量, 并首先给出 h 的数值, 只比近代值约高 3.5%。他认为 h 、光速 c 和万有引力常量 G 是三个重要的普适量, 作为定义质量、长度、时间的自然单位制的基本量。1900 年 12 月 14 日, 他在德国物理学会宣读了《关于正常光谱的能量分布定律的理论》, 总结了上述理论。这一天成了量子论的生日。

当时普朗克对能量子 $\epsilon=h\nu$ 的作用还重视不够, 他后来谈到“企图使基本作用量子与经典理论调和起来的这种徒劳无功的打算, 我持续了很多年 (直到 1915 年)”。普朗克关于辐射系统与辐射场间不连续的量子交换概念, 打破了经典物理学的框架, 掀起了本世纪物理学革命的风暴, 从而开辟了一个新纪元。

在相对论方面, 普朗克也有贡献, 他是最先理解和支持相对论的物理学家之一。1906 年, 他导出了相对论动力学方程, 得出电子能量和动量的表达式, 从而完成了经典力学的相对论化。1906 年他引入了“相对论”这个术语。1907 年在狭义相对论的框架内推广了热力学。

1887 年他还给出气体和稀薄溶液中化学平衡定律的普遍推导。

自 20 世纪 20 年代以来, 普朗克成了德国科学界的中心人物, 与当时国际上的知名物理学家都有着密切联系。1894 年当选为柏林科学院院士。1912~1938 年任常任秘书。1918 年当选为英国皇家学会会员。1926 年当选为苏联科学院外籍院士。1930~1935 年任威廉皇帝科学促进协会会长。为了表示对普朗克的崇敬, 1945 年以后, 协会改名为马克斯·普朗克科学促进协会。

2. 德布罗意生平

法国物理学家。1892 年 8 月 15 日生于下塞纳的迪耶普。出身贵族, 父母早逝, 从小就酷爱读书。中学时代显示出文学才华, 在大学里接受的是文科教育, 1910 年获巴黎大学文学学士学位。1911 年, 他听到作为第一届索尔维物理讨论会秘书的莫里斯谈到关于光、辐射、量子性质等问题的讨论后, 激起了强烈兴趣, 特别是他读了庞加莱的《科学的价值》等书, 他转向研究理论物理学。1913 年, 他获理学硕士学位。第一次世界大战期间, 在埃菲尔铁塔上的军用无线电报站服役。他的哥哥是 X 射线方面的专家, 战后他一方面参与他哥哥的物理实验工作, 一方面拜朗之万为师, 研究与量子有关的理论物理问题, 攻读博士学位。

光的波动和粒子两重性被发现后, 许多著名的物理学家感到困扰。年轻的德布罗意却由此得到启发, 大胆地把这两重性推广到物质客体上去。他在 1923 年 9~10 月间, 连续在《法国科学院通报》上发表三篇短文:《辐射——波和量子》《光学——光量子、衍射和干涉》《物理学——量子、气体动理论及费马原理》。在 1924 年通过的博士论文《量子论研究》中他作了系统阐述, 提出了德布罗意波 (相波) 理论。这一理论以后被薛定谔接受从而导致了波动力学的建立, 并且把爱因斯坦关于光的波粒二象性的思想加以扩展。他认为实物粒子如电子也具有物质周期过程的频率, 伴随物体的运动也有由相位来定义的相波即德布罗意波, 后来薛定谔解释波函数的物理意义时称为“物质波”。

德布罗意的新理论在物理学界掀起了轩然大波。这种在并无实验证据的条件下提出的新理论使得人们很难接受。就连德布罗意的导师朗之万也根本不相信这种观念, 只不过觉得这篇论文写得很有才华, 才让他得到博士学位。

1927 年, 美国贝尔实验室的戴维孙 (C. J. Davisson, 1881—1958)、革末 (L. H. Germer, 1896—1971) 及英国的汤姆孙 (G. P. Thomson, 1892—1975) 通过电子衍射实验, 都证实了电子确实具有波动性。至此, 德布罗意的理论作为大胆假设而成功的例子获得了普遍的赞赏, 他荣获了 1929 年诺贝尔物理学奖。

3. 康普顿生平

美国物理学家，1892年9月10日生于俄亥俄州伍斯特。1913年在伍斯特学院以最优异的成绩毕业并成为普林斯顿大学的研究生，1914年获硕士学位，1916年获博士学位，后在明尼苏达大学任教。1920年起任圣路易斯华盛顿大学物理系主任，1923年起任芝加哥大学物理系教授，1945年返回华盛顿大学任校长，1953年起改任自然科学史教授，直到1961年退休。

在明尼苏达大学任教的两年多时间里，康普顿完成了两项很有意义的工作，一项是提出电子半径为 $1.85 \times 10^{-16} \text{ cm}$ 的假设，用以解释他用实验所确定的X射线强度与散射角的关系；另一项是确定了磁性晶体的磁化效应，并科学地预言了铁磁性起源于电子的内禀磁矩，后为他的学生于1930年证实。

康普顿最重大的贡献是康普顿效应及解释。1919~1920年间，康普顿去英国在J.J. 汤姆孙和E. 卢瑟福的指导下以访问学者的身份在卡文迪什实验室工作，他进行了 γ 射线的散射实验，发现用经典理论无法解释实验结果。回国后他用单色X射线和布喇格晶体光谱仪做实验，通过从不同角度在靶周围测量散射X射线波长，发现散射波中含有波长增大的波，该现象就是著名的康普顿效应。康普顿指出：散射应遵从能量守恒和动量守恒定律，出射X射线波长变长证明了X射线光子带有量子化动量。1922年，他采用单个光子和自由电子的简单碰撞理论，对这个效应给出了满意的理论解释。康普顿效应是近代物理学的一大发现，它进一步证实了爱因斯坦的光子理论，揭示出光的二象性，从而导致了近代量子物理学的诞生和发展；另一方面康普顿效应也阐明了电磁辐射与物质相互作用的基本规律。因此，无论从理论或实验上，它都具有极其深远的意义。康普顿因此获得1927年度诺贝尔物理学奖。中国物理学家吴有训在康普顿实验室做了大量实验，取得了令人信服的实验根据，排除了学术界对康普顿理论的异议，为康普顿的工作作出了宝贵的、不可多得的贡献。

4. 维恩公式与瑞利—金斯公式

(1) 蓝的公式

维恩导出了从黑箱子里发出来的光，在某温度下，什么色的光有什么样的强度的关系公式。

在被加热了的箱子里面，充满着波长不同的光。这里，在被加热了的气体中，分子向各个方向做剧烈运动，这是玻耳兹曼提出的、能详细地论述热现象的学说。维恩想把这种想法用到现在这个问题上。他想，“黑”箱子里的光和分子极为相似。

可是，这个新颖的想法，这次很不受欢迎。那些认为光除了波以外什么东西也不是的人们，当然不能接受光是像分子一样的粒子的说法的。连热学的鼻祖开尔文也叹息地说：“热理论已到发疯的程度”。然而，维恩的公式却难以想象地跟实验完全一致。

B：“照你这样说，维恩是一个了不起的天才啦，可是，人们究竟在哪些地方还不能接受呢？”

A：“维恩把光当成类似分子一样的推测，在当时来说是惊人的设想。可是，正像人们所知道的一样，当时，对光的本性已经有牛顿的微粒说与惠更斯的波动说长期的争论，而且，波动说已取得完全的胜利，由于麦克斯韦的电磁波理论已被确立，所以，大家认为他的想法是旧话重提，不是没有根据的。当时，为了用粒子的想法来补偿所谓的光的波长的说法，他不得不在思路上做了较大的飞跃。事实上，这个实验也并不是完美无缺的。——果然，随着实验的准确度的提高，维恩的公式的弱点就暴露出来了。这个公式能够很好地说明短波长的光的强度分布，可是在长波的部分却相差得很厉害。按照维恩的公式，红色变得很弱，整个来说应该呈现

为蓝色；可是，实际上所发出的光却比它多少略带点红色。这可以说是适用于蓝色的‘蓝的公式’。”①

(2) 红的公式

问题终于传到英国，大物理学家瑞利开始出面了。他认为黑箱子里装满的光，是振动着的波的汇集。他从这一公正的解释出发，施展了他的独到的本领。

箱中振动着的波，由于在两侧有波节生成，所以，可以认为波是受到限制的。把波长分开来考虑时，则属于各自区划的波数是可以计算的。而且，如果分配给那些波的能量是相等的话，那么光的强度的分布也就能够确定。这样导出来的公式，果然就把维恩的公式中对长波的光的分布不适用的一部分，得到了很好的解释。

可是，当时的正统派并没有因此而得到胜利。瑞利的公式尚存在着很大的缺欠。如计算箱中两端生成的波节的波数时，属于长波范围的少，可是属于短波范围、相互差别不大的波却是数不尽的。如果把等量的能量分配给每一个波的话，那么分给短波的那一份是非常大的。这样一来，最后在箱子里必须有无限的能量才行。上哪儿去找这种具有无限能量的箱子呢？

显然，这是与实际相违背的。所以，瑞利的公式跟维恩的公式相反，它能够解释长波部分，可是关于短波这一部分根本就不行。如果还按照前面类似的说法，它是适用于红色的“红的公式”。②

（摘自《量子力学的世界》，[日]片山泰久著，李尧秋、石晶洁、郭喜代译，辽宁人民出版社，1982年，有改动）

与实验数据比较，在短波区维恩公式符合得很好，但在长波范围则有虽不太大但系统的偏离。瑞利公式与之相反，长波部分符合得较好，但在短波波段偏离非常大（图 17-1）：当 $\lambda \rightarrow 0$ 时，波长极短的辐射（光谱的紫外部分）能量趋于无穷，从而总辐射本领也趋于无穷。这显然是荒谬的。

5. 黑体的经典辐射定律

黑体 不同的物体由于它有不同的结构，因而它对外来辐射的吸收，以及它本身对外的辐射都不相同。但是，有一类物体其表面不反射光，它们能够在任何温度下吸收所有的电磁辐射，这类物体就叫做绝对黑体，简称黑体。系统处于热平衡时，黑体具有最大的吸收本领，因此它也就有最大

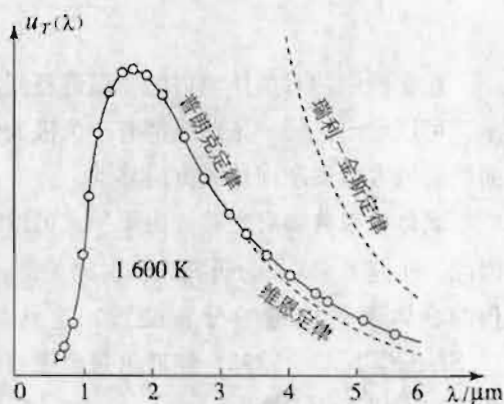


图 17-1 各黑体辐射公式与实验的比较

① 维恩假设气体分子辐射的频率 ν 只与其速度 v 有关，从而得到与麦克斯韦速度分布律形式很相似的公式

$$u_T(\lambda) = \frac{a c^2}{\lambda^5} e^{-\beta c / \lambda T}$$

式中， a 、 β 为常量，此公式称为维恩公式。

② 瑞利从能量按自由度均分定律出发，得到如下公式

$$u_T(\lambda) = \frac{8\pi}{\lambda^4} kT$$

式中， $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 为玻耳兹曼常量。此公式称为瑞利—金斯公式。——编者注

的辐射本领。于是,研究黑体辐射的规律对于研究热辐射的规律就具有了普遍意义。

黑体的吸收本领与频率和温度无关,它是等于1的常数。设以 $\epsilon_{\nu,T}$ 和 $a_{\nu,T}$ 表示绝对黑体的发射和吸收本领,则 $a_{\nu,T}=1$,即基尔霍夫定律可写成:

$$\frac{E_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = \frac{\epsilon_{\nu,T}}{a_{\nu,T}} = \epsilon_{\nu,T} = f(\nu, T)$$

由此可见,普适函数 $f(\nu, T)$ 就是绝对黑体的发射本领。

黑体辐射的实验装置 在一个物体的表面涂上一层黑色的散射层,它就近似成为一个黑体。若在物体中做一个空腔,空腔内壁涂上一层炭黑,通过一个小孔与外面相通,这个小孔对于照射到它上面的任何辐射都将全部吸收。因此,这个空腔的小孔就是一个理想的黑体。图17-2所示的实验装置,就是实验室中利用在绕有电热丝的空腔上开一个小孔来进行黑体辐射实验的。

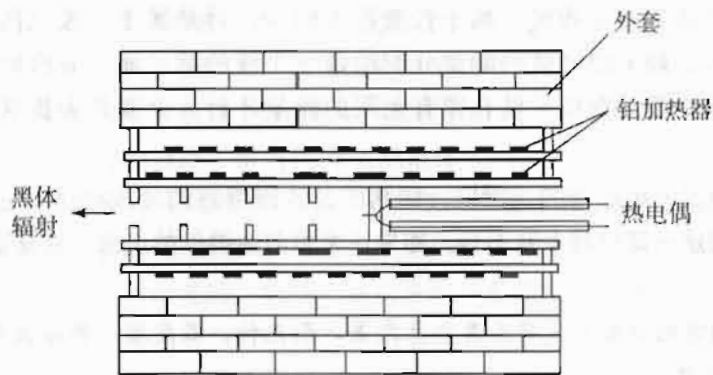


图 17-2

在实验中,对黑体辐射的光谱进行测定,所得的光谱能量分布曲线如教科书图17.1-2所示。可以看出:每一条曲线都有一个极大值。随着温度上升,黑体的发射本领迅速增大,并且曲线的极大值逐渐向短波方向移动。

黑体的经典辐射定律 由第一式可以看出,黑体的发射本领 $\epsilon_{\nu,T}$ 等于普适函数 $f(\nu, T)$,因此,研究 $\epsilon_{\nu,T}$ 就成为研究热辐射的关键,找出这个函数的形式,也就是从理论上解释实验所得的黑体辐射能量的分布曲线,这是热辐射理论的基本问题。1879~1884年,斯忒藩(J. Stefan, 1835—1893)和玻尔兹曼先后从实验和理论上指出黑体的辐射通量与绝对温度 T 的四次方成正比,即

$$\Phi_0(T) = \int_0^{\infty} \epsilon_{\nu,T} d\nu = \sigma T^4$$

这就是斯忒藩定律,其中

$$\sigma = 5.67032 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

是一个普适常数,叫做斯忒藩—玻尔兹曼常数。

6. 康普顿效应的理论计算

图17-3表示入射光子的动量 $\frac{h\nu}{c}$ 、散射光子的动量 $\frac{h\nu'}{c}$ 和碰撞后的电子的动量 mv 三个矢量之间的关系。由动量守恒条件得

$$(mv)^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - \frac{2h^2\nu\nu'\cos\theta}{c^2}$$

考虑到电子在散射后可能有很大的反冲速度,所以在列出能量守恒方程式时应当注意电子质量

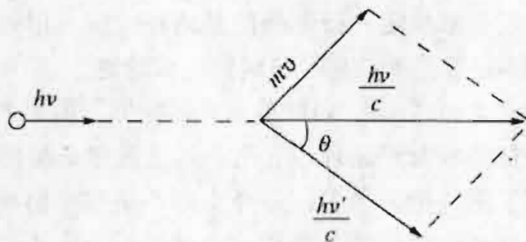


图 17-3

与速度的关系。电子原来是静止的，能量为 m_0c^2 ；碰撞后，能量为 mc^2 。光子的能量原来为 $h\nu$ ，碰撞后为 $h\nu'$ ，所以能量守恒的条件为

$$h\nu + m_0c^2 = h\nu' + mc^2$$

即

$$mc^2 = h(\nu - \nu') + m_0c^2$$

取其平方，得

$$m^2c^4 = h^2\nu^2 + h^2\nu'^2 - 2h^2\nu\nu' + m_0^2c^4 + 2hm_0c^2(\nu - \nu')$$

将第一式各项乘以 c^2 ，得

$$m^2v^2c^2 = h^2\nu^2 + h^2\nu'^2 - 2h^2\nu\nu' \cos \theta$$

把这两式相减，得

$$m^2c^2(c^2 - v^2) = m_0^2c^4 - 2h^2\nu\nu'(1 - \cos \theta) + 2hm_0c^2(\nu - \nu')$$

按狭义相对论质量关系式， $m_0^2c^4 = m^2c^2(c^2 - v^2)$ 即得

$$h\nu\nu'(1 - \cos \theta) = m_0c^2(\nu - \nu')$$

利用关系式 $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ， $\nu' = \frac{c}{\lambda'}$ ，上式可写为

$$\frac{hc^2}{\lambda\lambda'}(1 - \cos \theta) = m_0c^2 \frac{c(\lambda' - \lambda)}{\lambda\lambda'}$$

最后得

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos \theta) = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

h 、 c 和 m_0 都是已知的，则可算出

$$\frac{h}{m_0c} = 0.00241 \text{ nm}$$

这和观察结果符合。

这种理论计算和实验结果的符合，说明了能量守恒和动量守恒两个定律在微观现象中也严格地适用。大量的其他实验也都证实了这个结论。

7. 波动力学的基本概念

E. 薛定谔

(本文是作者 1933 年 12 月在接受诺贝尔奖金时所作的讲演。)

一束光线在经过光学仪器，诸如望远镜或摄影机的透镜时，会在每个折射面或反射面处改变方向。光线的路径可以得出，只要知道两个关于方向改变的简单定律：一个是斯涅耳几百年前发现的折射定律，一个是阿基米德两千多年前就熟悉的反射定律。作为简单例子，在图 17-4 中画出一条光线 A—B，它在两个透镜的四个折射面上按斯涅耳定律折射。

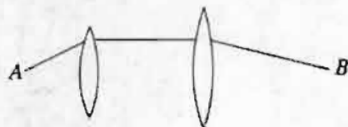


图 17-4

费马从一个更一般的观点来确定一条光线的总路径。在不同的介质里光的传播速度不相同，而辐射路径表现为好像是光必得尽快地到达目的地。（附带说一下，本例中可以在光的途径上任选两点作为起点和终点）。稍微偏离光线实际上所走的途径，都意味着耽搁时间。这就是著名的费马光行最短时间原理，它用一句话就以卓越的方式确定了一束光线的全部命运；而且它还包括了更一般的情形，即介质并不是在个别界面上突然改变，而是一处一处逐渐地改变着。地球的大气层就是这样一个例子。光束从外面透入越深，它就在越来越稠的空气中越走越慢。虽然光线传播速度上的差别极其微小，费马原理在这情况下还是要求光线应该向地面弯曲（图 17-5）。因而，它在较高处的“较快”层中停留较久，而到达目的地比沿较短的直线还要快些（图中虚线，暂时不必注意方块 $WWW'W'$ ）。我想，你们中间大概很少人注意过，当太阳接近地平线时，它显得并不圆，而是扁的；它的铅直直径显得缩短了一些。这就是光线弯曲的结果。

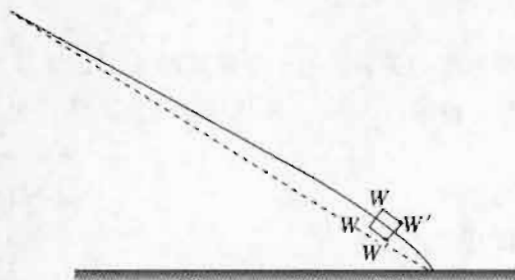


图 17-5

按照光的波动理论，光线严格地讲，只有虚构的意义。它们并不是某些光的粒子所走过的实在途径，而是一个数学手段，即所谓波面的正交轨线，可以说是想象中的指导线，其指向与波面垂直，而波面就沿这方向行进（图 17-6）。这里给出的是同心球形波面及其相应的直射光线这种最简单情况，而图 17-7 则表示弯曲射线的情况。令人惊讶的是，像费马原理这样重要的一般原理，竟然只是直接谈论这些数学指导线，而不涉及波面，以致人们倾向于认为它不过是数学上的珍品而已。远非如此。只有从波动理论的观点它才能被人确切地理解，而不再是个神赐的奇迹。从波动的观点看，把光线的所谓弯曲当成波面的转向，它就好理解了，这种转向只要波面上相邻各部分速度不同就必然发生。就像前进中的一排士兵在执行“右转弯”口令时要采取大小不同的步伐，右端那兵步子要最小，左端那兵步子要最长。在大气折射那个例子里（图 17-5），波面 WW 一定会向右转向 $W'W'$ ，因为它的左半部处于稍微高些、稀薄些的空气中，因而前进得比在低处的右半部快些。（顺便，我愿指出斯涅耳的观点失败的一个情况。在水平方向射出的一条光线本该保持水平方向，因为在水平方向上折射率并不改变。但实际上，水平方向的光线弯曲得比其他方向更厉害，这是波前转向理论的明显结果。）仔细研究一下就可以发现，费马原理完全等同于平凡、显见的一句话，即只要存在光速的局部不同情况，波前就必将按前述方式转向。我不能在这里详加证明，但我打算使它看上去真实。请你们再次想象前进中的一排士兵。为了保证队列整齐，让他们用一根长棍互相连结，这根棍子每人紧握手中。关于方向并不发布什么口令。唯一的口令只是：每个人或走或跑，能多快就多快。如果地

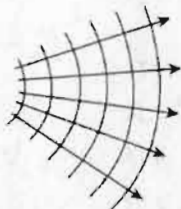


图 17-6

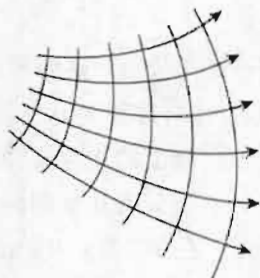
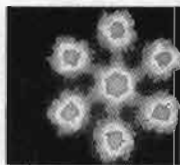


图 17-7



形的改变很缓慢，那么我们看到，前进得快些的，一会儿是队伍右侧，一会儿是队伍左侧，方向的变化全是自发的。过了一段时间就会看出整条路径不是条直线，而是稍有弯曲的。这条弯路就是，按照地形情况，在每一瞬间都能最快地到达目的地的路径，这说法至少是可信的，因为每人都尽了最大的努力。还可以觉察到，转向总是指向地形情况较坏的地方，到最后看上去就好像士兵们都故意“绕”过那些只能慢走的地方。

费马原理因而就像是波动理论的微不足道的精灵。所以当哈密顿发现了，处在力场中的质点的真实运动（例如环绕太阳沿轨道运行的行星或投在地球引力场中的石子）都遵守的一个类似的普遍原理时，这真是个值得纪念的时刻。那个原理从此就以发现者的名字命了名，并使发现者从此出了名。诚然，哈密顿原理并没有确切地说，质点会选择最快的途径，可是他说了一些非常相似的东西，与光线的最短时间原理非常接近，简直使人感到是谜。好像是大自然用完全不同的方法两次实现同一个定律：第一次用的是光，那是显而易见的射线运动，再一次使用质点。这可是远非显见的，除非按某种方式也把波的特性赋予它们。而这一点，好像并不可能办到。因为当时证实力学定律使用的“质点”都是大的、可见的、有时是非常巨大的物体，就是行星，对它们来说，绝对谈不上什么“波动性质”。

物质的最小的、基本的组成部分，我们今天比较专门地称之为“质点”的，在那时还是纯粹的假说。只是在发现了放射性之后，不断改进的测量方法才使我们能够详尽地探讨这些粒子的性质，现在又使我们能用威耳孙的卓越方法（立体摄影测量术）摄下这些粒子的途径并精确地测量它们。就测量的结果看，适用于大物体行星等的力学定律也同样适用于粒子。而且，还发现了，分子和单独的原子都不能认为就是物质的“最终的组成部分”了；即使原子，也是个高度复合的结构。在我们头脑中已形成了原子是由粒子组成的这幅图景，这图景和行星系有某种相似。很自然的，我们起先会认为在大尺度上非常令人满意的运动定律在此也会行之有效。换言之，哈密顿力学——我已说过，它的顶峰是哈密顿原理——也被用于原子的“内部生活”。哈密顿原理和费马光学原理二者之间的密切类似性已被遗忘殆尽。偶然有人记起它来，也不过是把它当做数学理论上的一笔趣谈罢了。

现在，除非进一步研究细节，就很难正确阐明原子的古典力学图像的成功或失败。一方面，哈密顿原理已被证明是最忠实、可靠的指导理论，简直就是不可或缺的。另一方面，为了正视事实，人们又得忍受所谓量子情况、量子假定这些全新、令人不解的假说所造成的粗暴干涉。刺耳的不谐和音在古典力学交响曲中——不过很奇怪却都是熟悉的——好像是出现在同一乐器上。用数学术语我们可以这样表述：哈密顿原理只假定某个积分应取极小值，但这个假定并不能给出这个极小值；而现在则要求这个极小值限于是一个普适自然常数，即普朗克的作用量子的整数倍。这真突然。情况几乎令人绝望。即使古老的力学全部垮台，也不见得比这样更糟。那样的话，发展一套新力学体系的道路反而扫清了。但面对的艰难事实却是，要拯救老体系的灵魂——老体系的灵感在微观世界里仍然保持影响——而同时又要说服它接受量子条件，不是作为一种粗暴的干涉，而是要发自其内心深处。

出路，前面已经指出，就在于是否可能把质点力学过程所依据的波动机制的作用加诸哈密顿原理，就像在有关光的现象和支配这些现象的费马原理上，人们早已习以为常所做的那样。诚然，一个质点的单独一条路径失却物理意义，变得像单独一条光线一样地虚构。然而，此理论的精髓，即最小值原理，不仅仍然正确，而且只有在类波的观点上才能显出其真正而简单的意义，像以前已解释过的那样。严格说来，新理论实际上并不新，它完全是老理论的有机发展，人们甚至于想说，只是老理论的更细致的阐述。

那么,这个新的更“细致的”阐述怎么又导致显然不同的结果呢?又是什么东西使得它,用到原子上的时候,能排除旧理论解决不了的困难呢?又是什么使它能将粗暴的干涉变成可以接受的,甚至使之变成自己的了呢?

最好的办法还是与光学作对比。以往我曾把费马原理叫作光的波动理论的精髓,这完全正确;不过这并不等于不要对波动过程本身进行更深刻的研究。所谓光的折射和干涉现象,只有在深入研究波动过程以后才能够理解,因为重要的不只是波的最后到达地点,还有在某一给定瞬间它到达那里是个波峰还是个波谷。在古老的、较粗糙的实验里,这些都被视为细节而不予考察。一旦它们受到注意,再由波动方法作出正确解释之后,就容易设计出一些实验,使光的波动性质不仅在细节上,而且在现象的整体性质上大规模地得到表现。

让我用两个例子来说明,第一个是光学仪器的例子,例如望远镜、显微镜之类。目的是要得出清晰的像,也就是说,要使从一点发出的光线还要聚集到一点上,即所谓焦点上(图17-8a)。起初人们以为只是几何光学上的困难从中作梗:这种困难也确实是不小。后来发现,即使在设计得最好的仪器里,如果每条光线与左右的光线无关地径自服从费马原理的话,光线的聚焦还是比预计的相差很远。光从一点发出又被仪器接受之后,在仪器后面不再聚集到一个点上,而是分布在一个圆形区域上,即所谓的衍射盘,否则的话,常常只是个圆环,因为孔径和透镜外廓通常是圆。我们称之为衍射的这种现象其原因乃在于,并非由一点发出的所有球面波

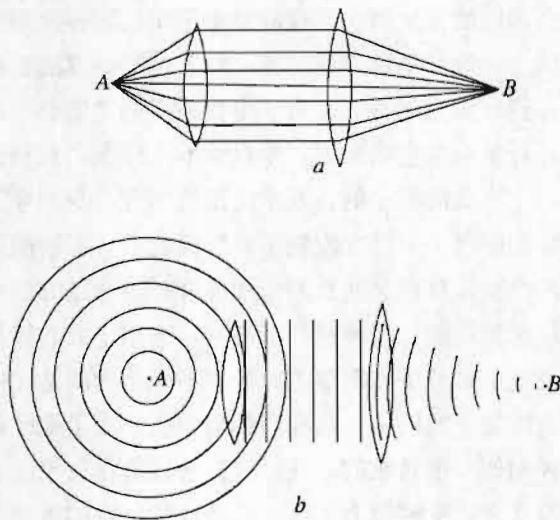


图 17-8

全能被仪器吸取。透镜的边缘以及任一孔径只切下波面的一部分(图17-8b),而且——如果你允许我用一个更加有启发性的表达方式的话——受了伤的边缘部分就阻碍切实地重聚到一点上,因而就产生有些模糊的像。模糊的程度与光的波长密切相关,而由于这个深刻的理论关系,这是完全不可避免的。虽然当初没被人们注意到,却正是它控制并限制了现代显微镜的性能,而所有其他的像差都已经为人们掌握了。比光的波长并不粗糙甚至更精细些的结构所得出的像,比起原物来,只是约略相似,或者完全不相似。

另一个、甚至是更简单的例子,是由小的点光源把不透明的物体投在屏幕上的阴影。为了得出阴影的形状,每一条光线都要受到追踪。还要确证,不透明物体是否阻碍它到达屏幕。阴影的边缘是由刚好擦着物体边缘的光线勾画出来的。经验说明,阴影边缘总不能绝对清晰,不论光源多小,也不论投出影子的物体棱角多么整齐。原因和第一个例子里的一样,波的前沿就像被物体一切两断(图17-9),这个伤害痕迹的后果就是阴影的边缘模糊。这一点,如果每条光线都是独立的实体,各自前进而与相邻的毫无关系的话,那就无法解释了。

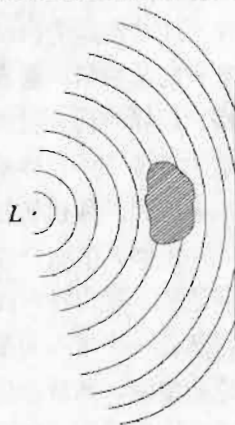
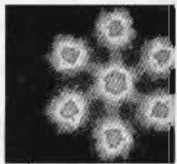


图 17-9

这个现象——也叫做衍射——在大的物体身上一般是不太显著的。如果成影物体至少在一个维上很小的话,衍射首先表现为影子根本不能



形成，而其次——要显著得多——这个小物体好像自己变成了光源，向各个方向射出光线（当然，主要是与入射光线交角很小的那些方向）。你们大家一定都很熟悉光束射进暗室后看到的所谓“灰尘点”。在小山顶上，后面有太阳照着的薄草片和蜘蛛网，以及背后有太阳照着的散开的卷发，都常常神秘地被衍射的光照亮。还有烟和雾所以能为人们看到也是依靠它。衍射光并非来自物体本身，而是来自挨近的周围，就是衍射光跟入射光前沿形成相当大的干涉的那个区域。有趣的是，对以后来说也很重要，可以观察到，这个干涉区域，不论干扰物体有多么小，经常地在每个方向上至少有一个或者数个波长的长度。所以我们再一次观察到衍射现象和波长之间的密切关系。这件事也许最好再用另一种波动过程，即声音，来说明。因为波长要长得多，其数量级是厘米或米，在声音中成影退居次要、而衍射扮演主要的、实际上十分重要的角色：我们很容易听到某人在高墙背后或在屋角转弯处喊叫，尽管不能看到他。

让我们从光学回到力学去，把二者之间的相似研究透彻。在光学上，旧的力学体系相当于聪明地处理彼此无关的孤立的光线。新的波动力学相当于光的波动理论。由旧的观点改到新观点，使我们获益之处就在于能够容纳衍射现象，或者，把话说得更好一些，所得到的是那些东西，它与光的衍射现象严格相似，而且总的说来并不重要，否则的话旧的力学观点也就不会长久以来曾经令人满意过。可是，也很容易臆测，那个被忽视的现象还会在某些情况下令人注目，还会全面地支配力学过程，还会用不可解之谜来拷问旧体系，如果整个力学体系在范围上可以跟“物质波”的波长相比的话。物质波在力学过程中所起的作用跟光波在光学过程中所起的作用是一样的。

这就是那原因，为什么在微小的体系里，即在原子中，旧观点必然要失败。旧观点虽然在大的力学过程中仍然是个很接近的近似，在数量级为一个或几个波长的领域里的细小的相互作用上就不再适用了。人们很惊奇地观察到，这些奇怪的附加要求怎样自发地从新的波动观点里发展出来，而同时这些要求都得强加于旧观点之上，为了使它们适应原子的内部活动并为观察到的事实提供解释。

这样，全部问题的突出之点就是，原子的直径和假设的物质波的波长大体上属于同一数量级。现在你一定会问，我们在对物质结构的继续分析中在每一点上都遇到较长的数量级，这是碰巧的事呢，还是在某种程度上是可以理解的呢？你还会进一步问，我们怎会知道事情是这样的呢，因为物质波是这种理论提出的一个全新要求，在别处是根本没有的。也许，这只不过是不得不提出的设想吧？

数量级间的一致并不是来自偶然机遇，对此也没有必要作什么特别的假设。它是明显地从这理论中自然地得出来的。原子中很重的核比原子小很多，因为在下面的论述中可以看成一个点吸引中心，这件事可以认为已被卢瑟福和查德威克做的 α 射线的散射实验所证实。不谈电子，我们引出假设的波，它们的波长完全随便，因为我们对之还一无所知。这就在计算中留下了一个字母，就用 α 吧，来代表这个未知量。可是，在这类计算中我们早已习惯于此，而这也不妨碍我们计算出原子核在这些波里定会产生一种衍射现象，就像一个灰尘微粒在光波里所产生的那样。相似地，可以知道，围绕着核周围的干涉领域的大小和波长两者之间有一个密切的关系，这两者还属于同一数量级。这是什么呢？我们尚不得知。可是最重要的一步现在有了：我们认为干涉区域，即衍射晕轮，就是原子，我们断定，实际上原子只不过是原子核所俘获的电子波的衍射现象而已。原子的尺度和波长属于同一数量级，从此不再是件偶然的事：它是理所当然的事。两者的数值我们都不知道，因为在计算中还有一个未知数，被称为 α 的。可能确定其数值的方法有两个，可以互相验证。首先我们可以这样选择 α ，使原子生命的表现，首先是它所发射的光谱线，

在数量上都正确；这些毕竟都是可以精确测量出来的。其次我们可以这样选择 α ，使衍射晕轮取得原子所要求的尺寸。这两个方法所确定的 α （第二个方法显然不会精确，因为“原子的尺寸”还是个没有明确定义的名称）彼此完全一致。第三，也是最后的，我们可以指出，仍然不知道的这个常数，在物理学上，事实上并不具有长度的量纲，而有作用的量纲，即能量乘时间。显然的一步应该是，用普朗克的普适作用量子来代替它，作用量子由于热辐射定律是可以准确知道的。现在可以看到，我们以完全的、现在是相当可观的准确性，回到了第一个（最准确的）确定方法上去了。

定量地说，这个理论因此只使用最少量的新假设。它只包含一个可用的常数，应该给它一个在旧的量子理论中已熟悉的数值，首先为了能给干涉晕轮一个能使它合理地等于原子的尺寸，其次，要能定量地并正确地估计原子的一切生命表现，它所辐射的光，离子化能量，等等。

我一直企图以最简单的形式把物质波理论的基本概念呈现在你们面前。现在我得承认，由于我不愿意一开始就去纠缠那些概念，我画了百合花^①。我指的不是所有足够地、细心地得出的结论都被经验证实了所达到的高级程度，而指的是得到那些结论时使用的概念上的平易、简单。这里我不谈数学上的困难，它们最终总表现为微不足道的，而只谈概念上的困难。当然，说一下我们从弯曲路径这个概念转到与之正交的波面体系，这很容易。可是波面，即使我们只考虑它们的一小部分（图 17-10），也至少包括很窄的一束弯曲路径，对于它们全体波面有着同样的关系。按照旧观点，而不按照新观点，在每一个具体的个别情况下，其中每一个“实际走过的”与其他“仅仅是可能的”是有区别的。这里我们面临两种逻辑关系的强烈对立：



图 17-10

不是这个就是那个（质点力学）

与

既是这个也是那个（波动力学）

如果我们肯完全放弃旧体系代之以新体系，那么问题就不大。不幸的是，事情并非如此。由波动力学观点看来，质点可能路径的无限多排列只是虚构的，其中并没有哪一条，比其他各条有优先权成为在某一情况下真正被走过的路径。可是，我已提到过，我们在某些情况下已经真实观察到这种粒子的路径。波动理论，或者完全不能，或者只能很不完全地解释这点。把所见到那痕迹解释成只不过是同样可能的路径的细束，在那些路径间波面建立了交叉联系，这样做困难得令人困惑。然而，必须有这些交叉联系才能理解衍射现象和干涉现象，两者可以由同一粒子以同样的可信程度表现出来——而且是在大尺度上，而不只是原子内部的理论观念的一个结果，这一点我们已提到过。公认的情况是，在每个具体的个别情况我们总能有办法，不至于使两套不同的观点在某些实验结果上导致不同的期望。可是，我们不能总求救于诸如“真的”或“唯一可能的”这种古老、熟悉、好像不可或缺的用语。我们永不该去说事情究竟是什么样，或究竟发生了什么，而只能说在某个具体的情况下，什么东西会被观察到。我们是不是只能永久满足于此呢？在原则上，是的。在原则上，那条主张里没有新东西，即归根到底精确科学还是只应致力于描述能真正观察到的东西罢了。问题只是，今后我们是否应该避免把描述跟关于世界实质的一个明确的假说连在一起。即使今天，希望宣称这种让步的已大有人在。但我相信，这意味着自己把事情弄得过于容易了吧。

^① 画百合花的意思是夸大优点，大肆称赞之意。语出莎士比亚《约翰王》第四幕。——译者注。

我想像下面这样来说明我们知识的现状。射线或者粒子的路径相当于传播进程的纵向关系（也就是沿着传播方向的），而波面则相当于横向关系（也就是与其垂直的）。两种关系无疑都是真实的：一个由粒子路径的摄影证明，另一个由干涉实验证明。结合两者成为一个体系，至今尚不可能。只有在极端的情况下，才会有或者是贝壳形的横向关系，或者是放射状的纵向关系，独占优势到这样的程度，以致我们认为能够单独采用波动理论，或者单独采用粒子理论。

（摘自《原子的模型》，[美] G. 霍尔顿等编，程毓徵译，文化教育出版社，1986 年）

（二）联系生活、科技和社会的资料

1. 光电管

应用光电效应原理制成的光电转换器件。在抽出空气的玻璃壳内，半面涂上光电发射材料做阴极，并封入球状或环状的金属阳极，就制成了真空光电管。可见光光电管可用普通玻璃制作；紫外线光电管必须用石英玻璃制作。如在管内充入少量惰性气体，就成为充气光电管。光电材料是多种多样的，可用锂、钠、钾、铷、铯等金属，银，以及铋与钾、钠、铯等制成的复合材料。应根据使用的光谱波段，选用量子效率（释放的电子数与入射的光子数之比）高和暗电流（完全没有光照时的板极电流）小的光电材料。

充气光电管，工作中会产生气体放电电流，使光电管的灵敏度增大几倍乃至十几倍。但如果电压过高，会产生辉光放电，无法用光照控制电流，阴极材料也会损坏。因此，在电路里要串接高阻值的保护电阻。真空光电管具有稳定性好，响应迅速、寿命长、光照和输出电流间有良好线性关系等优点。

光电管在光度测量、有声电影、电送传真、自动计数、自动控制、自动报警等方面有广泛应用。但由于它灵敏度低、体积大、易破碎，正逐步为固体光电探测器所取代。

2. 光学录音

有声电影中使用的在胶片上记录声音信号的录声系统。有声电影片的主片旁边有一条记录声音信号的窄带（图 17-11），叫做声道，也叫声迹。在 35 mm 的胶片上，声道位于齿轮洞内侧约 2.5 mm 处。

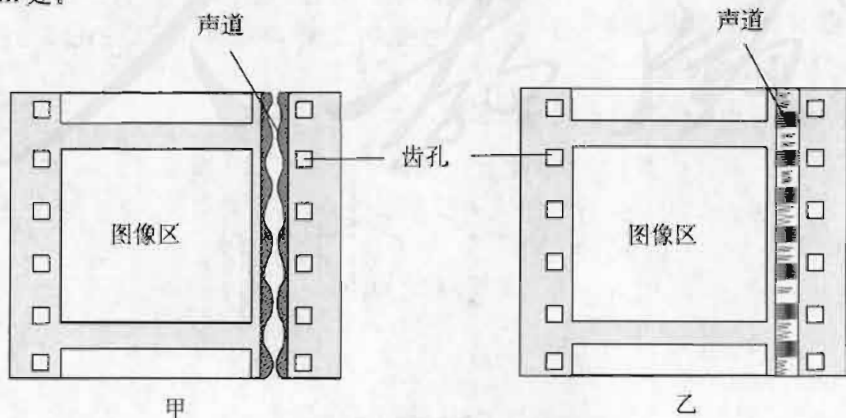


图 17-11 电影胶片上图像区和声道的位置

甲 变面积式声道 乙 变密度式声道

光学录声的原理是：先把声波通过传声器转变成电振动，产生电脉冲。电脉冲经放大后进入光调制器。调制器依照电信号改变射向胶片边缘的光束通路上的狭缝宽度，使在狭缝后面匀速运动的胶片感光，成为声道。根据光调制器的不同类型，声道有两种：一种是变面积式的，一种是变密度式的。前一种声道的宽窄是变化的；后一种声道宽窄不变，变化的是它的浓淡和密度。目前，变面积声道逐渐取代了变密度声道。下面简单介绍变面积调制系统。

图 17-12 是变面积式光学调制系统的原理图。三角形孔径由灯和透镜系统均匀照明。孔径的像由检流计反射镜反射后聚焦到机械狭缝上，狭缝再聚焦成像在胶片上。反射镜随检流计线圈的电流变化而围绕平行于纸面的轴摆动，三角孔径的像就在机械狭缝上上下下移动。结果负片声道曝光部分的宽度就随电流计的旋转振动面变化，形成变面积式声道。

放映电影时，灯光通过会聚透镜聚焦在机械狭缝上，狭缝再聚焦成像在胶片的声道上。当声道以恒定速率通过光束的聚焦线时，透过声道的光照射到光电管上。照到光电管上的光量随声道的宽窄而起伏变化。光电管又把这起伏变化的光按照同样的变化转换成起伏的电流，输送到放大器和扬声器中，就把声道中的信号还原成声振动。图 17-13 是有声电影放声系统的原理图。

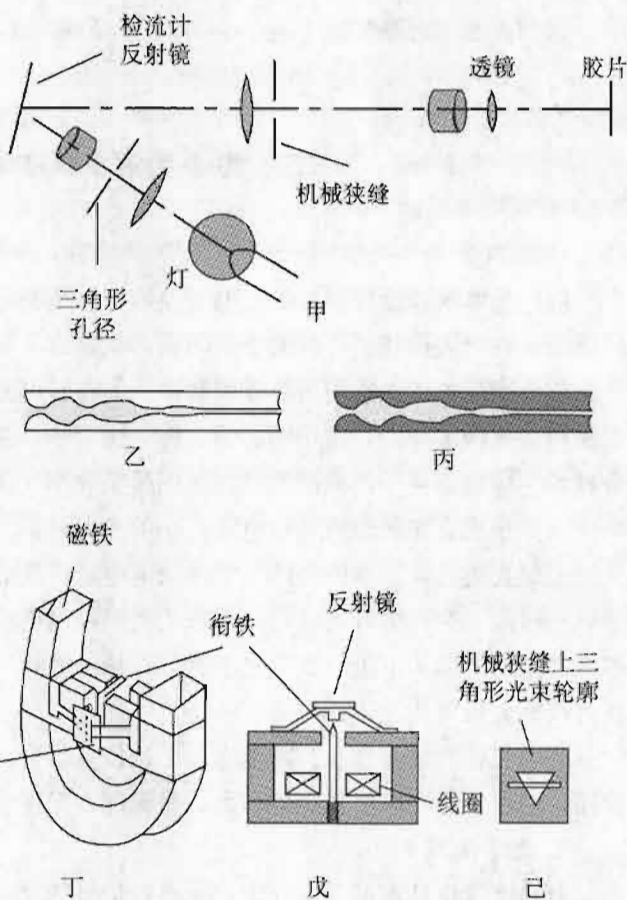


图 17-12 变面积式声道录声原理

甲 录声系统图 乙 负片声道 丙 正片声道
丁 透视图 戊 剖视图 己 机械狭缝

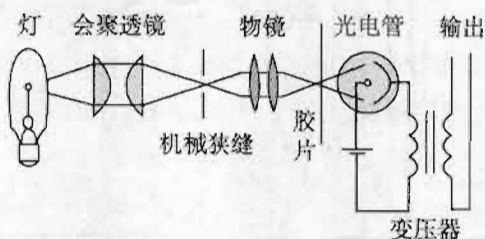
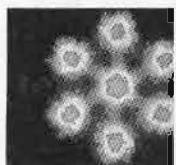


图 17-13 有声电影放声系统原理图

3. 量子物理与现代生活

20 世纪初建立的相对论和量子力学被认为是近代物理学的开始。虽然相对论以深奥难懂



著称,然而这个关于时间和空间的理论还是吸引了公众的广泛兴趣。但对于 20 世纪人类的生产生活,原子层次的世界其实更为重要。虽然公众并没有注意,但是对于大多数人来说,量子力学比相对论更为有用。

当你走到一家商店,在光电池电子眼探测到你的到来后,门自动打开了。这种传感器由两个电极夹着一块半导体制成,可以对光做出响应。当光强变化时,例如光束被截断或总体亮度减小,传感器产生的电流大小发生改变,与相应的电路耦合,就可以触发将门打开。这种传感器代表了光电效应的一种应用。当发生光电效应时,光照在金属上使电子从金属中飞出。爱因斯坦用光子的概念解释了光电效应的现象,并获得了 1921 年的诺贝尔奖。光电效应是有广泛应用前景的一种物理效应。其中最为直接的一项应用,是光电倍增管,这已成为测量光子能量和动量的标准器件。在日本神冈地区探测中微子的地下大型实验室中,用的就是这种特殊设计的大型光电倍增管。光电效应还是决定辐射热传导过程的最主要因素,在原子弹和氢弹理论所用到的辐射流体力学中,要从理论上算出其热传导系数的大小,其中最主要的过程,就是精确计算光电效应的贡献。

光电效应在生活中的很多电子设备上都有广泛的应用:黄昏时打开路灯、调控复印机中碳粉的浓度、控制相机的曝光时间等,事实上,它涉足于任何控制或响应光的电子器件中。光电效应器件甚至应用在呼吸检测仪中,在检测气体与酒精作用后,光电池显示出颜色的改变。在光电效应的诸多应用中,当前最值得关注的是太阳电池。从 1950 年开始,太阳电池已经可以将 15% 到 30% 的入射光转化成电能,为计算机、手表、家庭环境检测、轨道卫星和火星探测车提供能量,世界各国都在大力鼓励太阳能光电产业的发展。据 2004 年 12 月 31 日《科学日报》报道,“日本 1992 年启动了‘新阳光计划’,同时颁布了新的净电计量法,要求电力部门以商品价格购买光伏电量,并实行强补贴政策等。而今日本成为世界光伏发电最大的市场,光伏产业 2002 年生产能力增长了 47%,2003 年增长了 45%;2003 年日本光伏组件生产占世界的 50%,世界前 10 大厂商有 4 家在日本。德国新可再生能源法规定了光伏发电上网电价,大大推动了光伏市场和产业发展,使德国成为继日本之后世界光伏发电发展最快的国家。”

回到商场,你还会看到琳琅满目的影音资料,这些电影大片、音乐 MTV、运动健身教学录像等各种资料都存放在各式各样的 DVD 中。虽然在 DVD 播放机中使用着某种光电池,但是从量子的角度,更有趣的是它们发出红色相干光——激光。当今无处不在的激光的存在应该归功于量子力学的理论,特别是科学家对于辐射和原子的认识。

由量子物理学发展出的激光物理,与半导体物理一起成为现代信息科技的主要基石。光的受激辐射的原理是爱因斯坦量子辐射理论的著名结论。激光具有高强度、高单色性、高相干性等优异品质,必须以量子理论予以研究。激光被广泛地应用于科学实验,制成激光雷达、激光制导以及激光武器等等。尤为重要的是激光通信,它可以通过光纤网络高速而大容量地实现通信,所谓“信息高速公路”就是利用光纤来实现信息量大于每秒 10 Gb 以上的通信网络。这已成为当代新经济的重要内涵,而描述光纤通信的光的传播的方程式,正是二维的量子力学方程。在日常生活中,除了 DVD 播放器、水平仪和指示器以外,激光器还在飞机环状陀螺仪、商用切割工具、医疗器械等方面发挥作用。

对于一个生活在 21 世纪初的人来说,更为重要的是,量子力学还开辟了一种全新的信息技术,使人类进入信息化的新时代。量子力学除了应用到原子、分子、原子核、粒子等微观体系外,还被应用到固体领域等复杂体系。固体物理以至凝聚态物理是近五十多年来最红火的学科,与人类目前的生产技术和日常生活的关系最为密切。固体物理起始于晶体结构探索和晶格

动力学研究,最具决定性意义的是能带理论的建立。能带可谓是作为量子理论基本概念的能级概念的一种推广,能带理论成为固体物理、尤其是半导体物理至关重要的理论基础。由各个不同的能带结构以及电子的填充情况,可以解释导体、绝缘体、半导体彼此相差很大的导电性质;或许可以说,正是利用能带结构,才开发出半导体这一在现代高新科技中的重要角色。而且根据量子力学,在这些半导体中,可以有电子导电、空穴导电等区别,从而又提出半导体的二极管、三极管等观念。后来又发展为集成电路,大规模集成电路的组合,成为现代电子计算机的技术基础。可以说,没有量子力学,就没有以电脑控制占主导地位的现代化工业。

此外,随着量子力学和狭义相对论再加上原子核物理的深入研究,共同开拓了一个新时代,人类进入了原子能时代,从而为人类找到了一种可以说是“取之不尽,用之不竭”的能源。超导也是一种宏观量子现象,此现象的发现以及BCS理论的建立,从固体物理中又延伸出一门独立的学科——超导物理。当量子力学向化学、生物学、天文学、地球科学等物质科学各领域延伸,触发产生了一些新的交叉学科,诸如量子化学、分子生物学和量子生物学、天体物理和现代宇宙学等。量子力学的基本原理随即成为了这些新兴学科的指导性原则;或者说,量子力学是现代物质科学的主心骨。譬如,分子设计是开发新材料、发展材料科学的关键,它依赖于量子化学及其计算手段的日益进展;量子力学的先驱薛定谔因其名著《生命是什么》被尊为分子生物学的先驱者,他在书中假设了生物体的遗传基因大分子的结构形式以及遗传密码的物质载体在分子层次上的特异征状;凝聚态物理已在生命科学中延拓、映照出生物凝聚态领域,所采用的实验探测方法和理论研究方法大多与立足于量子力学的凝聚态物理和量子化学的方法相仿,正由于这个领域的不断扩张,才构成了现代生物工程这一前沿科技阵地;在天体物理中,必须要用到量子力学处理那些密度很大的天体,如白矮星、中子星,甚至黑洞。可以说,量子物理与我们的现代生活已经密不可分。

五、补充习题

A组

- 关于热辐射,下列叙述中正确的有()
 - 一切物体都在辐射电磁波
 - 任何物体辐射电磁波的情况只与温度有关
 - 黑体辐射电磁波的强度按波长的分布只与黑体温度有关是因为能量量子化
 - 黑体能完全吸收入射的各种波长的电磁波
- 关于光电效应,下列说法中正确的是()
 - 在光电效应中,光电子的最大初动能与入射光的频率成正比
 - 用不可见光照射金属一定比用可见光照射同种金属产生的光电子的初动能要大
 - 对于某种金属,只要入射光的强度足够大,就会发生光电效应
 - 光电效应的发生基本不需要时间积累,只要入射光的波长小于金属的极限波长即可
- 用同一束单色光先后照射锌片和银片,都能产生光电效应。在这两个过程中,对下列四个量,一定相同的是_____,可能相同的是_____,一定不相同的是_____。
 - 光子的能量
 - 金属的逸出功
 - 光电子的动量大小
 - 光电子的最大初动能

4. 关于光的波粒二象性的实验, 下列说法中正确的有 ()

A. 使光子一个一个地通过单缝, 如果时间足够长, 底片上也会出现衍射图样

B. 单个光子通过单缝后, 底片上就会出现完整的衍射图样

C. 光子通过单缝的运动路线像水波一样起伏

D. 单个光子通过单缝后打在底片的位置呈现出随机性, 但大量光子通过单缝后打在底片上的位置呈现出波动的规律性

5. 一台功率为 P 的激光器, 发光效率为 η , 发出的激光在折射率为 n 的介质中的波长为 λ 。若真空中的光速为 c , 普朗克常量为 h , 则该激光器在时间 t 内辐射的光子数为_____。

6. 用频率为 ν 的单色光照射某金属时, 逸出光电子的最大初动能为 E_k , 若改用频率为 2ν 的单色光照射该金属, 则逸出光电子的最大初动能为_____。

7. 在 X 射线散射实验中, 若散射光波长是入射光波长的 1.5 倍, 则入射光光子能量 E_0 与散射光光子能量 E 的比值为_____。

8. 如图 17-14 所示, 光电管的阴极用极限波长 $\lambda_0 = 5\,000\text{ Å}$ 的钠制成。用波长 $\lambda = 3\,000\text{ Å}$ 的紫外线照射阴极, 当光电管阳极 A 和阴极 K 之间的电压 $U = 2.1\text{ V}$ 时, 光电流达到饱和, 其值为 $I = 0.56\text{ }\mu\text{A}$ 。

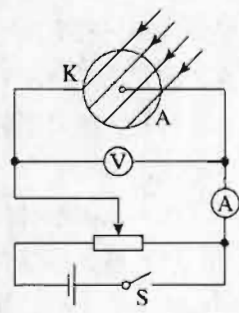


图 17-14

(1) 求每秒内由阴极 K 发射的光电子数目。

(2) 求光电子到达阳极 A 时的最大动能。

(3) 如果电压 U 不变, 而照射光的强度增大到原来的两倍, 则光电子到达阳极 A 时的最大动能又是多大? (普朗克常量 $h = 6.63 \times 10^{-34}\text{ J} \cdot \text{s}$)

9. 某金属发生光电效应的极限频率为 ν_0 , 当用频率为 ν 的单色光照射该金属时, 从金属表面逸出的光电子 (质量为 m) 的最短德布罗意波长为多少? (不考虑相对论效应)

10. 已知 $\frac{h}{4\pi} = 0.53 \times 10^{-34}\text{ J} \cdot \text{s}$, 试计算下列情况中速度的不确定量, 再比较两种速度的不确定量, 有何结论?

(1) 一个 $m = 1.0\text{ kg}$ 的小球, 测定其位置的不确定量为 10^{-6} m 。

(2) 一个电子质量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31}\text{ kg}$, 测定其位置的不确定量为 10^{-10} m 。

B 组

1. 光电池是利用光电效应制成的器件, 下列叙述中正确的有 ()

A. 光电池是把光能转化为电能的一种装置

B. 光电池中吸收了光子能量的电子都能逸出

C. 光电池在光线昏暗的地方无法工作

D. 光电池工作时, 入射光越强, 光电池转化的电能就越多

2. 用如图 17-15 所示的装置演示光电效应, 当用某种频率的光照射到光电管上时, 电流表 A 的读数为 I , 若改用更高频率的光照射, 此时 ()

A. 将开关 S 断开, 则没有电流流过电流表 A

B. 将变阻器的触头 c 向 b 端移动, 光电子到达阳极时的速度必将变小

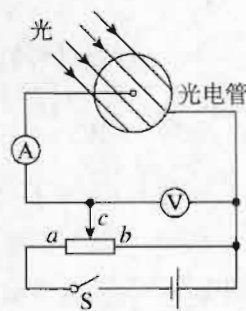


图 17-15

C. 只要电源的电压足够大, 将变阻器的触头 c 向 a 端移动, 则光电管中可能没有光电子产生

D. 只要电源的电压足够大, 将变阻器的触头 c 向 a 端移动, 电流表 A 读数可能为 0

3. 在单缝衍射实验中, 中央亮条纹的光强占入射光强的 95% 以上, 假设现在只让一个光子通过单缝, 那么该光子仍_____落在暗条纹处, 只是落在中央亮条纹处的可能性_____。

4. 若 α 粒子 (电荷量为 $2e$) 在磁感应强度为 B 的匀强磁场中只受洛伦兹力而做半径为 R 的圆周运动, 则 α 粒子的德布罗意波长为_____。

5. 已知某种紫光的波长是 440 nm , 要使电子的德布罗意波长为这种紫光波长的万分之一, 电子的速度为_____; 要把电子从静止加速到这样的速度, 加速电压为_____。(电子质量 $m=9.1\times 10^{-31}\text{ kg}$, $e=1.6\times 10^{-19}\text{ C}$, 不考虑相对论效应)

6. 假定太阳和地球都可以看成黑体, 已知单位时间内从黑体表面单位面积辐射的电磁波的总能量与黑体绝对温度的四次方成正比, 即 $P_0=\delta T^4$, 其中常量 $\delta=5.67\times 10^{-8}\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$ 。已知太阳半径 $R_s=696\,000\text{ km}$, 太阳表面温度 $T=5\,770\text{ K}$, 地球半径 $r=6\,370\text{ km}$ 。球的表面积公式 $S=4\pi R^2$, 其中 R 为球的半径。

(1) 太阳热辐射能量的绝大多数集中在波长为 $2\times 10^{-7}\sim 1\times 10^{-5}\text{ m}$ 范围内, 求相应的频率范围。

(2) 求每小时从太阳表面辐射的总能量。

(3) 若地球受到来自太阳的辐射可认为垂直射到面积为 πr^2 的圆盘上, 已知太阳到地球的距离约为太阳半径的 215 倍, 忽略其他天体及宇宙空间的辐射, 地球表面各处温度相同, 试估算地球表面的平均温度。

参考答案

A 组

1. A、C、D 2. D 3. A; C; B、D 4. A、D

5. 介质中波长为 λ 的光子在真空中波长为 $n\lambda$, 其能量为 $E=\frac{hc}{n\lambda}$ 。设激光器在时间 t 内发出的光子数为 N , 则 $N=\frac{\eta Pt}{E}$ 。由此可得 $N=\frac{\eta P t n \lambda}{hc}$ 。

6. $h\nu+E_k$ 7. 1.5

8. (1) 每秒内由阴极 K 发射的光电子数

$$n=\frac{It}{e}=\frac{0.56\times 10^{-6}\times 1}{1.6\times 10^{-19}}=4.0\times 10^{12}$$

(2) 阴极材料的逸出功 $W_0=h\nu_0=h\frac{c}{\lambda_0}=3.978\times 10^{-19}\text{ J}$, 光电子的最大初动能 $E_k=h\nu-W_0=h\frac{c}{\lambda}-W_0=2.652\times 10^{-19}\text{ J}$, 由动能定理 $eU=E'_k-E_k$ 可知, 电子到达阳极 A 的最大动能 $E'_k=6.0\times 10^{-19}\text{ J}=3.75\text{ eV}$ 。

(3) 入射光强度增大到原来的两倍, 但光子的能量不变, 光电管的阳极 A 和阴极 K 之间的电压不变, 故光电子到达阳极 A 时的最大动能不变, 仍为 $6.0\times 10^{-19}\text{ J}$, 即 3.75 eV 。

9. $\sqrt{\frac{h}{2m(\nu-\nu_0)}}$

10. 由不确定性关系 $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$ 得 $\Delta x \cdot m\Delta v \geq \frac{h}{4\pi}$ 。则小球的速度不确定量为

$$\Delta v \geq \frac{h}{4\pi m \Delta x} = \frac{0.53 \times 10^{-34}}{1.0 \times 1.0 \times 10^{-5}} \text{ m/s} = 5.3 \times 10^{-29} \text{ m/s}$$

电子的速度不确定量为

$$\Delta v \geq \frac{h}{4\pi m \Delta x} = \frac{0.53 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 1 \times 10^{-10}} \text{ m/s} = 5.8 \times 10^5 \text{ m/s}$$

结论: 宏观物体由于质量大, 不确定性极小, 不用考虑其不确定性关系。

B 组

1. A、D 2. D 3. 可能; 最大 4. $\lambda = \frac{h}{2eBR}$

5. 由德布罗意波长公式 $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$, 得电子速度

$$v = \frac{h}{m\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times \frac{1}{10\,000} \times 440 \times 10^{-9}} \text{ m/s} = 1.67 \times 10^7 \text{ m/s}$$

由动能定理 $eU = \frac{1}{2}mv^2$, 得加速电压 $U = 793 \text{ V}$ 。

6. (1) 最高频率为 $\nu_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 10^{-7}} \text{ Hz} = 1.5 \times 10^{15} \text{ Hz}$, 最低频率为 $\nu_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{3 \times 10^8}{1 \times 10^{-5}} \text{ Hz} = 3 \times 10^{13} \text{ Hz}$, 所以频率范围为 $3 \times 10^{13} \sim 1.5 \times 10^{15} \text{ Hz}$ 。

(2) 每小时辐射的能量 $E = Pt = \delta T^4 \times 4\pi R_s^2 t$, 代入数据得 $E = 1.38 \times 10^{30} \text{ J}$ 。

(3) 设地球表面温度为 T_s , 地球到太阳的距离为 $d = 215R_s$, 则地球单位时间吸收来自太阳的辐射能量为 $E_1 = \frac{\delta T_s^4 \times 4\pi R_s^2}{4\pi d^2} \times \pi r^2$, 地球单位时间向外辐射的能量为 $E_2 = \delta T_s^4 \times 4\pi r^2$, 地球热平衡时 $E_1 = E_2$, 代入数据解得 $T_s = 278 \text{ K}$ 。



第十八章 原子结构

课程标准的要求

1. 了解人类探索原子结构的历史以及有关经典实验。
2. 通过对氢原子光谱的分析，了解原子的能级结构。

一、本章教材概述

本章与前后两章都属于近代物理学的内容。前一章涉及关于微观粒子运动规律的量子力学理论的内容。在量子力学建立之前，玻尔曾在前人关于原子结构研究工作的基础上，根据普朗克、爱因斯坦等提出的量子概念建立了前期量子论，可以部分地说明原子的若干性质。虽然玻尔的理论能够解决的问题有限，并且被后来的量子力学所取代，但是应该看到物理学的发展史中，每一重大进展都是建立于在此之前的认识之上，必须明确问题的所在，进行新的观察和理论研究，不是凭空一蹴而就的。因此，教科书把原子结构的内容单独作为一章，重点讲述原子的核式结构模型和玻尔的原子结构理论，目的就是突出人类是怎样逐步深入地认识原子结构的。

自1911年卢瑟福提出原子的核式结构模型以来，原子就被分成两部分来处理：一是处于原子中心的原子核，一是绕核运动的电子。核外电子的运动构成了原子物理学的主要内容，本章就涉及到这一内容。而原子核则成了另一门学科——原子核物理学的主要研究对象，这是下一章要涉及的内容。

研究微观粒子常用的实验方法是粒子散射的方法，动量守恒定律在微观世界中同样是适用的。因此，从这个意义上说，本章和下一章都可以看成是第十六章“动量守恒定律”在真实的物理情境中的应用。

本章共四节，可分为两单元。第一单元包括前两节，介绍电子的发现对于人类认识原子结构的重要意义，以及卢瑟福提出的原子的核式结构模型。第二单元包括后面两节，介绍了原子光谱的规律，以及玻尔在核式结构模型的基础上提出的新的原子模型。

在编写本章时，还有对以下一些问题的思考。

1. 贯穿原子结构发现的历史和科学研究的方法

在中学物理课程中，学生可以通过自己的探究活动来学习科学探究，也可以通过前人的探究活动学习科学探究。学生在初中物理和化学课中已经学过原子的核式结构，但并不了解这些知识是怎样获得的。针对这一章内容的特点，教科书介绍了人类怎样一步一步地深入认识了原子的结构，学生通过这段历史可以进一步了解科学探究的过程，了解人类认识微观世界的方法



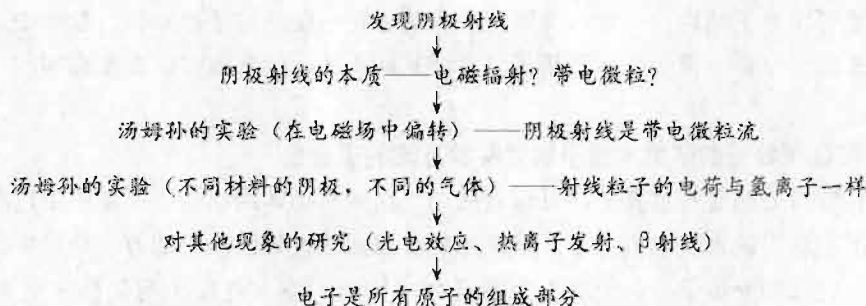
和途径,有利于培养他们的探索兴趣,发展他们的思维能力。

在科学研究中,科学家们通过对实验事实的分析,提出模型或假说,这些模型或假说又在实验中接受检验,正确的被肯定,经不起检验的被否定,在新的基础上再提出新的学说。科学研究就是这样不断向前发展。人类对原子结构的认识,生动地体现了科学发展的这种过程。

教科书把人类认识原子结构的历程大致分为以下三个阶段,每个阶段都体现了科学探究的特点。

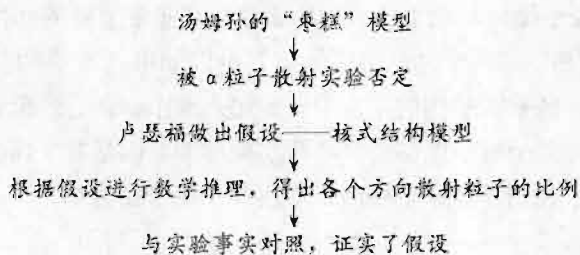
第一阶段:发现电子,认识到原子内部也有结构。

教科书的线索如下:



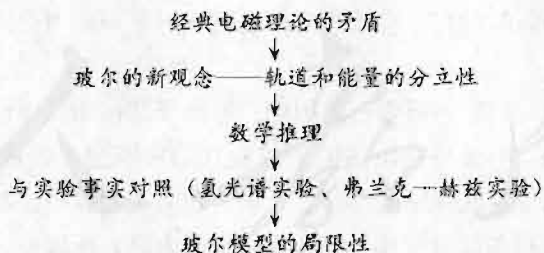
第二阶段:推测原子中电荷的分布,认识到原子的核式结构。

教科书的线索如下:



第三阶段:在对电子运动的研究中,经典电磁理论遇到了矛盾(原子的稳定性和原子光谱的分立特征),玻尔提出了新的观念。

教科书的线索如下:



人类逐步深入地认识微观世界的过程,体现了我们认识各种未知事物时的特点,体现了理论(假说)与实践的关系。本章的章首页右上方引用的密立根的话,就是为了强调科学研究中理论和实验的这种相互促进的关系。

2. 展示电子的发现对于人类认识原子结构的重大意义

电子的发现,对人类认识原子结构有重大意义。它使人们改变了认为原子是组成物质的最小微粒的看法,认识到原子是由更小的微粒构成的。发现电子是人类认识原子结构的第一个层次。因此,虽然学生对电子已经比较熟悉,但是作为人类认识原子结构的开端,本章还是从电子的发现讲起。

电子比荷的测定和电子电荷量的测定,对认识电子的性质起重要作用。汤姆孙对电子电荷量的测定结果虽然不很准确,但是数量级是对的,由此他可以确定电子的质量比氢原子小得多。考虑到学生对阴极射线的知识了解得比较少,因此在叙述汤姆孙研究电子的方法之前予以介绍。学生在前面的模块中已经熟悉带电粒子在电磁场中运动的规律,因此教科书没有在此平铺直叙,而是用两个“思考与讨论”引导学生。第一个“思考与讨论”引导学生思考汤姆孙可能用什么方法判断组成阴极射线的粒子的电性,要求学生根据带电粒子在电磁场中的运动来判断电荷的正负;第二个则是让学生根据提示,自己推导出电子比荷的表达式,从而对汤姆孙研究电子的方法有更深刻的认识。第二个“思考与讨论”比较复杂,教科书把思路给出来了。这两个栏目虽然写在原子结构这一章,实际上应用的全是电磁学的基础知识,教学中可以把它当做习题课来处理。编者一贯的指导思想是,紧抓基础不放,但基础知识要在真实的、有意义的情境中学习。

3. 突出在微观领域的研究中粒子散射实验方法的重要性

在我们日常所处的宏观世界中,可以直接用眼睛观察物体的结构,但在原子尺度的微观世界里,已经不能靠眼睛来获取信息了。最常用的获取微观世界的信息的方法是用中性的(如中子)或者带电的(如 α 粒子)粒子轰击所要研究的物质,使入射粒子与物体中的微粒相互碰撞,即在第十六章第4节介绍的粒子散射方法。这种方法在原子物理、原子核物理和粒子物理中被广泛应用。

α 粒子散射实验在原子结构和原子核结构的研究中有非常重要的作用。从第十六章第4节的“科学足迹 中子的发现”和第十九章“原子核”可以知道,质子和中子的发现都与 α 粒子散射实验有关。而在原子的核式结构的建立中, α 粒子散射实验更是起到决定性的作用。电子发现以后,汤姆孙提出的原子模型能够解释一些实验事实,但是对于新的 α 粒子散射实验事实的分析,使卢瑟福否定了汤姆孙的原子模型,得出存在原子核的结论。 α 粒子散射实验使人们对原子结构的认识又深入了一步。

4. 渗透改革创新和继承的关系

现在的教育比较注重培养学生的创新能力。在创新中,对旧有的理论持有正确的态度是很重要的。认真研究一下古往今来的发明创造,不难发现,旧的理论之所以能够存在,说明它有一定的合理性,我们再创新的时候,应该有选择地继承旧有理论中合理的部分,而不应该盲目地完全摒弃。

科学认识发展的历史,就是一部创新的历史。对原子结构的认识过程,比较典型地说明了继承和创新的关系。比如,卢瑟福提出的原子的核式结构模型可以很好地解释 α 粒子散射实验,但是无法解释原子的稳定性和原子的分立光谱,玻尔在发展卢瑟福的模型时,就保留了它的合理内容,即有原子核存在,而摒弃了其他不合理的内容。所以说,玻尔的原子理论和卢瑟福的核式结构模型之间有一种子辈与父辈间的继承和发展的关系。同样,玻尔的原子模型也是不完善的,它解决了原子的稳定性问题,很好地解释甚至预言了氢原子的光谱,但是面对更复杂的原子,玻尔理论也无能为力。在后来发展的原子量子理论中,玻尔提出的定态和在定态之间跃迁的概念都被保留下来,而不正确的经典轨道概念就被抛弃了。

课时安排建议

第1节	电子的发现	1学时
第2节	原子的核式结构模型	1学时
第3节	氢原子光谱	1学时
第4节	玻尔的原子模型	2学时

二、教材分析与教学建议

第1节 电子的发现

1. 教学目标

- (1) 知道阴极射线是由电子组成的，电子是原子的组成部分，是比原子更基本的物质单元。
- (2) 体会电子的发现过程中蕴含的科学方法。
- (3) 知道电荷是量子化的，即任何电荷只能是 e 的整数倍。
- (4) 领会电子的发现对揭示原子结构的重大意义。

2. 教材分析与教学建议

本节教科书由阴极射线和电子的发现两部分内容组成。重点是电子的发现过程蕴含的科学方法。首先通过实验说明阴极射线的存在，然后指出“19世纪后期，物理学家对阴极射线的本质的认识有两种观点”，最后仍然通过实验研究发现了电子。电子的发现说明原子不是组成物质的最小微粒，对揭示原子结构有重大意义，是近代物理三大发现（X射线、放射性、电子）之一。电子的发现是一个很好的培养学生分析问题和解决问题能力的内容。认识电子发现的重大意义，体会电子的发现过程中蕴含的科学方法，是教学中的重点。

教科书把“电子的发现”单列一节来处理，目的不仅是为下一节“原子的核式结构模型”作铺垫，还在于电子的发现本身在科学史以及科学方法论中的重要性。物质通常是不带电的，即原子应该是电中性的，由于原子含有带负电的电子，推想到原子中还有带正电的部分。这就提出了进一步探索原子的结构、建立原子模型的问题。

(1) 阴极射线

针对学生可能会提出“什么是阴极射线？它存在吗？”的问题，可提醒学生，回忆在研究磁场对运动电荷的作用力时，我们接触过的阴极射线。再演示教科书图 18.1-1 的实验，实验时“管壁上的荧光是由于玻璃受到阴极发出的某种射线的撞击而引起的”，实验表明，阴极射线确实是存在的。

教科书指出：“对阴极射线本质的认识有两种观点。一种观点认为阴极射线像 X 射线一样是电磁辐射；另一种观点认为阴极射线是带电微粒。”对阴极射线本质的认识为什么会有两种



观点？可以给学生做简要的介绍。有的物理学家是用点状的阴极发出阴极射线，并在阴极和阳极之间放置障碍物进行实验，在产生荧光的管壁上就会出现障碍物的清晰的影子，这就证明了阴极射线是直线传播的。进一步根据阴极射线为磁场偏转的事实，提出阴极射线是由带电的“微粒”组成的假说。而有的物理学家把阴极做得很大，在阴极和阳极之间放置的障碍物又很小，结果发现管壁上出现了障碍物模糊的阴影，即阴极射线发生了明显的衍射。物理学家赫兹对阴极射线做了大量的实验研究，他希望观察到阴极射线在电场中偏转，但实验的结果却没看到阴极射线的偏转（原因是当时的阴极射线管真空度还不高，低真空是电导体，其中静电场建立不起来），因此，认为阴极射线是一种电磁波。

（2）电子的发现

在学习本节之前，学生对电子已经比较熟悉，但电子是怎么发现的却知之甚少，因此，对发现电子的过程应该抱有极大的兴趣。教学中可准备一些有关发现电子的物理学史资料，让学生了解众多物理学家所做的大量工作，知道取得科学成就的艰辛。

电子发现的实验事实一：

这部分内容先介绍汤姆孙测带电粒子比荷的实验装置，在“思考与讨论”中详细介绍实验的方法与过程。

介绍实验装置时，要帮助学生弄清楚各部分的作用。

①K、A部分产生阴极射线。

②A、B只让水平方向的阴极射线通过。

③金属板 D_1 、 D_2 之间的区域加电场或磁场用于检验阴极射线是否带电及带电的性质。

④带有标尺的荧光屏显示阴极射线到达荧光屏时的位置，对阴极射线的偏转作定量的测定。

“思考与讨论”要求学生依据提示自己思考计算阴极射线微粒的比荷的方法，目的是通过引导学生自主学习，回顾研究带电粒子运动的基本方法，同时让学生体会物理学家的实验思想和体验其实验方法，了解电子发现过程中的一个重要的经典实验。该实验是电子发现的实验事实之一。



教学片段1

认识实验装置的作用，分析阴极射线的运动情况

为使学生认识实验装置和实验过程可提出下列问题：

①我们判断阴极射线是否是带电粒子流的基本方法是什么？

分析：让带电粒子通过电场或磁场，观察它是否偏转。

②实验过程中阴极射线是在哪几种条件下通过金属板 D_1 、 D_2 的？在这几种条件下，阴极射线受到几个力的作用？做什么性质的运动？

分析：阴极射线在电场中偏转说明它确实带电，向下偏转说明带负电。实验过程中阴极射线是在四种条件下通过金属板 D_1 、 D_2 的。

未加电场和磁场时，阴极射线不受力，做匀速直线运动；

加电场、未加磁场时，阴极射线只受库仑力作用，做类似平抛运动；

加电场和磁场时，阴极射线受库仑力和洛伦兹力作用，通过调整电场、磁场的强度，可使

其做匀速直线运动；

加磁场、未加电场时，阴极射线只受洛伦兹力作用，做匀速圆周运动。



教学片段2

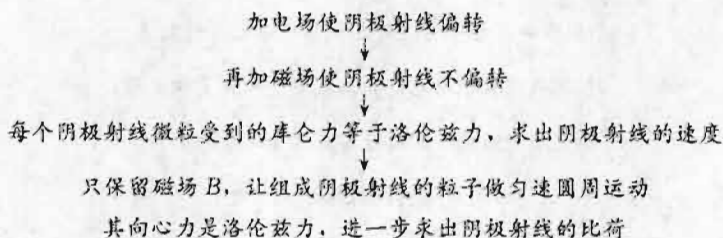
“思考与讨论”的教学

安排学生阅读“思考与讨论”并回答下面的问题：

问题1：教科书图 18.1-2 所示实验其实验目的是什么？

1. 判断阴极射线是否带电；
2. 如果阴极射线带电，则测出其比荷。

问题2：利用教科书图 18.1-2 所示实验装置测阴极射线比荷的基本思路是怎样的？



具体的推导过程如下：

当射线从屏上的 P_1 点又回到 P_2 点，说明此时每个阴极射线微粒受到的库仑力等于洛伦兹力，即 $qE = qvB$

因此

$$v = \frac{E}{B}$$

去掉金属板 D_1 、 D_2 间的电场 E ，只保留磁场 B 。组成阴极射线的粒子在金属板 D_1 、 D_2 间有磁场的区域形成一个圆弧，其做圆周运动的向心力是洛伦兹力，则

$$qvB = m \frac{v^2}{r}$$

解得， $\frac{q}{m} = \frac{E}{rB^2}$

问题3：实验中的哪些物理量是可控量？哪些物理量是待求量？哪些物理量是可测量？

可控量有：金属板 D_1 、 D_2 间的电压 U ，产生磁场的电流 I 。

待求量有：金属板 D_1 、 D_2 间的电场强度 E ，磁感应强度 B ，组成阴极射线的粒子做匀速圆周运动的半径 r 。

可测量有：金属板 D_1 、 D_2 间的电压 U ，金属板 D_1 、 D_2 间的距离 d ，金属板 D_1 、 D_2 的长度 L ，金属板 D_1 、 D_2 右端到荧光屏的距离 s ，产生磁场的电流 I ，只保留磁场 B 时阴极射线偏转的位置 P_3 到 P_1 的距离 y 。

教学中还可请学生思考：仅由以上结果就能说明阴极射线是由电子组成的吗？假如你是当年的汤姆孙，会进行怎样深入的研究呢？



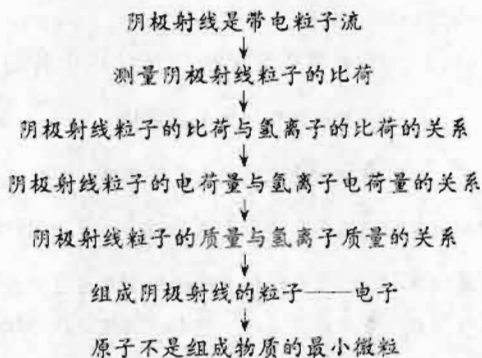
电子发现的实验事实二：

用不同材料的阴极做实验，都能产生阴极射线，即不同物质都能发射带电粒子。只有不同物质发射的带电粒子比荷的数值都相同，才能说明不同物质发射的带电粒子可能是相同的，是构成各种物质的共有成分。教科书虽然没有安排实验，但从逻辑关系来看，这部分叙述使电子发现的事实显得更严密，也符合物理学史。

电子发现的实验事实三：

实验测得的阴极射线粒子的比荷是氢离子的比荷的近两千倍，汤姆孙猜测且后来又测出了阴极射线粒子电荷量的大小与一个氢离子大致相同，说明阴极射线粒子的质量比氢离子小得多。

对电子存在的整体研究的思路是：



教科书指出，不论是阴极射线、 β 射线、光电流还是热电子流，它们都包含电子，也就是说，不论是由于正粒子的轰击、紫外线照射、金属受热还是放射性物质的自发辐射，都能发射同样的带电粒子——电子。这既是对电子广泛存在于各种现象的总结，也是为下一节“原子的核式结构模型”埋下伏笔。电子的发现，使人们认识到原子不是组成物质的最小微粒，原子本身也具有结构。

教学中应明确指出，电子电荷的现代值和近似值；电子电荷是基本的带电单位——元电荷 e ；任何带电体的电荷只能是 e 的整数倍——电荷是量子化的。

3. 问题与练习

内容分析

本节问题与练习围绕电子发现的过程和方法这一中心展开，对发现电子过程中如何利用已经学过的知识计算电子的比荷给予高度重视。

第1题考查学生对教科书内容的理解情况。要求弄清楚汤姆孙发现电子的三个实验事实。

第2题要求学生应用动能定理或功能关系解决实际问题。静电力对电子做正功，电子的电势能减少，动能增加。静电力对电子做的功等于电子动能的增加，或者说电子增加的动能等于其减少的电势能。

第3题考查学生对电荷量子化的理解，并要求利用平衡条件解决实际问题。本题可由油滴的半径和密度求出质量，利用题中“库仑力恰好与重力平衡”这一条件，即可算得油滴的电荷量，结合电荷量子化理论以及电子的电荷量，得到答案。

第4题联系科研实际，要求学生利用电场和磁场的知识解决实际问题。

解答与说明

1. 汤姆孙根据阴极射线在电场和磁场中的偏转现象，确定了其本质是带负电的粒子流并

求出了这种粒子的比荷；进一步的实验发现，不同物质做成的阴极发出的射线粒子都有相同的比荷，说明这种带电粒子是构成物质的共同成分；用这种粒子的比荷与氢离子比荷比较，并用实验测出了这种粒子的电荷量与氢离子电荷量相同，质量又比最轻原子的质量小得多。根据这些，汤姆孙发现了电子。

2. 由 $qU = \frac{1}{2}mv^2$ 可得， $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}} = 3.75 \times 10^7 \text{ m/s}$ 。

3. 油滴的质量 $m = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$ ，油滴受到的重力 $G = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho g$ ，库仑力 $F = Eq$ 。

由平衡条件，可知 $\frac{4}{3}\pi R^3 \rho g = Eq$ 。电子个数与电荷量的关系为 $q = Ne$ 。因此，电子的个数为 $N = \frac{4\pi R^3 \rho g}{3Ee} = 5$ 。

4. 以 M 点为坐标原点，水平向右方向为 x 轴，竖直向下方向为 y 轴。

(1) 同时加电场、磁场时， $qE = Bqv_x$ ，因此 $v_x = \frac{E}{B} = \frac{U}{Bd}$ 。

(2) 只加电场时，到达极板右边缘时，电子在竖直方向飞行的距离为

$$y_1 = \frac{1}{2}a_y t^2 = \frac{1}{2} \frac{F_y}{m} \left(\frac{l}{v_x} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{qUl^2}{mdv_x^2}$$

电子在竖直方向的速度为

$$v_y = a_y t = \frac{F_y}{m} \frac{l}{v_x} = \frac{qUl}{mdv_x}$$

电子飞出极板到达 P 点时，在竖直方向经过的距离为

$$\begin{aligned} y_2 &= v_y t' = \frac{qUl}{mdv_x} \frac{L - \frac{l}{2}}{v_x} \\ &= \frac{qUl \left(L - \frac{l}{2} \right)}{mdv_x^2} \end{aligned}$$

因此

$$y = y_1 + y_2$$

解得， $\frac{q}{m} = 1.61 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ 。

第2节 原子的核式结构模型

1. 教学目标

- (1) 了解 α 粒子散射实验原理和实验现象。
- (2) 知道卢瑟福的原子核式结构的主要内容。
- (3) 知道原子和原子核的大小数量级，原子核的电荷数。
- (4) 领会卢瑟福提出原子核式结构的实验和思维过程，培养学生抽象思维能力和想象力。



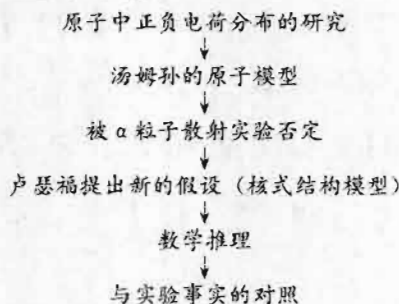
2. 教材分析与教学建议

电子的发现,说明原子可以再分割。在此基础上,汤姆孙建立了较有影响的原子“枣糕模型”。卢瑟福用发现的 α 粒子散射实验结果否定了汤姆孙的原子模型,提出了原子的核式结构模型。 α 粒子散射实验和原子核式结构的内容是本节教学的重点。

α 粒子散射实验是一个很重要的实验,体现了研究微观世界的一种科学方法,也是一个锻炼学生分析问题、解决问题的知识点。对卢瑟福如何分析 α 粒子散射实验,否定汤姆孙原子模型,提出原子核式结构模型的了解,有利于学生学习人类研究微观世界的科学方法,提高自己分析、解决问题的能力。

(1) α 粒子散射实验

讲授 α 粒子散射实验的目的之一是使学生从科学家的具体工作中体会科学探究过程。教学基本思路与上一章相同,可以沿这样的线索展开:



汤姆孙原子模型是在发现电子的基础上建立起来的。通过教学要使学生对汤姆孙原子模型有一个形象的了解。教学中应该注意,讲述汤姆孙模型的目的是为了使从原子学说的历史发展来认识 α 粒子散射实验的重大意义,为进一步理解原子的核式结构作好准备。

α 粒子散射实验以及卢瑟福对实验现象的分析,为提出原子的核式结构模型奠定了基础。教学中可按以下几个层次进行教学。

①为什么用 α 粒子的散射现象可以研究原子的结构?

原子的结构非常紧密,用一般的方法无法探测它内部的结构。要认识原子的结构,需要用高速粒子对它进行轰击。由于 α 粒子具有足够的能量,可以接近原子的中心,它还可以使荧光物质发光,如果 α 粒子与其他粒子发生相互作用,改变了运动的方向,荧光屏便能够显示出它的方向变化。因此卢瑟福采用 α 粒子散射的方法来研究原子的结构。

② α 粒子的散射实验是怎么做的?

α 粒子散射实验的装置,可根据教科书上的示意图来讲述,主要由放射源、金箔、荧光屏、放大镜和转动圆盘几部分组成,每一部分的作用应该让学生明确。实验的做法,课文中写得比较简明,重点应指出荧光屏和放大镜能够围绕金箔在一个圆周上转动,从而可以观察到穿过金箔后偏转角度不同的 α 粒子。要让学生了解,这种观察是十分艰苦细致的工作,所用的时间也是相当长的。

③实验结果是什么?

必须让学生明确,实验结果可以把入射的 α 粒子分为两大部分,这两大部分 α 粒子的大致多少是用“绝大多数”和“少数”这样的数量形容词来描述的,它们穿过金箔后的情况分别是基本上仍沿原来的方向前进和发生了大角度偏转。卢瑟福的原子核式结构模型就是在分析了这两大部分 α 粒子的情况后建立起来的。

④分析实验结果得到怎样的原子模型?



对实验结果的分析应着重说明如下几点。

a. 电子不可能使 α 粒子发生大角度散射。 α 粒子跟电子碰撞过程中,两者动量的变化量相等。由于 α 粒子的质量约为电子质量的7 300倍,在碰撞前后,质量大的 α 粒子速度几乎不变,而质量小的电子速度要发生改变。因此, α 粒子与电子正碰时,不会出现被反弹回来的现象。发生非对心碰撞时, α 粒子也不会有大角度的偏转。可见,电子使 α 粒子在速度的大小和方向上的改变都是十分微小的。

b. 按照汤姆孙的原子模型,正电荷在原子内部均匀地分布, α 粒子穿过原子时,由于粒子两侧正电荷对它的斥力有相当大一部分互相抵消,使 α 粒子偏转的力也不会很大。 α 粒子的大角度散射现象,说明了汤姆孙模型不符合原子结构的实际情况。

c. 实验中发现少数 α 粒子发生了大角度偏转,甚至反弹回来,表明这些 α 粒子在原子中的某个地方受到了质量、电量均比它本身大得多的物体的作用。

d. 金箔的厚度大约是 $1\mu\text{m}$,金原子的直径大约是 $3\times 10^{-10}\text{m}$ 。绝大多数 α 粒子在穿过金箔时,相当于穿过几千个金原子的厚度,但它们的运动方向却没有发生明显的变化。这个现象表明了绝大多数 α 粒子在穿过时基本上没有受到力的作用,说明原子中的绝大部分是空的,原子的质量和电量都集中在体积很小的核上。

(2) 原子核的电荷与尺度

原子核的电荷这部分内容,要突出测量原子核的电荷的重要意义。应该使学生了解,根据 α 粒子散射实验的数据可以算出靶元素原子核的电荷,从而推知这种原子中的电子数。计算的结果表明,元素原子中的电子数非常接近该元素在周期表中的原子序数。人们由此知道元素周期表是按原子中的电子数来排列的。这就是说,元素的化学性质,归根到底是由原子中的电子数决定的,或者说是由原子核中的电荷数来决定的。

关于原子的大小,应该让学生记住一个数量级,即原子核半径的数量级为 10^{-15}m ,原子半径的数量级是 10^{-10}m ,所以原子核的半径约为原子半径的十万分之一。这里突出了原子核是很小的,原子内部是很空的。

3. 问题与练习

内容分析

本节问题与练习围绕 α 粒子散射实验这一中心来展开。细化 α 粒子散射实验的实验方法,强调对实验结果的分析等,让学生明白在微观领域的研究中, α 粒子散射实验方法的重要性。

第1题考查 α 粒子散射实验装置中各个部分的作用、实验现象的观察和对观察到的现象进行描述。

第2题要求应用动量和牛顿运动定律解释物理现象。从动量的观点,电子对 α 粒子速度的影响完全可以忽略,而汤姆孙原子模型的正电荷使 α 粒子偏转的力不会很大,根据牛顿运动定律可知 α 粒子不会有大角度的偏转。

第3题考查卢瑟福的原子核式结构模型和提出这种模型的依据。

第4题加深对原子是十分“空旷”的印象。

第5题强调实验器材的选取对实验结果会产生较大的影响。

解答与说明

1. 简图参见教科书图 18.2-2。

放射源:放出 α 粒子。

金箔：被 α 粒子轰击的物质。

带有荧光屏的放大镜：用来观察 α 粒子轰击金箔后的径迹。

整个装置置于真空中， α 粒子打在荧光屏上有微弱的闪光。由于放大镜能围绕金箔在一个圆周内转动，因此可以通过它观察到穿过金箔后偏转角度不同的 α 粒子。

观察到的现象是：绝大多数 α 粒子穿过金箔后基本上沿原来方向前进，少数 α 粒子发生了大角度偏转，偏转超过了 90° 甚至几乎达到 180° ，像是被弹了回去。

2. 电子的质量很小，比 α 粒子的质量小得多， α 粒子碰到金箔原子内的电子，运动方向不会发生明显变化。汤姆孙模型认为正电荷在原子内是均匀分布的，因此当 α 粒子穿过原子时，它受到两侧正电荷的斥力有相当大一部分互相抵消，使 α 粒子偏转的力不会很大，不会有大角度偏转。所以汤姆孙模型不能解释 α 粒子的大角度散射。

3. 卢瑟福的原子核式结构模型是：在原子的中间有一个很小的核，叫原子核，原子的全部正电荷和几乎全部质量都集中于原子核，带负电的电子在核外空间里绕核旋转。

原子核式结构的依据是 α 粒子散射实验。 α 粒子穿过原子时，电子对它的运动影响很小，影响 α 粒子运动的主体是原子核。 α 粒子进入原子区域后，由于原子核很小，大部分 α 粒子离核较远，受到的库仑力很小，运动方向几乎不变。极少数 α 粒子距核较近，因此受到很强的库仑力，发生大角度散射。

4. 篮球大约是半径 0.125 m 的球体，视为原子核，整个原子就是半径为 12.5 km 的球体。

5. 金原子的质量比 α 粒子质量大得多，且几乎全部集中在金原子核内。当 α 粒子穿过金原子区域，靠近金原子核时，其作用力对 α 粒子运动方向影响很大，而对金原子影响很小。

第3节 氢原子光谱

1. 教学目标

- (1) 了解光谱、连续谱和线状谱等概念。
- (2) 知道氢原子光谱的实验规律。
- (3) 知道经典物理的困难在于无法解释原子的稳定性和光谱分立特性。
- (4) 让学生进一步体会物理规律是在接受实践检验的过程中不断地发展和完善的。

2. 教材分析与教学建议

本节教材是在了解光谱、连续谱、线状谱的概念后（可以补充光谱的分类），进一步介绍原子的特征光谱和光谱分析，重点讲述氢光谱的实验规律。在此教科书给出了巴尔末公式。应该明确，该公式的出现不是为了让学生练习计算，而是与前面学习碰撞时的意图一样，目的是从公式看出物理量之间的关系、看出物理量变化的趋势。即巴尔末公式以简洁的形式反映了氢原子辐射波长的分立特征。同时它也为下一节氢原子能量的分立性作了铺垫。而原子光谱的事实不能用经典物理学理论解释，必须建立新的原子模型。

(1) 光谱

我们已经知道电子是绕着原子核运动的，那么电子在原子核周围怎样运动呢？它的能量是怎样变化的？教师可告诉学生这些知识是根据原子光谱的规律来推知的，然后用投影片展出连续谱、线状谱、太阳光谱等，可以让学生通过阅读教科书，结合投影片明确光谱、连续谱和线



状谱等概念,引导学生比较几种光谱的异同。让学生明确:原子的特征光谱是什么光谱?不同原子的特征光谱是否相同?学生明白这些之后,对于光谱分析就不难理解了。光谱分析不仅可以用来鉴别物质、确定物质的组成,还可以探索原子的结构。

建议在教学中用投影片展示氢光谱图片,让学生直观地看到氢光谱中的几条亮线。

(2) 氢原子光谱的实验规律

在讲解巴耳末公式时,不需要详细讲述公式的来历,但应重点说明公式中 n 的含义。巴耳末对可见光区的四条谱线做了分析,发现这些谱线的波长可用公式 $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$,其中 $n=3, 4, 5, \dots$ 来表示,其计算结果与实际基本符合,后来此公式被称为巴耳末公式,它所表达的一组谱线称为巴耳末系。巴耳末公式中的 n 有两层含义:第一, n 取一个值,可求出氢光谱中一条谱线的波长,说明每一个 n 值分别对应一条谱线。第二, n 只能取正整数值 $3, 4, 5, \dots$,不能取连续值,说明了原子光谱波长的分立特性。

对教科书“除了巴耳末系,后来发现的氢光谱在红外和紫外光区的其他谱线也都满足与巴耳末公式类似的关系式”的叙述,可以做如下补充。

除了巴耳末系,氢原子光谱的其他谱线系,也先后被发现。一个在紫外区,由莱曼(T. Lyman)发现,还有三个在红外区,分别由帕邢(F. Paschen)、布喇开(F. Brackett)、普丰德(H. A. Pfund)发现。这些谱线系也像巴耳末系一样,可用一个简单的公式表达如下:

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

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

$$\text{帕邢系} \quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n=4, 5, 6, \dots$$

$$\text{布喇开系} \quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n=5, 6, 7, \dots$$

$$\text{普丰德系} \quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n=6, 7, 8, \dots$$

(3) 经典理论的困难

应该让学生清楚地认识到,卢瑟福的原子核式结构模型虽然能很好地解释 α 粒子散射实验,但跟经典的电磁理论发生了矛盾。这个矛盾说明从宏观现象总结出来的经典电磁理论不适用于微观现象。不解决这个矛盾,原子理论就不能前进。这是产生玻尔原子理论的历史背景。



教学片段

原子核式结构模型与经典电磁理论的矛盾

这部分内容知识跨度较大,与前面已经学习过的旧知识联系紧密,我们将通过复习旧知识逐步理解以下问题。

问题1: 卢瑟福的原子核式结构模型的成功之处在哪里?

正确地指出了原子核的存在,能很好地解释 α 粒子散射实验。

问题2: 经典电磁理论的困难是什么?

无法解释原子的稳定性和原子光谱的分立特性。

问题3：按照教科书中经典电磁理论对原子核式结构的分析结果，经典电磁理论包含哪两点基本内容？

当带电粒子做周期性运动，它的电磁场就周期性变化，而周期性变化的电磁场会向外发射电磁波；发射出来的电磁波的频率等于辐射体的频率。具体地讲，在原子中，原子核外的电子将把它绕核转动的能量以电磁波的形式辐射出去；辐射电磁波的频率，就是电子绕核转动的频率。

问题4：原子中存在电磁场吗？如果存在，根据经典电磁理论它是由谁产生的？怎样变化？为什么？

原子中存在电磁场。电磁场是由运动的电子产生的，并做周期性变化。因为电子做周期性圆周运动时，形成了一个周期性变化的电磁场。

问题5：根据经典电磁理论，原子核外的电子会向外辐射电磁波即向外辐射能量吗？

由于电子的电磁场是周期性的，按照经典电磁理论，就要向外辐射电磁波。向外辐射电磁波的过程也就是向外辐射能量的过程，因此电子的能量要减少。

问题6：根据经典电磁理论，电子能量减少会导致什么结果？

根据经典电磁理论，电子能量减少会导致两个结果：

①原子不稳定

由于能量减少，电子的速度减小，库仑力将使其做近心运动，轨道半径连续减小，最终会落到原子核上，因而原子是不稳定的。计算表明，原子的“寿命”仅约为 10^{-12}s ，这与原子是一个稳定系统的事实是根本矛盾的。

②原子光谱是连续谱

电子在转动过程中，随着转动半径的缩小，转动线速度不断增大，转动频率不断增大，按照经典电磁理论，辐射电磁波的频率将不断增大，因而大量原子发光的光谱应该是连续谱。然而事实上，原子光谱不是连续谱而是分立的线状谱，理论推导与事实矛盾。

问题7：原子核式结构模型与经典电磁理论的矛盾给予我们什么启示？

这些矛盾的存在，不仅表明这一模型还不完善，而且又一次预示着，对原子世界需要有一个不同于经典物理学的新理论。

3. 问题与练习

内容分析

本节问题与练习以概念、公式的简单应用和解释现象为主要内容，要求较低。

第1题考查学生是否知道有关光谱的概念。

第2题要求学生应用巴耳末公式解决简单问题。

第3题要求学生陈述经典物理学在解释原子光谱时遇到的困难。

解答与说明

1. 由不连续的亮线组成的光谱叫线状谱。由波长连续分布的光组成的连在一起的光带叫连续谱。原子的发射光谱是线状光谱。不同原子的发射光谱不相同。

2. 由巴耳末公式 $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ ， $n = 3, 4, 5, \dots$ 可知，氢原子光谱在可见光范围内波长最长的2条谱线所对应的 n 应为3、4。



当 $n=3$ 时, 得 $\lambda_1=6.55\times 10^{-7}\text{m}$ 。

当 $n=4$ 时, 得 $\lambda_2=4.85\times 10^{-7}\text{m}$ 。

氢原子光谱是分立的线状谱。它在可见光区的谱线满足巴耳末公式, 在红外和紫外光区的其他谱线也都满足与巴耳末公式类似的关系式。

3. 经典物理学在解释原子光谱是线状谱时遇到了困难。按照经典电磁理论, 电子在核外做加速运动, 应该辐射电磁波, 电子能量逐渐减少, 电子绕核运行的轨道半径也要减小, 电子将沿螺旋线轨道落入原子核。电子绕核运行辐射电磁波的频率等于电子绕核运行的频率。随着轨道半径连续变化, 绕核频率也连续变化, 辐射电磁波的频率也连续变化, 由此可以推出: 原子光谱是连续谱。这与原子光谱是线状谱的实验事实相矛盾。

第4节 玻尔的原子模型

1. 教学目标

- (1) 知道玻尔原子理论的基本假设的主要内容。
- (2) 了解能级、跃迁、能量量子化以及基态、激发态等概念。
- (3) 能用玻尔原子理论简单解释氢原子模型。
- (4) 了解玻尔模型的不足之处及其原因。

2. 教材分析与教学建议

本节内容是本章的重点, 也是难点, 玻尔理论的内容不易理解。介绍玻尔理论时, 可根据卢瑟福原子模型跟经典电磁理论之间的矛盾, 说明经典电磁理论不适用于原子结构, 直接提出玻尔理论的内容。这样讲, 虽然理论上不够严谨, 但简洁明了, 学生容易接受。

关于氢原子核外电子跃迁时辐射(或吸收)光子的问题, 可根据不同层次的学生, 选定难度。如对一般学生只要求计算能量差, 层次较高的学生可以计算光子频率、波长等。

关于玻尔理论的局限性, 只要求学生有所了解即可。

本节在介绍玻尔原子理论的内容之后, 用它来成功地解释了氢光谱的实验规律。玻尔理论的一个重要假设是原子能量的量子化, “科学足迹”中介绍的弗兰克—赫兹实验从另一个角度证明了能量量子化的正确性。尽管玻尔模型后来被证明很不完善, 但仍是人们认识原子结构的一个重要里程碑, 它进一步说明微观世界中原子范围内的现象要用量子理论才能更好地解决。本节的重点是玻尔原子理论的基本假设, 通过教学再次让学生体验科学家所进行的科学探究, 领会科学方法和科学精神。

(1) 玻尔原子理论的基本假设

玻尔把量子观念引入到原子理论中去, 提出了区别于经典观念的假设, 是一个创举。为了便于学生认识玻尔理论, 也可以把玻尔原子理论的假设称为轨道假设, 能级假设和跃迁假设。

轨道假设说明电子不能在任意半径的轨道上运行, 而只能在某些轨道上运行。这些特殊半径的大小应满足一定的条件, 对应的轨道才是可能的, 即电子的可能轨道是不连续的! 教学时可以让学看教科书图 18.4-1, 根据此图讲述其轨道“不连续”的含义, 让学生对“不连续”的量子观念有一个形象、具体的了解。

能级假设说明原子只能处于一系列不连续的能量状态中, 这些状态叫定态, 具有一定的能

量,也叫能级。能级假设是针对原子的稳定性提出的,它承认核式模型,但假定原子只能处于一系列不连续的稳定状态中。处于稳定状态的原子中的电子,虽做加速运动但不辐射能量。

跃迁假设说明原子从一个定态跃迁到另一个定态时,它辐射或吸收一定频率的光子,光子的能量由这两个定态的能量差决定,它说明了原子发光的机制。这一条假设是针对原子光谱是线状光谱提出的。



教学片段

关于玻尔模型的两个假设的补充教学

教科书介绍了玻尔原子理论的两个假设内容,我们接着将介绍对玻尔原子理论的产生有影响的理论,以帮助理解玻尔原子理论。

玻尔作为卢瑟福的学生曾在卢瑟福实验室工作过四个月,并参加了 α 粒子散射的实验工作,对原子核式结构模型的正确性是坚信不疑的!为此他要设法找到一个根本性的修正办法,即一种新的理论,既能保留卢瑟福的原子核式结构模型,又能导出原子的稳定性并解释线状谱。

在玻尔模型提出之前,物理学界的几件大事,对他很有启发。

一是1900年德国物理学家普朗克为了解释黑体辐射实验,提出能量量子化概念,他认为物质中的原子和分子可看成某种能吸收和放射电磁辐射的“振子”,这种“振子”的能量不是连续变化的,而只能取一些分立值。

二是1905年爱因斯坦为了解释光电效应的实验规律,提出光子量子假定,即可将电磁波看做是光子组成的。

三是1885年瑞士物理学家巴耳末分析了可见光区的四条谱线,说明了原子光谱波长的分立特性。

玻尔仔细地分析和研究了当时已知的大量光谱数据和经验公式,特别是受到了巴耳末公式的启示,很快写出了《原子结构和分子构造》的著名论文。论文把卢瑟福、普朗克、爱因斯坦的思想结合起来,克服了经典物理学解释原子稳定性的困难。玻尔在1922年接受诺贝尔奖所作的演讲中提到1913年他提出的两个假设。

1. 设想原子系统的可能运动状态中存在着所谓的“稳定态”,在这些状态中,粒子的运动虽然在很大程度上遵守经典物理学规律,但这些状态的独特稳定性不能用经典物理学来解释。原子系统的每个变化只能是从一个稳定态完全跃迁到另一个稳定态。

2. 与经典电磁理论相反,稳定原子不发生辐射,只有在两个稳定态之间跃迁才产生电磁辐射。辐射的特性由下面的关系来决定:

$$h\nu = E_m - E_n$$

式中 h 是普朗克常量, E_m 和 E_n 是原子在两个稳定态,即辐射过程中的始态和末态的能量值。反之,用这种频率的电磁波照射原子时,可引起吸收过程,使原子从后一稳定态跃迁回前一个稳定态。

玻尔在这两条假设的基础上,解释了氢原子光谱的规律,并从理论上算出了里德伯常数的值,预言了氢的一些新谱线。玻尔理论的一个最重要的成果还在于建立了经典概念与量子概念之间的对应原理,对量子论和原子物理的发展有重大贡献。



这部分出现的新概念较多,如量子化、轨道量子化、能量量子化、能级、定态、基态、激发态和跃迁等,可在课后查阅相关的资料,帮助理解消化。

(2) 玻尔理论对氢光谱的解释

前一节已经介绍了由实验直接得出的巴耳末公式(顺便介绍了里德伯常量),说明氢光谱谱线之间是有内在规律的。现在使学生进一步了解按照玻尔理论推导出来的谱线公式跟巴耳末公式在形式上完全一致,而且由前一个公式可以计算出与巴耳末公式中的里德伯常量的 R 值相符的数值。这说明了巴耳末公式完全可以由玻尔理论推导出来,玻尔理论可以解释氢光谱的规律。

还应向学生说明,氢光谱的其他线系也可以用玻尔理论来解释,由玻尔理论预言存在的新谱线系,后来也被人们发现,充分说明了玻尔理论的成功。

教学时还应该让学生了解,氢光谱中的每个线系,都是原子从不同的高能级向某一低能级跃迁时发出的谱线。例如,莱曼系是氢原子的电子从 $n=2, 3, 4, \dots$ 能级跃迁到 $n=1$ 的基态时发出的谱线;巴耳末线系是氢原子的电子从 $n=3, 4, 5, \dots$ 能级向 $n=2$ 能级跃迁时发出的谱线,等等。光谱线上的每一条谱线都是大量处于同一能态的原子的电子向同一低能态跃迁的结果。由于每个原子的电子所处的能态不同,大量原子的跃迁在同一时刻,会发出不同频率的光来,因此光谱线上能够出现各种谱线。

(3) 玻尔模型的局限性

简要指出玻尔理论遇到的主要困难,说明造成这种困难的原因在于理论内部的矛盾。玻尔理论是一种半经典的理论,一方面引入了量子假设;另一方面又应用经典理论计算电子轨道半径和能量。因此,玻尔理论在解释复杂的微观现象时遇到困难,乃是必然的。

教学中可着重说明,建立在量子力学基础上的原子理论与玻尔原子理论的区别。根据量子力学,核外电子的运动服从统计规律,而没有固定的轨道,我们只能知道它们在核外某处出现的几率大小。核外电子的这种运动情况可用“电子云”来形象描述。电子云稠密的地方就是电子出现几率大的地方。

(4) “科学足迹”——关于弗兰克—赫兹实验

这部分阅读材料可根据学生的情况,安排学生自学或者老师引导与学生自学相结合的方式进行,以了解原子能量量子化的实验验证。

激发原子的手段不只是电磁辐射,还应有其他方式使原子激发。玻尔理论提出的第二年,弗兰克—赫兹采用电子轰击汞原子,发现电子损失的能量,也就是汞原子吸收的能量,是分立的。从而证明了汞原子能量量子化。弗兰克—赫兹实验以它卓越的设计思想和实验技巧,以及在建立原子量子学说方面的贡献,受到人们的赞誉。

在介绍弗兰克—赫兹实验时,建议注意下面的问题:

①弗兰克—赫兹实验的方法和原理是:使加速的电子通过压强很低的汞蒸气,与汞原子发生碰撞。测量电子与汞原子碰撞中损失的能量,就可确定汞原子获得的能量。

②弗兰克—赫兹实验的结果表现在接收极电流随 $K-G$ 间电压的变化关系图象,会分析此图象是得出结论的关键。

3. 问题与练习

内容分析

本节问题与练习围绕玻尔理论展开,重点是运用频率条件和定态进行推断和解释现象。

第1题要求学生运用频率条件推断量子数。

第2题要求学生运用频率条件和定态假设解释线状谱产生的原因。

第3题要求学生运用频率条件推断 $n=3$ 时会辐射多少种频率的光以及波长最短的光对应的量子数。

第4题要求学生用玻尔理论解释吸收光谱。

解答与说明

1. 根据巴耳末公式, $n=5$ 时计算出的氢原子光谱的谱线是量子数为5的能级跃迁到量子数为2的能级形成的。

2. 根据玻尔理论, 原子处于一系列不连续的能量状态中, 原子从较高能级 E_2 跃迁到较低能级 E_1 时辐射的光子能量满足 $h\nu=E_2-E_1$ 。由于原子能级是分立的, 能级差也是分立的, 辐射的光子的能量也是分立, 有确定的频率, 所以原子光谱只有一些分立的亮线。

3. 大量原子处在 $n=3$ 的能级上, 能辐射3种频率的光。波长最短的光是从 $n=3$ 的能级跃迁到 $n=1$ 的能级时发出的光。

4. 各种波长的复色光通过物质时, 原子吸收了跟它的原子谱线波长相同的那些光子, 使连续的复色光谱背景上出现了暗线。由于原子只能吸收能量大小满足两个能级之差 $h\nu=E_2-E_1$ 的光子, 从低能态 E_1 跃迁到高能态 E_2 , 在复色光谱中形成一条暗线, 这条暗线刚好与 E_2 跃迁到 E_1 发出的光子的明线相对应。因此, 各种原子吸收光谱中的每一条暗线都跟该原子发射光谱中的一条亮线对应。

三、教学设计案例

原子的核式结构模型

1. 教学目标

- (1) 了解 α 粒子散射实验原理和实验现象。
- (2) 知道卢瑟福的原子核式结构的主要内容。
- (3) 知道原子和原子核的大小数量级, 原子核的电荷数。
- (4) 领会卢瑟福提出原子核式结构的实验和思维过程, 培养学生抽象思维的能力和想象力。

[重点] α 粒子散射实验和原子核式结构的内容

[难点] 人类研究微观世界的方法

2. 课前准备

学生: 上网或到图书馆查找有关汤姆孙和卢瑟福生平及有关原子结构研究的介绍文章。

教具: 实物投影仪, 多媒体电脑及相关课件。

3. 教学过程

(1) 导入新课

问题1 电子的发现有何重要意义?



讲述：

①分子由原子组成，因化学反应中原子的种类和数目不变，使人们认为原子是组成物质的最小微粒，是不能分割的。到19世纪末，人们还认为原子是组成物质的最小微粒。

②1897年汤姆孙发现了电子，后来在光电效应和X射线使气体电离等实验中，都从物质的原子中打出了电子，因而否定了原子不可分的结论。那么原子结构是什么样呢？今天我们来学习原子结构模型。

〔板书〕第二节 原子的核式结构模型

(2) 进行新课

讲述：物理学研究中常常提出各种模型。由现象提出模型；用数学描述模型；用实验检验模型。特别是原子，用肉眼看不见，必须建立一个模型来研究它的内部结构。发现电子后，科学家们提出了许多原子模型，最有影响的模型之一是：汤姆孙的原子模型。

用课件或投影仪展示汤姆孙原子模型，简介这种模型。（学生看教科书）

问题2 汤姆孙的“枣糕模型”对吗？你能用电学知识回答这个问题吗？同学们在初中学习过原子是由什么组成的？

讲述：原子很小，无法直接观察它的内部结构？你想知道用什么方法来认识原子有一个核？这个核的大小如何呢？本节课将给同学们介绍怎样用高能粒子碰撞原子来研究原子的结构，结合实验规律，通过推理、分析认识原子的结构。

〔板书〕一、 α 粒子散射实验

问题3 α 粒子散射实验是什么？为什么汤姆孙模型被否定？新的原子模型是怎样的？新的模型提出的主要思想是什么？

〔板书〕1. 实验装置

〔用投影片或多媒体课件展示 α 粒子散射实验示意图〕

放射源：钋放在带有小孔的铅盒中，放射出高能的 α 粒子，带正电， $m_{\alpha} > m_e$ （ m_{α} 约为 m_e 的7300倍）。

金箔：厚度极小，可至 $1\mu\text{m}$ （金原子质量大，且易延展成很薄的箔，金箔虽然薄，但仍有几千层原子）。

放大镜：能围绕金箔在水平面内转动。

荧光屏：荧光屏装在放大镜上， α 粒子打在屏上，发出闪光。

全部设备装在真空中。

〔板书〕2. 实验步骤

①钋放出的 α 粒子从铅盒的小孔射出，形成很细的一束射线，射到荧光屏上产生闪光。通过放大镜观察，偏离正对位置无闪光。

②放上金箔，观察 α 粒子穿过金箔打到荧光屏上所发的闪光，正对位置可观察到大量的闪光点。

③转动放大镜，在不同偏转角处，可看到少数闪光点。

〔板书〕3. 实验结果（看教科书后，总结）

①绝大多数 α 粒子穿过金箔后基本上仍沿原来方向前进。

②少数 α 粒子发生了较大的偏转。

（散射的 α 粒子的数目随着 θ 角的增大很快地减少，有少数 α 粒子的偏转角 θ 超过 90° ，有的甚至几乎达到 180° ，好像是被金箔弹了回来。）

请学生自己画一个 α 粒子散射结果示意图。

[教师再用多媒体课件模拟 α 粒子散射结果]

[板书] 4. 实验结果引起的思考

①卢瑟福接到实验报告感到震惊，卢瑟福回忆当时的情景说：“这件事是如此地不可能，就好像你用炮弹射向一层薄纸，但炮弹却被弹了回来，……”他经过认真思考，细心研究，否定了他的导师汤姆孙的原子模型，建立了新的原子模型。

②汤姆孙的原子模型被否定的原因。(学生讨论)

[演示实验或多媒体课件] 重铁球碰到轻塑料球，铁球运动不会受到大的影响。(学生思考原因)

α 粒子穿过汤姆孙的原子模型时，电子与带正电物质对它运动的影响：

α 粒子可能与电子相碰，但 α 粒子运动方向不会改变，因为电子的质量很小，就像子弹碰到灰尘。

α 粒子与带正电物质的作用(看投影片或多媒体课件再进行理论分析)。

据汤姆孙的原子模型 α 粒子只能发生小角度的偏转，但实验中 α 粒子出现了大角度偏转，汤姆孙的“枣糕模型”被否定了。

③探索新的原子模型

现在我们随同卢瑟福一道分析实验结果，建立新的模型。为了便于分析研究，我们先观察轻塑料球去碰重铁球后，轻塑料球的运动方向(演示实验或多媒体课件)。

[再看投影片或多媒体课件] 观察大量高速运动的正电荷 $+q$ 与一个正电荷 $+Q(m_q \ll M_Q)$ 作用后，那些正电荷 $+q$ 的运动方向，分析并讨论结果。

离 $+Q$ 较远的 $+q$ ，不改变方向继续前进；离 $+Q$ 较近的 $+q$ ，发生大角度偏转；正对 $+Q$ 的 $+q$ ，被反弹回来。

第一说明：原子内是十分空的，绝大多数 α 粒子没有碰上带正电的质量大的物质，命中率很小。

第二说明：只有少数 α 粒子能接近带正电的物质，原子内部正电荷和原子的质量集中在很小的体积内。

第三说明：带正电的物质质量很大。

卢瑟福认为：带正电物质集中在很小的核内，它的质量几乎是原子的全部质量。

电子会不会静止在带正电物质的外围呢？它在原子内部又是怎样运动的呢？根据牛顿第二定律，电子只有绕核旋转才不致被吸引到核中去。由此，卢瑟福建立了新的原子结构模型。

[板书] 二、原子的核式结构模型

在原子的中心，有一个很小的核，叫做原子核，原子的全部正电荷和几乎全部质量都集中在原子核里，带负电的电子在核外空间运动。

让学生画一个原子核式结构模型，教师再用多媒体课件模拟原子核式结构。

问题4 原子核带多少正电荷？原子有多大？原子核有多大？

[板书] 三、原子核的电荷与尺度

让学生阅读教科书后知道：原子显电中性，原子核带正电荷数等于核外电子数；由化学知

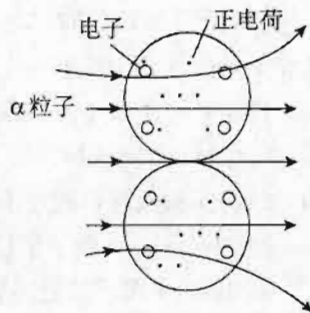


图 18-1

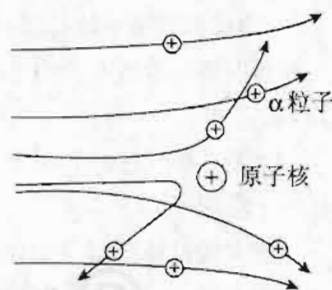


图 18-2

识可知,原子核带正电荷数等于原子序数;原子核由质子和中子组成(今后要学习),原子核带正电荷数等于核中质子数。

实验确定的原子核半径数量级 10^{-15}m ,而整个原子半径的数量级为 10^{-10}m ,两者相差十万倍之多。可见原子内部是十分“空旷”的。打个比方,假设原子是直径 100m 的球体,那原子核差不多只有小草上的一滴露珠那么大。再请学生打几个比方来比较原子和原子核的大小。

[小结](用多媒体课件展示)

①汤姆孙测比荷实验发现电子→汤姆孙原子模型→卢瑟福 α 粒子散射实验→卢瑟福原子核式结构模型。

②原子核的电荷数=电子数=原子序数=质子数

原子核半径数量级 10^{-15}m ,原子半径数量级 10^{-10}m 。

(3) 巩固提高

①在 α 粒子散射实验中,如果一个 α 粒子跟金箔中的电子相碰,那么()

- A. α 粒子发生大角度偏转 B. α 粒子不发生明显偏转
C. α 粒子被弹回 D. 以上都不对

②用原子的核式结构学说解释: α 粒子散射实验中为什么绝大多数 α 粒子仍沿原来的方面前进,只有极少数 α 粒子发生大角度的偏转?

③请用比喻的方法举一例,说明原子和原子核的大小关系。

④碳原子核的电量为多少?

(4) 课后作业:

①复习本节课文内容。

②思考本节“问题与练习”2、3题。

③把本节“问题与练习”的1、4、5题做在练习本上。

[参考题]

①试比较汤姆孙原子模型和卢瑟福原子模型的异同?

②卢瑟福 α 粒子散射实验表明()

- A. 原子带正电 B. 原子是一个球体
C. 电子在任意一个圆形轨道上运动
D. 原子内部的正电荷并不是均匀分布的,而是集中在很小的体积内

③ α 粒子散射实验中,卢瑟福用 α 粒子轰击金箔,下列四个选项中哪一项属于实验得到的正确结果()

- A. α 粒子穿过金箔时都不改变方向
B. 少数 α 粒子穿过金箔时有较大的偏转
C. 绝大多数 α 粒子穿过金箔时有较大的偏转
D. α 粒子穿过金箔时都有较小的偏转

④原子序数是100的元素,原子的带电量为()

- A. $+1.6 \times 10^{-17}\text{C}$ B. $-1.6 \times 10^{-17}\text{C}$ C. 0 D. $3.2 \times 10^{-17}\text{C}$

4. 教学设计说明

(1) 学习本节之前,学生已经了解了原子结构的初步知识,容易产生不重视的心理,由于



这部分知识基本属于定性介绍，他们对知识的来龙去脉并不清楚，所以教学中，要精心设计一些问题，并通过实物投影和多媒体课件手段，激起学生的学习兴趣和求知欲。不仅重视结论，而且注重过程，本节紧紧围绕原子结构“如何发现”这条主线进行教学，发展学生的思维，课堂以学生为主体，教师为主导。

(2) 本节教学中始终以实验为基础，通过宏观现象来研究微观结构，为了有助于观察，可以用课件模拟 α 粒子散射实验，在教学中突出问题提出的实验基础和研究问题的方法和过程。通过学习，使学生了解到人类是怎样在实验与理论的相互推动下不断加深对原子结构的认识的，教学中应重视辩证唯物主义观点和科学的思想方法的教育。

(3) 在教学方法上，可以采用教师提出问题，学生阅读、讨论以及教师启发、点拨，引导学生得出结论相结合的方法，培养学生的阅读能力，分析推理能力。

本节的教学环节是：电子的发现 $\rightarrow$ 汤姆孙枣糕式模型 $\rightarrow\alpha$ 粒子散射实验 $\rightarrow$ 原子的核式结构模型。

四、教学资源库

(一) 概念、规律和背景资料

1. J. J. 汤姆孙 (Joseph John Thomson, 1856—1940)

英国物理学家，电子的发现者。1856年12月18日生于曼彻斯特郊区齐山姆的一个出版商家庭。14岁进欧文学院学习。他原想成为工程师，在一位物理教师影响下决心转攻物理学。1876年成为剑桥大学三一学院的数学研究生。1880年，他通过了一项艰难而荣誉的考试，继1854年麦克斯韦以后第二位取得数学优等荣誉学位。次年，成为三一学院研究员。1884年春被选为英国皇家学会会员，随后转入卡文迪什实验室工作。1884年2月他完成精确测定电荷量绝对单位与电磁单位比值等实验研究，即被评选为卡文迪什实验室教授，接替瑞利的主任职位，这时他年仅27岁。1905年接替瑞利担任皇家学院自然哲学教授。1911~1913年任英国皇家学会副会长，1915~1920年任会长。1918年起担任三一学院院长。1919年他辞去长达34年的卡文迪什实验室教授职位，推荐他的学生卢瑟福继任，而自己留在实验室继续研究工作又长达21年。1940年8月30日在剑桥逝世。

汤姆孙最重要的贡献是发现了电子。最初，由于对麦克斯韦的电磁辐射理论感兴趣，他进行了阴极射线的研究。X射线的发现使人们对气体电离行为的考察更加深入，在阴极射线本质的争论中他明确支持粒子说。接着他用一个巧妙的实验成功地证实了阴极射线在电场和磁场中发生偏转——这是判定阴极射线确实是带电粒子的决定性证据。继而，他采用静电偏转力和磁场偏转力相抵消等方法确定阴极射线粒子的速度，测量出这些粒子的比荷，并进一步测出它们的质量约为氢原子质量的 $\frac{1}{1837}$ 。由此推断，阴极射线粒子比原子要小得多，可见这种粒子是组成一切原子的基本材料。汤姆孙于1897年4月30日宣布了他的发现。后来人们命名这种粒子为电子，电子是人类所认识的第一种基本粒子。此后，他又提出了“电子浸浮于均匀正地球”的原子结构模型（汤姆孙模型）。该模型虽然在后来被卢瑟福的核原子模型所替代，但它



是建立原子结构模型的开端。1906年,由于汤姆孙对电子研究的重要贡献而被授予诺贝尔物理学奖,1908年又被册封为爵士。

汤姆孙的另一个重要贡献是在研究极隧射线(穿过阳极细孔的带正电的粒子流)时发展了质谱方法。他的方法经过同事F. 阿斯顿(F. W. Aston, 1877—1945)的改进和完善,发展为今天的质谱仪。在极隧射线的研究中,他根据实验现象最先指出,普通元素也可能有同位素。1913年首次用物理方法成功地分离出了稳定元素的同位素,从而确立了这一事实。他也是经典金属电子论的创始人之一。

此外,汤姆孙还是一位卓越的教师和科研事业领导人,他在担任卡文迪什实验室教授期间,创建了完整的研究生培养制度并培育了良好的学术风气。他理论与实验并重,特别提倡自制仪器,又善于抓住要害,进行精确的理论分析。他的博学、敏捷、科学直觉、想像力与创造力带领着一大批学者前进在科学前沿上,使卡文迪什实验室成为国际物理前沿研究中心之一。他的学生有7人获诺贝尔奖,27人取得英国皇家学会会员资格。他还努力促进大学与中学物理教学的提高,写出了几本出色的教材。英国能够在20世纪前30年在原子物理学领域保持重要的领先地位,汤姆孙的有力指导和优秀教学能力起了相当作用。

2. 卢瑟福(Ernest Rutherford, 1871—1937)

英籍新西兰物理学家。1871年8月31日出生于新西兰南岛纳尔逊城南明水村一个农民(苏格兰移民)家庭。小时就聪慧好学,勤于动手。12岁就对大学教授B. 斯图瓦特写的教材《物理学入门》写下批语:“信息并不太多……竭力锤炼人的心智”。他喜好数学和巧于实验,设计过测量快速交变电磁效应的仪器。各科成绩优秀,得过多次奖学金。他18岁进入新西兰大学坎特伯雷学院,后在该学院获得硕士学位。大学时代他就在地窖内开展无线电信号收发的实验研究。1895年获剑桥大学首批研究生奖学金,同年进入卡文迪什实验室,成为J. J. 汤姆孙的研究生。1898年加拿大蒙特利尔的麦吉尔大学聘任27岁的卢瑟福为物理学教授。1907年他回英国担任曼彻斯特大学实验物理学教授。1919年应邀到剑桥接替J. J. 汤姆孙担任卡文迪什实验室主任。1925年当选为英国皇家学会主席。1931年受封为纳尔逊男爵。1937年10月19日在剑桥逝世。

卢瑟福对科学的重要贡献主要有三方面。第一方面是关于放射性的研究。继1898年贝可勒尔发现放射性现象后不久,卢瑟福发现了铀放射性辐射的不同成分—— α 辐射和 β 辐射。1900年提出了重元素自发衰变理论。1904年总结出放射性产物链式衰变理论,奠定了重元素放射系元素移位的基本原理。他的发现打破了元素不会改变的传统观念,使人们对物质结构的研究进入了原子内部的深层次,为开辟一个新的学科领域——原子核物理做了开创性工作。由于他“在元素蜕变及其放射化学方面的研究”而荣获1908年度诺贝尔化学奖。第二方面是1911年提出了原子的有核结构模型。1908年卢瑟福用实验证明了 α 粒子就是氦离子。此后,他通过 α 粒子被物质散射的研究,从理论和实验验证上无可辩驳地论证了原子的有核结构模型,从而把原子结构的研究引向正确的轨道。因此,他被誉为“原子物理学之父”。1919年人工核反应的实现是卢瑟福的第三项重大发现。这一发现过程可以作为卢瑟福科学方法与作风的典型例证之一。1915年,他的学生马斯登(E. Marsden, 1889—1970)发现用 α 粒子轰击空气时出现一些粒子,它们具有不寻常的长射程。卢瑟福决心利用业余时间长期而耐心地搞清楚这些粒子到底是N、He、还是H原子、Li原子?他设计了装置,为了使他的结果绝对可靠,他花了3年时间于1919年证明,这是 α 粒子轰击N核后使之衰变放出了氢原子核即质子: ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$ 。这一装置的成本极为低廉,但用显微镜观察屏上闪烁的工作极为艰苦!

这一实验的成功引起了一场热烈争论，最后以云室照片证明了卢瑟福的正确而告终。这标志着人类第一次实现了改变化学元素的人工核反应。古代炼金术士转化元素的梦想终于变成了现实！

此外，他还预言了重氢和中子的存在，这在后来都得到了证实。他同查德威克和艾利斯合作，于1930年出版了巨著《从放射性物质发出的辐射》，这部著作是早期核物理学的总结并具有当代水平。

3. 玻尔 (Niels Hendrik David Bohr, 1885—1962)

丹麦物理学家。1885年10月7日生于哥本哈根。7岁入小学后成绩一贯优异，敢于公开指出教材或教师讲课中的差错。从小爱好足球，身体很好，也擅长手工，他说过：“我是像一个哲学家和一个工匠那样地对物理学发生兴趣的。”父亲是哥本哈根大学生理学教授，玻尔少年时经常随父亲参加每周星期五丹麦科学家的家庭学术性聚会，受到了许多潜移默化的科学熏陶。18岁时进入哥本哈根大学的数学和自然科学系，主修物理学。大学低年级时参加哲学课外小组“黄道社”，积极地参加各种问题的讨论。大学二年级时他热衷于研究水的表面张力问题，他自己设计与制造仪器，吹制玻璃管，做完一次实验往往需要若干小时。在精确测定的基础上，他参加了丹麦皇家科学院的有奖征文，他用振动射流法对水的表面张力进行实验和理论方面的研究，获得金质奖章。1909年获该校硕士学位。1911年，以论文《金属电子论的研究》获博士学位。同年9月，他到英国剑桥卡文迪什实验室进修。据说他第一次与导师J.J. 汤姆孙见面时，就操着不熟练的英语把他论文中批评汤姆孙的段落当面指出，使导师大为光火，因而给以冷遇。在一次实验室年度聚餐会上他聆听了来访的卢瑟福的长篇演说，为他的性格和成就所折服，随即于1912年3月转到了曼彻斯特随卢瑟福工作，这成了他一生的重要转折点。

他从研究不同的铝片对 α 射线的吸收问题开始，思考原子结构问题，并超负荷地全力工作。在这里他参加了卢瑟福的科学集体，并和卢瑟福建立了长期的亲密关系。当时人们对原子内部结构知之极少，只停留在光谱学和化学元素周期表的经验水平上。同时，按照卢瑟福的有核模型，明显地出现了正常状态下原子和分子的稳定性问题。不突破经典理论的框架，这一矛盾是难以解决的。1912年7月，他尝试着把量子概念和有核模型结合起来，写了一份论文提纲给卢瑟福。这一提纲后来被史学界称为《卢瑟福备忘录》。1912年9月，他受聘在哥本哈根大学任教。他利用业余时间奋发努力，形成了自己的理论。1913年7月起，他以《论原子构造和分子构造》为题，连续三次在英国《哲学杂志》上发表论文，后来被称为“伟大的三部曲”。这篇论文的三大部分是：“正核对电子的束缚”“只包含单独一个原子核的体系”“包含多个原子核的体系”。论文提出了五条公设（后来一般教科书中归纳为三条）。在玻尔的原子理论中，最重要的是引入了“定态”和“跃迁”这两个全新的概念。“定态”概念把经典物理学在一定边界条件和初始条件下所允许的各种连续状态进行筛选，只允许某些分立状态存在，从而排除了定态之间的其他状态，形成若干鸿沟。“跃迁”（最初叫“过渡”）则把一个定态到另一定态的变化看成一种突然的、整体的、不需时间的行为，不允许经典物理那种逐渐的、连续的、分阶段动作。两个状态之间的能量差形成了原子发射和吸收光的机制。这两个新概念解释了原子世界中原来互不关联的许多实验事实，如 α 粒子大角度散射，氢原子线光谱的各种公式，不同元素的X射线谱等。玻尔理论促进了新谱线系（如赖曼系）的寻求和概括，核算了里德伯常量。天文学上发现的星体上的某些谱线（皮克林系）原来人们认为是属于氢原子，玻尔理论指出应属于氦原子并得到了实验验证。J. 弗兰克和



G. 赫兹通过碰撞测出原子的“电离能”，玻尔指出这是原子的“激发能”，由此可以肯定地证明原子定态的存在。玻尔的成功使他 1916 年（31 岁）担任了哥本哈根大学教授，1917 年被选为丹麦科学院院士。

为了克服说明其他元素光谱时遇到的困难，并且进一步解释光谱线的强度、偏振以及原子其他诸多性质，说明元素周期表的构成等，1918 年玻尔提出了对应原理，它的大意是说：在同一问题的经典理论与量子理论之间，总可以从形式上找到相对应的类比关系。他认为：对一个周期性体系来说，用经典理论（如用经典广义坐标中的傅里叶系数）来描述周期性体系的运动，和用量子理论（如体系的跃迁概率）来描述时，两者存在着简单的对应关系。这一理论后来导致了海森伯矩阵力学的发展。玻尔利用这一原理，合理地解释了众多的现象，如各元素的光谱与 X 射线谱、原子中电子的组态和元素周期表等。1922 年 12 月，玻尔由于上述这些成就荣获诺贝尔物理学奖。

1921 年，玻尔倡议并建立了哥本哈根大学理论物理学研究所，并领导这一世界性的科学中心 40 年，形成著名的哥本哈根学派，在量子力学的发展中起着独特的作用，取得了许多重大的成果，并培养出大批优秀的学者。例如，玻尔的对应原理导致了海森伯矩阵力学的形成；在相互的启发鼓励下涌现了玻恩对波函数的概率诠释；海森伯的不确定原理；以及后来玻尔提出的互补原理等。20 世纪 30 年代中期，玻尔还提出了关于原子核构成的“液滴模型”、复合核概念等，促进了重核裂变的发现和原子核能的研究。

玻尔待人诚恳，善于激发年轻科学家们的科学热情。1961 年访问苏联时，他的学生朗道请教他有什么秘诀把许多才华横溢的青年团结在自己周围，他说：“没有什么秘诀，只是我不怕在他们面前显露我的愚蠢。”他在丹麦被纳粹占领期间，坚决不参加傀儡政府组织的活动，而和地下爱国组织密切合作，组织专门机构营救被希特勒迫害的德、意等国大批知识分子。1943 年，他逃脱了德军的逮捕，经瑞典转赴英、美，参加了英美联合研制原子弹的工作。他担心核武器出现后如何保卫世界和平问题，为此 1950 年他发表了《致联合国的公开信》。在他倡议下玻尔建立并领导了欧洲核子研究中心和北欧原子物理研究所。

1937 年夏季，玻尔及其子 A. 玻尔到中国上海、杭州、南京和北平等地访问，表达了对中国人民的友谊。1947 年他亲自设计了自己的族徽，其中心图案是中国的古代八卦“太极图”，形象地表达了他的互补思想。

1962 年 11 月 18 日，他逝于哥本哈根。

4. 吸收光谱

让炽热固体发出的白光通过较冷的钠蒸气（在酒精灯心上放一些食盐，食盐受热分解就产生钠蒸气），可以看到在连续谱的背景上出现两条挨得很近的暗线，这两条暗线的波长恰好跟钠蒸气的发射光谱中两条黄色亮线的波长相同。实验表明，白光通过每一种气体时，光谱中都会产生一组暗线，每条暗线的波长都跟那种气体原子的一条特征谱线相对应。这表明每种气体都从通过它的白光中吸收跟它的特征谱线波长相同的那些光，使白光的连续谱中出现暗线。连续谱中某些波长的光被物质吸收后产生的光谱，叫做吸收光谱。吸收光谱中的暗线也是原子的特征谱线，只是通常在吸收光谱中看到的特征谱线比明线光谱中的要少一些。

5. 原子结构的探索

原子是物质结构的一个层次。原子一词来自希腊语，意思是最小的、不可分割的物质粒子。自古以来，面对五彩缤纷、变化万千的自然界，人们一直在思索着这样一些问题：我们周围的物质世界到底是由什么构成的？有没有最小的物质单元结构？人们向往揭开物质结构之

谜。世界上每一个古老民族都对物质本源的探索注入了自己对客观世界的理解。

在古代,人们主要靠直觉和猜想来描述世界。古埃及人和古巴比伦人认为世界万物是由水、气、土产生的。我们的祖先早在周代就提出了“五行”说,认为万物是由金、木、水、火、土这五种物质组成的。古希腊学者则认为土、气、水、火这四种元素是万物组成的本源。这些观点反映了低水平的生产条件下人们对日常生活经验的分析和概括。春秋战国时期,墨翟提出了“端”是物质的起始,是组成实体物质的一种极小的、最原始的微粒。他认为物质可以对半地分下去,如果剖分到“无”,就不能再剖分下去了,这里体现了原子说的思想。把构成物质的最小单元叫做“原子”的是古希腊唯物主义哲学家德谟克利特,其含意是不可再分割的意思。当时认为原子的种类和数量都无限多,在空间处于永恒的运动之中。这种观点对于19世纪末20世纪初才正式确立的近代“原子论”有直接和深刻的影响。

人们对于物质结构的探索经历了一个漫长的历史时期。从古希腊创立原子论以来,在2000多年里没有多大的进展,一直到了18世纪后半期到19世纪中期,人们通过生产实践和大量化学、物理实验,才加深了对原子的认识。虽然严格把原子模型应用到气体分子动理论,最早是18世纪末由伯努利提出来的,但是,原子概念却首先在化学这个科学分支上表现出其重要性。19世纪初,道尔顿的原子假设在定性地和定量地解释许多化学现象方面获得巨大成功。自300年前英国科学家玻意耳提出化学元素的概念并指出化学元素是不可再被分解的最简单的物质(当然,这是指只用化学的方法来分解物质)以来,到19世纪中期,随着科学技术的迅速发展,人们已经发现了60多种物质元素。这时,一个问题很自然地提了出来:自然界究竟有多少种元素?它们之间有没有内在的联系?这些元素是不是由更简单的东西所组成?1869年,俄国科学家门捷列夫从已发现的元素中发现了规律性,并将它们排列成“元素周期表”,从而揭示出一个非常重要而有趣的规律:元素的性质随着原子量的增加而呈现周期性的变化。根据表中的空缺,还预测了未发现的元素与特性。元素周期表是人类总结了对物质世界的认识的实践经验而产生的,它与阿伏加德罗定律和法拉第电解定律的发现一样,都是19世纪人们在探索物质结构的微观层次中所获得的重大成就。它们使原子假设成为高度可信的学说,但是真正确立原子的概念是在20世纪初。现在我们都知我们周围的一切物质都是由元素构成的,每一种元素都有化学性质相同的原子。所以人们常说原子是构成物质世界的“基本砖石”。从现代物理学发展来看,人们对物质结构层次的认识也已经越来越深入,物质的最小构成单元已经不再是分子、原子,卢瑟福的 α 粒子散射实验揭示了原子的核式结构。后来人们又发现原子核是由质子和中子构成,20世纪中、后期又发现了夸克和轻子,夸克和轻子是否还有结构,这个问题正有待人们的进一步研究。

6. 原子的量子模型

玻尔模型为人类了解原子结构做出了重大贡献。除了计算发射光谱外,玻尔和他的学生还用它计算氢原子的电离能。原子的电离能是指从一个原子完全释放一个电子所需的能量。玻尔小组算出的数值与实验数据吻合得很好。利用摄谱仪从许多元素取得的数据,玻尔和他的小组就可以确定元素的能级了。玻尔模型对一些元素的化学性质提供了进一步解释,原子中的电子分布对每一种元素是唯一的观点,在很大程度上是化学反应和化学键知识的基础。

玻尔的假设不能在已知物理学的基础上获得解释。例如,电磁理论认为加速的带电粒子辐射能量将使原子迅速塌缩。另外,玻尔不能说明角动量量子化的理由,那么,玻尔的工作如何能建立在坚实的基础上呢?

第一个为这些问题解决提供提示的是德布罗意。他认为粒子具有波动性,就像光具有粒子

性一样。具有动量 mv 的粒子的波长先前定义为 $\lambda = \frac{h}{mv}$ ，且角动量被定义为 $mvr = \frac{hr}{\lambda}$ ，玻尔的量子条件 $mvr = \frac{nh}{2\pi}$ 可被写成如下形式

$$\frac{hr}{\lambda} = \frac{nh}{2\pi}, \text{ 或 } n\lambda = 2\pi r$$

注意到玻尔轨道的圆周 $2\pi r$ 等于电子波长 λ 的整数 n 倍。

1926年，奥地利物理学家薛定谔（E. Schroedinger, 1887—1961）利用德布罗意的波动模型，创建了原子的波动量子理论。这个理论并没有像玻尔做的那样设定原子简单的行星模型。尤其是，电子的轨道半径不同于行星绕太阳轨道。

物质的波粒二象性意味着不可能同时知道一个电子的位置和动量。于是，现代原子的量子模型（quantum model）仅预言了电子在特定位置的概率。在氢原子中，电子距原子核的最可能的距离被发现等于玻尔轨道半径。电子在任一半径处的概率就可被计算出来，显示等概率区域的三维图也可被构建起来。其中发现电子概率高的区域被称为电子云（electron cloud）。

虽然原子的量子模型很难形象化，但利用波的性质研究物质的量子力学（quantum mechanics），就是利用这一模型在预测原子结构的细节方面取得了巨大的成功。除了最简单的原子外，对其他原子这些细节是非常难以精确计算出来的，只有用非常高级的电子计算机才能计算出较重原子的高度精确的近似。量子力学也使计算许多分子的结构成为可能，使化学家能够确定分子中原子的分布。用量子力学指引，化学家已经可以创造新的和有用的分子，否则这是不可能的。

量子力学还被用于分析原子发射和吸收光的细节。作为这一理论的结果，一种新型光源被发展了出来。

（摘自《物理：原理与问题》第三册，[美] 保罗·齐策维茨著，上海科学技术出版社，2005年，有改动）

7. 氢原子的量子理论

（1）电子的波粒二象性

玻尔理论第一次从理论上解释了氢原子光谱的实验规律，揭示了微观领域里物质运动的一个基本特征——物理量的量子化。但是玻尔理论本身是矛盾的。它既承认经典理论的规律，又加上同经典理论基本概念相矛盾的量子化条件，成了经典与量子的混杂理论。一方面玻尔把电子看做经典力学中的粒子，在库仑静电力作用下绕核做圆周运动，另一方面又硬性规定没有电磁辐射产生，这显然是相互矛盾的。另外，当电子从高激发态跃迁到低激发态或基态时，只给出了所发射的电磁波能量与能级差的关系，没有说明电子是否可从高能态跃迁到任一低能态以及跃迁的概率是否一样等问题。事实上电子从高能态到低能态的跃迁是受一定限制的，有些能态间的跃迁不可能发生。在玻尔理论中找不到解决这些问题的答案。面对这些困难，人们期待着新思想的产生。

这个新思想就是电子的波动性，即电子与光子一样，具有波粒二象性。最早提出必须赋予电子以波动性的是德布罗意。1924年，德布罗意在光的波粒二象性的启发下，提出了静止质量不为0的实物粒子也具有波粒二象性的假说。德布罗意当时还仅仅是巴黎大学的研究生，在爱因斯坦的光量子理论通过密立根、康普顿等研究得到证实后，德布罗意对此发生了兴趣，他认为在研究光的理论中，必须“同时引进粒子概念和周期性概念”。对于光本身必须同时考虑粒子性和波动性。他进一步研究了几何光学和经典力学的对应性，由此大胆设想，不仅光有粒



子和波动两种性质,“一般的”物质也具有这两种性质。德布罗意认为:既然粒子概念成功地解释了令人困惑的康普顿效应,那么,波动概念也应能解释令人困惑的定态。

1923年9月10日,德布罗意发表了题为《波和粒子》的论文,提出了物质波的概念。他认为像电子、质子、原子等粒子当被接收器接收到时,其质量、电荷、动量、能量等都显示出一份一份的颗粒性质,但从这些粒子的空间存在和运动特征上看,它们又有点像波。一定运动状态下的粒子同一定函数形式的波相似,当遇到适当的障碍物时会显示出衍射、干涉等波动性质。仿照爱因斯坦关系,德布罗意将粒子能量 ϵ 、动量 p 与相应的物质波的波长 λ 与频率 ν 建立如下联系

$$\epsilon = h\nu \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

称为德布罗意关系。对于动量为 p 、能量为 ϵ 的自由运动粒子,描述其空间运动的物质波是单色平面波

$$\varphi_p(\mathbf{r}, t) = A \exp\left\{\frac{i(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r} - \epsilon t)}{\hbar}\right\}$$

由德布罗意关系,可求出几种物质粒子的物质波波长。

电子: 动能 $E_k = 1 \text{ eV}, \quad 10 \text{ eV}, \quad 100 \text{ eV}$
 波长 $\lambda = 12.2 \text{ \AA}, \quad 3.9 \text{ \AA}, \quad 1.22 \text{ \AA}$

微尘: 质量 $m = 10^{-15} \text{ kg}$, 速度 $v = 1 \text{ cm/s}$
 波长 $\lambda = 6.6 \times 10^{-7} \text{ \AA}$

子弹: 质量 $m = 20 \times 10^{-3} \text{ kg}$, 速度 $v = 500 \text{ m/s}$
 波长 $\lambda = 6.6 \times 10^{-25} \text{ \AA}$

从上面的计算可知,微尘与子弹等粒子的物质波波长太短,以致无法察觉它们的波动性。因此,一般来说它们服从牛顿运动定律,只把它们看成粒子。但在微观领域,物质波的波长与它们运动的空间范围的线度同数量级,甚至还大。因此,如果还把电子看成是满足宏观运动规律的粒子来讨论其在微观领域中的运动,显然与事实不符,这也正是玻尔的定态轨道理论中产生矛盾的根本所在。

德布罗意用物质波概念分析了玻尔量子化条件的物理基础。根据波动的观点,同时考虑到氢原子中离散的能级,德布罗意认为氢原子中电子波沿绕原子核的圆轨道传播一周后应光滑地连接起来,这样就要求轨道的圆周长应是波长的整数倍,如图18-3所示。即

$$2\pi r = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

也就是说,电子波在相应轨道上形成驻波,式中 r 是电子绕核的轨道半径, λ 是电子波的波长。利用德布罗意关系,可以得出玻尔的量子化条件

$$L = r p = \frac{nh}{2\pi} = n\hbar \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

这里 L 表示角动量。这样,我们就由物质波的驻波条件,比较自然地得出了玻尔量子化条件。

1923年9月24日,即在发表题为《波和粒子》的论文两星期后,德布罗意发表了《光量子,衍射和干涉》的论文,引进了相波的概念。他预言:“一束电子穿过非常小的孔可能产生衍射现象,这也许是实验上验证我们想法的方向。”这一设想在以后的实验中得到了证实。半个月后,德布罗意又写了关于几何光学和经典力学类比的论文。1924年德布罗意将这3篇论

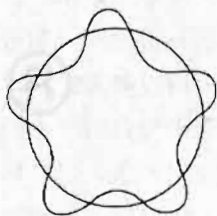


图 18-3

文合在一起成为他的博士论文。

德布罗意假设的正确性必须要由实验验证。如前所述, 100 eV 动能的电子相应的波长在埃的数量级, 这相当于 X 光的波长范围, 因此人们设想如果将电子束投射到晶体上应能看到衍射现象。戴维孙和革末首先按照这一思想做了实验, 并取得了成功, 同时英国的 G. P. 汤姆孙 (发现电子的汤姆孙的儿子) 也完成了类似的电子衍射实验, 这些实验完全证实了德布罗意的假设。德布罗意因提出物质波假设荣获 1929 年度诺贝尔物理学奖。而戴维孙、革末和 G. P. 汤姆孙则获 1937 年的诺贝尔物理学奖。

(2) 粒子运动的不确定关系

对于微观粒子所表现出的波粒二象性, 说明我们不能把微观粒子想象成宏观粒子那样的空间图像。对于宏观粒子, 通常我们可以用某个时刻粒子的位置和速度来描述它在该时刻的运动状态, 并与一定的粒子轨道相联系。但对于微观粒子, 由于不能忽视其波动性, 因此与微观粒子运动相关的物理现象明显地表现出与经典物理概念所预期的完全不同的特点, 例如, 我们不可能同时准确确定它的位置和速度。1927 年, 德国物理学家海森伯提出了描述微观粒子运动的极为重要的关系式, 这就是不确定关系。

图 18-4 所示为电子单缝衍射实验。设单缝的缝宽为 Δx , 电子束垂直于单缝入射, 则入射电子的动量为 p , 方向垂直于单缝方向, 设其为 y 轴方向。 Δx 表明了衍射时电子的 x 坐标的不确定性, Δx 越大则电子的 x 坐标越不确定。但是随着 Δx 的减小, 电子束经单缝后的衍射角就越大。如果仅考虑单缝衍射的中央主极大条纹, 并由此反推电子在经过单缝时的运动方向, 显然其动量方向应在 p' 和 p'' 的方向之间。这样在电子通过单缝确定其 x 位置

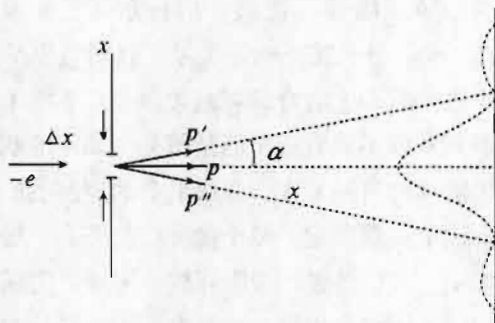


图 18-4 电子单缝衍射

时, 其动量分量 p_x 变得不确定了, p_x 的不确定程度为 $\Delta p_x \approx |p' - p| \approx p \sin \alpha$ 。利用单缝衍射公式和德布罗意关系, 可得 x 坐标位置的不确定量 Δx 和 p_x 的不确定量 Δp_x 的乘积

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx \Delta x \cdot p \sin \alpha = \frac{h}{\lambda} \cdot \lambda = h$$

同理可推得

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \approx h \quad \Delta z \cdot \Delta p_z \approx h$$

这些关系式一般称为不确定关系。也就是说, 对于一个微观粒子, 例如电子, 不能同时具有确定的坐标位置和相应动量。如果 $\Delta x \rightarrow 0$, 即电子的位置完全确定时, 则其动量完全不确定, $\Delta p_x \rightarrow \infty$; 反之亦然。不确定关系反映了微观粒子运动的客观规律。进一步考虑后, 不确定关系应为

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2}$$

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \frac{h}{2}$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq \frac{h}{2}$$

另有关于能量状态的不确定关系

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2}$$

其中 ΔE 是粒子处于某一状态的能量的不确定性, Δt 是在此状态下所停留的时间 (即平均寿命)。

下面利用不确定关系来定性地说原子中为何会有定态存在。按照近代量子力学的观点, 电子在原子中呈电子云分布, 也就是说, 电子在原子中位置坐标的不确定性为原子的线度, 设其为 Δx 。如果电子在原子核的吸引下掉向原子核, 则电子位置的不确定性 Δx 将变小, 从 0.1 nm 量级的活动范围 (原子线度), 缩小到接近核范围 (10^{-8} nm)。根据不确定关系, 电子的动量不确定性 Δp_x 必然要逐渐增大。于是电子的动量将越来越大, 其动能也越来越大, 这样就产生了一种抗拒电子落入核内的排斥倾向。这种排斥作用随着电子与原子核间距离的减少而增强, 最后达到某种平衡, 形成一个个稳定的量子态。因此, 不确定关系保证了原子中的电子可处于一个个定态而不会掉入原子核内。

让我们再来看关于能量状态的不确定关系式, 该式表明, 物体具有的能量越确定 (ΔE 越小), 处在这种能量状态的时间 Δt 就越不确定 (Δt 越大); 反之亦然。如果用这种理论来考察氢原子的能量与能级, 由玻尔理论, 氢原子中某一能级的能量状态值是完全确定的, 即 $\Delta E=0$, 那么按不确定关系, 这时氢原子系统将可能永远处于这个能量状态上, 或者说系统处于这个状态上的寿命将是无限长。事实上, 原子的能级间有跃迁发生, 由此可知, 原子的激发态其实都不能看成是能量值完全确定的状态, 每个能级都有一定的能量的不确定宽度 ΔE , 称为能级的自然宽度。能级的自然宽度 ΔE 与原子处在这个能级上的寿命 Δt 之间的关系由上述不确定关系确定。原子激发态的寿命一般约为 10^{-8} s , 所以原子激发态能级的自然宽度 ΔE 约为 10^{-7} eV 量级。考虑到这一因素, 实际上原子能级跃迁时发射出的谱线并不是波长完全确定的一条理想线光谱, 而是有一定波长分布宽度的谱线, 这个宽度称为谱线的自然宽度, 这已为实验所证实。

(3) 量子力学对氢原子的处理

这里我们不准备解量子力学的薛定谔方程, 而仅仅是用解氢原子薛定谔方程所得的结论, 来描述氢原子。首先, 德布罗意提出了电子的波粒二象性后, 可用单色平面波描述自由电子的波动。氢原子的电子处在库仑势场中, 因此, 能量中还有势能项。解薛定谔方程后, 可求得氢原子的波函数。对于定态, 氢原子的波函数可表述为

$$\psi_{nlm}(r, \theta, \phi) = R_{nl}(r) Y_{lm}(\theta, \phi)$$

$$n=1, 2, 3, \dots$$

$$l=0, 1, 2, 3, \dots, (n-1)$$

$$m=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$$

其中 $R_{nl}(r)$ 是径向波函数, $Y_{lm}(\theta, \phi)$ 为角向波函数, n 称为主量子数, l 为角量子数, m 为磁量子数。

波函数有什么用呢? 或者说波函数有什么实在的物理意义呢? 玻恩对微观粒子波函数 $\psi(r, t)$ 的物理意义解释如下: 波函数 $\psi(r, t)$ 绝对值的平方 $|\psi(r, t)|^2$ 是 t 时刻粒子在 r 处出现的概率密度。而 $|\psi(r, t)|^2 dV$ 是 t 时刻粒子出现的 r 点附近 dV 体积元内的概率。

现在回过头来讨论氢原子的波函数, 显然 $|R_{nl}(r)|^2$ 描述的是电子在径向的概率密度。我们不能确切地知道电子将在原子中的何处出现, 而只能说, 电子在该处出现的概率是多少, 所以我们说电子在原子中的位置的分布可以用“电子云”图形描绘, 它与量子数 n, l 有关。通

常把不同 l 的电子状态用不同的英文字母来表示: $l=0, 1, 2, 3, \dots$ 的运动状态分别叫做 s, p, d, f, g, ... 运动状态。根据氢原子的径向波函数 $R_{nl}(r)$ 可以算出电子在径向的概率分布 $w_{nl}(r) = r^2 R_{nl}(r)$ 。氢原子头几个如 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d 态的径向概率分布函数 $w_{nl}(r)$ 如图 18-5 所示。由图可以看出, 主量子数 n 越大的状态, 电子出现概率最大处距核越远, 平均距核距离也越大。当 n 取一定而 l 不同的状态, 电子出现最大概率处离核距离也不同。

同理, 根据氢原子的角向波函数 $Y_{lm}(\theta, \phi)$ 可以算出电子在角向的概率分布 $\tau_{lm}(\theta, \phi)$ 。其角度概率分布函数如图 18-6 所示。将这平面概率分布图绕 z 轴一圈, 即得出空间各个方向上电子的概率分布情况。从图上可以看出, 一定 l, m 状态下, 各个方向上电子概率分布成对称形状。s 态的电子概率分布是球对称的。p 态电子概率分布有两种: $m=0$, 则沿 z 轴方向电子概率分布最大, 垂直于 z 轴方向概率为 0; $m=\pm 1$, 对应垂直于 z 轴方向概率最大, 沿 z 轴方向概率为 0。

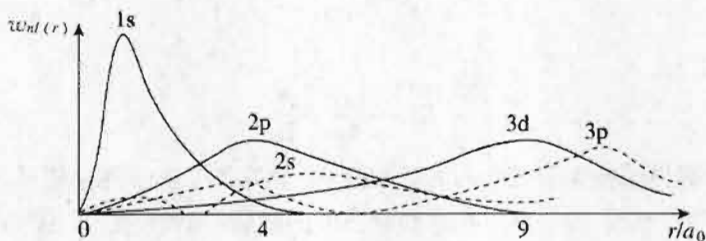


图 18-5 氢原子中电子的径向概率分布

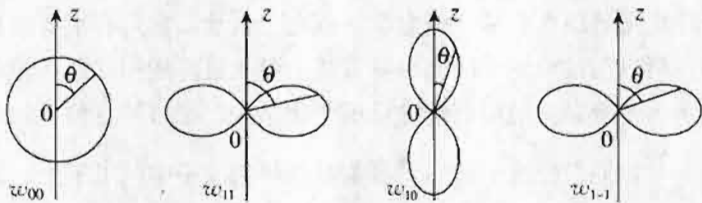


图 18-6 氢原子中电子角向概率分布图

下面给出有关氢原子的另外几个重要结论。

①解氢原子的定态薛定谔方程并使定态波函数满足标准化条件, 自然地得到氢原子能量是量化的, 其能量公式与玻尔理论的结果相同。

②原子内的电子在有心力场作用下的空间运动状态是由主量子数 n 、角量子数 l 和磁量子数 m 确定的波函数 $\psi_{nlm}(r)$ 描述的。一组量子数 n, l, m 就确定一个一定的波函数 $\psi_{nlm}(r)$, 也就确定了一个电子的运动状态。

③氢原子的能级由主量子数 n 确定, 而电子的运动状态由 n, l, m 确定, 因此, 一个能级对应多个运动状态, 这种现象称为能级的简并。能级 E_n 对应的不同状态数叫做能级的简并度。氢原子能级的简并度为 n^2 。

④将氢原子中电子的空间坐标作反射变换 $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$, 则其波函数作 $\psi_{nlm}(-\mathbf{r}) = (-1)^l \psi_{nlm}(\mathbf{r})$ 变换, 这表明有心力场中的电子运动状态有宇称性, l 为奇数的状态为奇宇称, l 为偶数的状态为偶宇称。一般而言, 由宇称可知哪些能级间的跃迁是禁止的, 但跃迁禁戒不仅受宇称的限制, 其他因素也有作用, 视具体元素与能级而定。

(摘自《原子、原子核和粒子物理》, 胡炳元编著, 人民教育出版社, 2006 年)



8. 为什么说氢原子中电子的能量代表了氢原子的能量? 氢原子的状态能量为什么是负值?

严格讲, 在氢原子中, 电子和核在库仑力作用下绕公共质心运动。这时应以折合质量 μ 取代只考虑电子运动时的电子质量。 $\mu = \frac{m_{\text{核}} m}{m_{\text{核}} + m}$, 其中, $m_{\text{核}}$ 、 m 分别代表核和电子的质量。因为 $m_{\text{核}} \gg m$, $\mu \approx m$, 这样, 就可近似地认为核是固定不动的, 电子的运动状态就反映了原子的运动状态。因此, 在忽略核的运动时, 电子的能量就等于原子的能量。

由于电子处在核的引力场中, 电子的能量由它的动能和它在核库仑场中的势能构成。选择电子离原子核无限远处的势能为 0, 它的能量由下式表示

$$E = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

式中 v 为电子的轨道运动速率, 它可由下式求得

$$\frac{m v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

因此

$$E = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{2r}$$

所以说, 选择电子离原子核无限远处的电势能为 0, 就导致了电子的总能量为负值。总能量为负值是“束缚态”的特征, 表示电子在这些状态中的能量都小于它脱离原子而静止于无限远处时的能量。

9. 玻尔理论的定态概念为什么在现代原子物理中仍然有效?

玻尔的氢原子理论把普朗克的量子概念运用到电子运动, 它具有重要的意义, 即一个电子在玻尔轨道中运动, 可以与这个电子的德布罗意波沿着轨道传播相联系。德布罗意把原子中的定态与驻波联系起来, 十分自然地得到角动量量子化条件。德布罗意假设认为: 体现电子波动性的波长为 $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$, 如果把这个德布罗意关系用到氢原子中的电子上, 要使绕核运动的电

子能够稳定存在, 与这个电子相联系的波就必须是一个驻波, 即电子绕核一圈后, 这个波的相不变, 如图 18-7 所示, 否则电子波必将毁掉。换言之, 要使电子稳定运动, 电子绕核旋转一周的周长必须是与其相应的波长的整数倍, 即

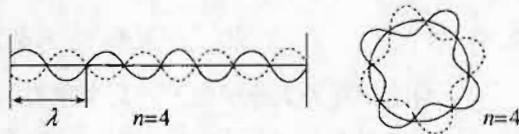


图 18-7

$$2\pi r = n\lambda = \frac{nh}{mv}, \quad n=1, 2, \dots$$

改写一下为

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

这就是玻尔曾经给出过的量子化条件

$$L = n\hbar, \quad n=1, 2, \dots$$

椭圆轨道的周长也等于德布罗意波长的整数倍 (证明略)。

由此可以看出, 一个波要被束缚起来, 就必须是一个驻波, 而驻波的条件就是角动量量子化条件。

为了证明以上论述的正确性, 不妨将玻尔第一轨道速度 $v_1 = \alpha c$ (α 为精细结构常量) 代入

关系式 $\lambda = \frac{h}{mv}$ 即

$$\lambda = \frac{h}{mac} = \frac{h}{mc} \cdot \frac{1}{\alpha} = 2\pi \frac{h}{mc} \cdot \frac{1}{\alpha}$$

其中 $\frac{h}{mc} \cdot \frac{1}{\alpha}$ 也即第一玻尔轨道半径 a_0 , 故有

$$\lambda = 2\pi a_0$$

由此可证明, 所得的结果确实满足驻波条件。

10. 为什么有时应用经典力学的方法来描述电子的运动, 仍然可以得出近似正确的结论呢?

现举例说明:

例如, 阴极射线管中的电子束, 在一般情况下, 电子速度为 $v = 10^5$ m/s, 如果测量电子速度的精确度为千分之一, 即 $\Delta v = 10^2$ m/s, 按照不确定关系可得坐标的不确定范围

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{h}{2m\Delta v} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times \frac{1}{6.2}}{2 \times 0.91 \times 10^{-30} \text{ kg} \times 10^2 \text{ m/s}} \\ &\approx 6.0 \times 10^{-7} \text{ m} \end{aligned}$$

从上面 Δv 和 Δx 的数值看, 在阴极射线管实验的精度要求下, 可以忽略, 即: 可以近似地认为, 电子的坐标和动量同时有确定值。尽管电子是微观粒子, 但仍可近似地把它当作经典粒子来处理。

又如, 氢原子中的电子, 其速度的数量级为 10^6 m/s, 坐标的不准确度是原子的线度, $\Delta x \approx 10^{-10}$ m。由不确定关系可算出电子速度的不确定度为

$$\Delta v_x = \frac{\Delta p_x}{m} = \frac{h}{2m\Delta x} \approx 6 \times 10^5 \text{ m/s}$$

这个数量级与电子本身的速度相比已经相差不多。所以, Δv 不能忽略, 不允许用经典力学的方法去描述氢原子中电子的运动。

仅从上例可以看到, 能否用经典方法描述某一个问题, 关键在于不确定关系所加的“限制”能不能忽略。简单的判断方法是: 如果在所研究的问题中经计算当 $\Delta x \rightarrow 0$ (或 $\Delta v \rightarrow 0$) 时, Δv (或 Δx) $\rightarrow \infty$, 这时, 必须用量子力学方法处理问题; 如果 Δx 和 Δv 的数值分别与 x 和 v 比较都非常小时, 则用经典方法处理电子的问题, 在这种条件下, 会得到近似正确的结论。

(8、9、10 均摘自《高中物理专题分析》下册, 杨兴国、叶禹卿主编, 高等教育出版社, 1993 年)

(二) 联系生活、科技和社会的资料

1. 荧光简介

荧光是一些特别的物质暴露在辐射下时发生的现象。作为受辐射激发的结果, 荧光物质重新发射辐射, 产生能在黑暗中看到的亮光, 这可在不同的夜光印画和标签上看到, T 恤、鞋等服装、夜光表盘、儿童读物、谜语、玩具等都可看到荧光物质的踪影。



除了上述例子外, 荧光物质还有许多实际的应用。例如, 在医疗上, 水母中的荧光蛋白被用于标记随之改变或突变组成蛋白质的氨基酸; 将荧光物质用于染色体, 使生理学家能确认产生的疾病, 如 DNA 反常的唐氏综合征和白血病等。荧光物质的另一个在医学上的应用包括使用发光物去计算蛋白质等其他化学物质, 以提供一些类型癌症的早期预警信号。

在艺术界, 荧光物质也是很重要的。珠宝商和宝石学家利用荧光技术来研究已知最大钻石之一的重达 45.5 克拉 (9.1 g) 的霍普钻石, 确定这种钻石形成的条件可能导致其他这类钻石的发现。钻石是自然界中已知最坚硬的物质, 被广泛用于牙科研磨机、珠宝业和工业上的机器钻头和磨料中。

荧光物质有时能侦查和防止犯罪。例如, 法学实验室利用荧光粉来提取指纹。在黑暗中发光的印画可用于吓阻盗车贼, 他们通常在半夜和早晨六点之间作案。车主用这种物质写上他通常不在这段时间内开车, 故若贴有这种画的汽车出现在路上, 就会引起警察的警觉, 意识到这可能是一宗窃车案。

(摘自《物理: 原理与问题》第三册, [美] 保罗·齐策维茨著, 上海科学技术出版社, 2005 年)

2. 光谱

光谱是复色光分解后按照波长顺序排列成的光带。广义的光谱, 不限于可见光, 包括一切波长的电磁辐射。

光谱可分为发射光谱、吸收光谱和散射光谱三类。

发射光谱是光源发出的光直接经分光仪器分解后形成的, 按光谱特征可分为线状谱、带状谱和连续谱三种。线状谱是游离的原子发光产生的, 也叫原子光谱, 其中只有一些分立的亮线, 亮线之间是黑暗的区域。每种原子都有自己的独特的线状谱, 根据光谱线的位置可以测出光谱线的波长。氢原子光谱是最简单的原子光谱。氢原子光谱中最强的一条谱线是 1853 年由瑞典物理学家埃斯特朗 (Anders Jonas Ångström, 1814—1874) 探测出来的。由于他在光谱研究方面的贡献, 后来曾以他的姓氏命名光波波长的单位, 1 埃 (Å) 等于 10^{-10} m。采用国际单位制后, 才不使用埃这个长度单位了。带状谱主要是由分子发光产生的, 也叫分子光谱, 其中有一些亮带。实际上, 每一个亮带都不是连续的, 而是由许多相隔很近的亮线组成的。连续谱是由炽热的固体、液体或高压气体发光产生的, 其中包括一切波长的光, 各种色光的分布是连续的, 中间没有暗线或暗区。

吸收光谱是一束具有连续波长的光通过物质时, 某些波长的光被吸收后产生的光谱。这种光谱是以连续光谱为背景, 其中有暗线、暗带或暗区。不同物质产生的吸收光谱不同。

散射光谱是由散射光产生的光谱。在散射光中, 除了与入射光频率相同的部分, 还有一些新频率的光, 这种散射叫做喇曼散射, 这种散射光的光谱叫做喇曼光谱。

人类研究光谱已有一百多年的历史了。1666 年牛顿用棱镜得到太阳光谱, 是对光谱最早的研究。太阳光谱是吸收光谱, 但牛顿没有发现其中的暗线, 因为他是使太阳光通过圆孔而不是通过狭缝产生的光谱。1802 年英国科学家沃拉斯顿 (W. H. Wollaston, 1766—1828) 和 1814 年夫琅和费分别独立地观察到了太阳光谱中的暗线, 夫琅和费并认识到这些暗线有固定的位置, 以不同的字母命名了一些主要的暗线。后来就把这些暗线叫做夫琅和费线。1859~1861 年, 基尔霍夫和本生解释了这些暗线, 认为这些暗线是太阳光球发出的连续波长的光被太阳大气 (主要是色球层) 中的原子吸收产生的, 并创立了光谱分析方法, 即根据蒸气混合物所辐射的光谱来判断它的化学成分。1860 年本生用这种方法从含有锂、钠、钾的天然矿物中



发现了两种新元素——铷和铯，后来又用光谱分析方法发现了铯（1862年）、铷（1863年）、镓（1875年）和氦（1895年）。氦是先从太阳大气的光谱中发现的，氦（helium）的命名就来源于希腊语的太阳（helios）。

光谱在科学研究中有重要作用。由于原子发光的频率与原子的结构和能级有关，因此研究发射光谱可以得到原子与分子的结构和能级的知识。吸收光谱主要用于研究分子的性质，特别是在有机化学分析中有重要应用，因为一定的原子团吸收一定频率的光。喇曼光谱与分子的振动和转动能级有关，因此研究喇曼光谱可以得到分子结构及其振动能级和转动能级的知识。喇曼光谱本来是很微弱的，有了激光器以后，很容易得到比较明显的喇曼光谱，使它的应用范围有了很大的扩展，并可用来分析空气质量、探测环境污染等。

3. 原子光谱在天文物理中的应用

在物质密度非常低的星际空间，存在着自由原子，在地球上可以接收到它们产生的辐射。根据这种辐射源的强度，建立了我们现有的关于空间元素丰度的资料。对元素丰度的百分数作定量的估计，提供了检验宇宙学理论的数据。例如，如果接受了“大爆炸”（big-bang）理论，氢和氦的比例就是确定宇宙年代的一个关键因子。虽然氢在一些原子过程中可以形成，氦却只能在初始爆炸后的短时间内形成。

在星球（例如我们的太阳）的大气中发现的元素，也是由原子光谱的研究得知的。太阳发射白光，亦即发射连续光谱的光，这些光的一部分被太阳外围大气原子吸收。在太阳光谱中，众所周知的夫琅和费吸收线就是由这类过程引起的。把星球光谱的谱线频率与那些在实验室中得到的谱线频率相比较，并假设物理学定律在地球上和远处星球上完全相同，则可以确定元素的性质；而且由谱线强度的测定，也能作出对元素相对丰度的估计。

在观测远离地球的星球的发射光谱和吸收光谱时，发现原子光谱的谱线略微地向光谱的红端移位。这可以解释为是由于光学多普勒效应引起的。多普勒效应是由于光源的相对运动，使静止观察者观察到的信号频率发生了改变。根据有关天体物理的谱线移位，我们能确定星球相对地球的速度。宇宙膨胀理论即以这个证据为基础。

我们研究天体物理问题的大部分实验数据，是从研究原子光谱得来的。随着人造卫星的发明，这类研究得到了新的促进。现在人造卫星已经能用于观察那些至今还被地球大气层的吸收和散射所掩盖的频率现象。因此，原子光谱的研究仍然是基础研究的一个重要领域，其重要性毫不亚于星际空间化学及行星、分子乃至生命本身起源的研究。

（摘自《原子结构和原子光谱》，〔英〕W.G. 理查兹、P.R. 斯科特著，薛洪福译，人民教育出版社，1981年）

4. 时间标准的发展历史及原子钟

很难想象，如果没有统一而精确的时间标准，建立在现代文明基础上的世界会是什么样子。时间、长度和质量都是最基本的物理量。在现行的国际单位制中，时间的单位是秒（s），而秒的长短则是在科学技术发展的基础上，由国际协议来共同制定的。

人们最早选定的时间标准是以地球对太阳的公转与自转为基础的，称为世界时。它规定一个平均太阳日的 $\frac{86\,400}{1000\,000}$ 为 1 s，即天文秒。后来发现，地球自转速率并不很均匀，例如受潮汐或其他力学因素的影响，因此它的精确程度约 3 年差 1 s（秒）。经过长期观测修改后产生了运行更均匀的历书时，其精确度是 30 年差 1 s。然而这种依赖天文观察的时标对日常使用是不方便的，因此人们便发明了二级时标如古代的日晷和刻漏及近代的机械钟表和石英钟表，用来体现世界时。

任何计时的仪器都是由能够产生稳定的周期运动的系统加上维持这一运动的能源以及记录运动周期的机构组成。频率是周期的倒数,因此一个稳定的时钟也就是一个稳定的频率计,时间的精确度同时也表示它的频率的精确度。通常用三个不同的但彼此有关的指标来表示时钟的性能,即精确度、稳定度和复现度。精确度是指实际测定的时间或频率值与它们的定义值的偏离程度,常用 $\frac{\Delta\nu}{\nu_0}$ 表示,这里 ν_0 是频率的定义值,而 $\Delta\nu$ 是频率的不确定范围。稳定度是时间装置在相继时间间隔内产生同一结果的程度。由于周期运动系统本身频率有不确定性加上外部系统各种噪声的影响,使频率输出有随机涨落的特征,稳定度使用这一随机过程的标准偏差 $\sigma_y(\tau)$ 来表示,这里 τ 表示对相继时间 τ 取平均。由于短时间及长时间内影响频率稳定的因素不同,所以 τ 的长短也表示短期或长期稳定度。复现度指一定形式的装置在不同运行期间或多次断续开机下能产生相同频率的程度。

17世纪西方产业革命及航海业的发展推动了钟表的改革,从机械钟表的先驱惠更斯、胡克及18世纪的皮埃尔·勒·鲁瓦(Pierre Le Roy)到20世纪20年代的肖特(W. H. Shortt),对机械钟表都作出了巨大的贡献。直至20世纪40年代,优良的重力摆钟的稳定度已接近 2×10^{-8} ,即一年差不到1 s。20世纪20年代诞生的石英钟表则更是钟表史上一次重大的改进。

石英是各向异性晶体,按切割方式及晶体形状尺寸的不同,它具有不同的但是很稳定的振动频率。把它两面镀金属膜并放在电磁振荡回路中,则由于石英的压电效应而受到强迫的机械振动,然而只有电磁振荡频率等于石英片的固有频率时,电磁振荡才有大的信号输出。因此可以用石英片的固有频率控制电路的振荡频率,固有频率很稳定,使输出的频率也很稳定。输出信号经过分频器(即每通过确定数量的脉冲后产生一个输出脉冲的数字电子器件)产生所需的低频信号,并驱动机械的或数字的显示装置,这就形成以石英振荡器为核心的频率计或石英钟。第一台这样的频率计是1928年由美国贝尔实验室的霍尔顿(J. W. Horton)和麦里逊(W. A. Marrison)实现的。目前最好的石英钟有很高的稳定度, $\sigma_y(\tau)$ 值约为 2×10^{-13} (这里 τ 取1~10 s),正是利用它才发现了地球自转速率不够均匀。但石英片毕竟要人工加工,而且易受环境的影响,晶体要老化等,因此它与机械钟一样,不能代替以地球自转为基础的时间标准,即不能作一级时标用。

20世纪50年代诞生的原子钟是时间标准发展史上一次巨大的飞跃。量子力学揭示了原子、分子这类微观粒子的量子效应。束缚态原子的能量是量子化的,电磁波可使原子从一低能态跃迁到高能态并吸收一个电磁量子或者使原子从高能态跃迁到低能态,同时放出一个电磁量子。这电磁量子的频率 ν 由玻尔频率条件决定,即有

$$h\nu = |E_2 - E_1|$$

这里 h 是普朗克常数, E_1 , E_2 是原子两个能级的能量。 $\frac{|E_2 - E_1|}{h}$ 称为原子相关能级之间的跃迁频率,它是原子的固有频率。原子存在的普遍性和长久性,以及其能级的确定性使原子跃迁频率高度稳定和高度精确,促使人们想到用原子作为时间标准的基础。另一方面,激发原子谐振需要用频率接近于原子固有频率的电磁波发生源以及有同样灵敏响应域的接收器件。二次世界大战期间发展成熟的微波技术首先满足了这一需要。人们发现,许多原子的基态不是单一能级而是由几条相距很近的子能级组成,称为能级的超精细结构,而超精细能级之间的跃迁频率正好处在微波区(特别是厘米波段)。因此从20世纪50年代初起,先后产生了氨分子钟、铯

原子钟、铷原子钟、氢原子钟等，而且经过逐年改进，铯原子钟的精度由 1955 年的 10^{-9} 达到 1975 年的 10^{-13} ，几乎每隔五年提高一个量级，这个精度比前述天文时标高 5 个量级。在这一成就的基础上，1967 年第 13 届国际计量大会决定，以零磁场下铯¹³³Cs 原子基态两个超精细结构能级之间的跃迁频率作为国际通用的频率标准，定义与它相应的电磁波持续 9 192 631 770 个周期的时间为 1 s，即原子秒。这次大会是时间标准从天文时向原子时转变的标志，此后，时间标准便在更高性能指标的水准上开始了自己的发展历程。

凡能最准确地实现定义单位的装置就叫一次标准。据原子秒的定义，显然只有建造得最好的铯原子钟才可作为时间的一次标准。这样的原子钟在世界上仅存于少数的实验室中。为了全球统一使用原子时标，现今世界各地共有 200 台高水平的铯钟定时协调和比对，由它们共同维持原子时。我国计量科学院所建的两台铯原子钟在 1981 年通过鉴定，并参与了世界原子时的协调，此外我国国内也建立了以陕西天文台为中心的全国统一的原子时系统。

原子钟的产生以及精度不断提高是人们对物质运动层次的认识不断深化的需要，是人们的活动向全球以及外层空间扩展的需要，也是未来社会高速率大容量交换信息的需要。

现今世界采用原子时作时间标准，各种实用原子钟就成了提供、记录标准时间的必不可少的设备。20 世纪 80 年代以来我国已成为世界八大先进的授时国之一，我国采用的原子钟精度为 3×10^{-13} ，属于国际先进行列。以陕西天文台为国内标准的授时中心，由它发出的长波及短波标准电磁波，不仅为电台、电视台提供标准时间及频率，而且也为我国运载火箭、核潜艇、远程战略武器发射、入轨、落区测控等提供高精度的时间频率信号，为侦察卫星、通信卫星等发射的姿态控制、星载仪器的开关，动力装置的点火和关闭等提供准确的标准时刻。

（摘自《近代物理学进展》，张礼主编，清华大学出版社，1997 年）

（三）实验参考资料

1. 用分光镜观察氢光谱

【目的和要求】

通过实验初步了解分光镜的构造和它的调节方法，定性观察氢的明线光谱。

【仪器和器材】

分光镜（J2551-1 型），光谱管组（J2552 型），感应圈（J1206 型），低压电源（J1201 型或 J1201-1 型，J1201-2 型），学生电源（J1202 型或 J1202-1 型），照明灯（6 V）。

J2551-1 型分光镜的光路如图 18-8 所示。光源发出的光经平行光管成为平行光，投射到三棱镜上。通过三棱镜的折射进入望远镜中，在望远镜的焦平面上聚焦成狭缝的像，通过目镜可观察到此像。如果光源是单色光，只有一个狭缝像。如果光源由几种波长组成，因三棱镜对不同波长的光的折射率不同，从三棱镜出

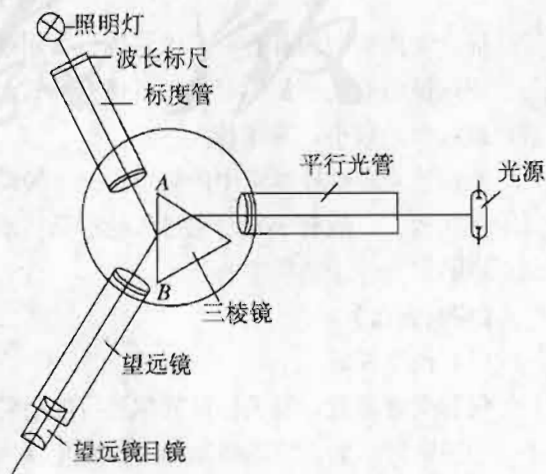


图 18-8 J2551-1 型分光镜光路图

射时,不同波长的光偏折的角度不一样,通过目镜可看到几个按一定规律排列的不同颜色的狭缝像。通常把狭缝像称为光谱线。

标度管中的波长标尺被照亮后,光线通过标度管物镜成平行光出射,经三棱镜 AB 面的反射也进入望远镜中,并在望远镜物镜焦平面上聚焦成像。这样,在望远镜中能同时看到光谱线(狭缝像)及波长标尺,谱线的波长可根据波长标尺刻度直接读出。

分光镜的外形如图 18-9 所示,它由平行光管、望远镜、标度管、三棱镜、托盘、支架等主要部件组成。

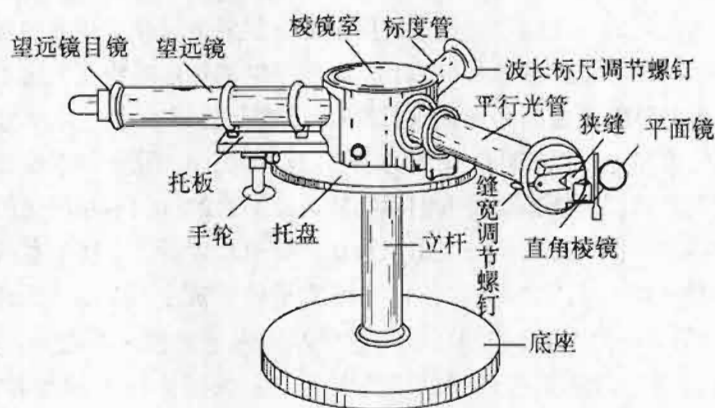


图 18-9 J2551-1 型分光镜外形图

平行光管由物镜及狭缝组成。狭缝的缝长用燕尾形光栏调节,缝宽用微调螺钉调节。狭缝前有一块活动的平面反射镜及直角棱镜,用来采集比较光束,照明狭缝的下半部。

标度管由物镜及波长标尺组成。波长标尺是非等分刻度尺,在波长为 589.3 nm 的位置上标出 D 线(若使用精密的分光仪,可观察到钠双线,波长分别为 589.0 nm 和 589.6 nm),在波长为 546.1 nm 的位置上标出 E 线,如图 18-10 所示。

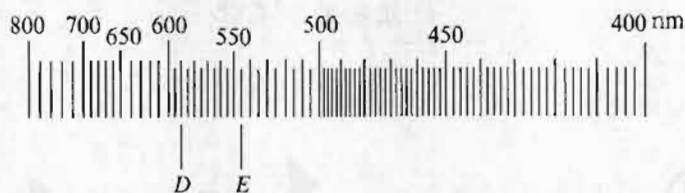


图 18-10 波长标尺

标度管前端两侧各有一只微调螺钉,用来调整波长标尺的位置。

望远镜由物镜和目镜组成,目镜有两只,可互换使用。高倍目镜放大倍数大,视场小,低倍目镜放大倍数小,视场较大。

三棱镜安装在棱镜室中的棱镜台上。棱镜台、平行光管、标度管都固定在托盘上。望远镜固定在托板上,旋转手轮时通过齿轮齿条传动装置,带动望远镜筒绕固定轴转动,使所需观察或测量的谱线位于视场中心。

【实验方法】

(1) 调节仪器

仪器受震动后,波长标尺的位置可能会移动,使用前需调整,方法如下:

用照明灯(如 J2507 型光具座中的光源)照明波长标尺,前后调节望远镜目镜,见到清晰的标尺刻线。在平行光管的狭缝前置钠光灯或汞灯。调节狭缝宽度,在望远镜中观察钠的

589.3 nm 谱线（新的直读式分光镜可以看到钠的谱线有两条：589.0 nm、589.6 nm。当它们分不开时成为 1 条波长为 589.3 nm 的谱线）或汞的 546.1 nm 谱线，是否与波长标尺上的 D 刻线或 E 刻线重合。若不重合，调节标度管上的两只波长标尺微调螺钉。

进行上述调整时，钠、汞光源任选一种即可。如无钠光灯或汞灯、汞光谱管，可在酒精灯灯芯上加氯化钠（食盐），用酒精灯火焰代替钠光灯，或用日光灯代替汞灯。酒精灯火焰应距狭缝 100 mm 以上，以防食盐蒸气溅射到狭缝上。

（2）观察氢光谱

用感应圈激发氢光谱管，用它来照明狭缝，在望远镜中可观察到三条或四条明线光谱，如图 18-11 所示（一般情况下， H_δ 谱线观察不到）。

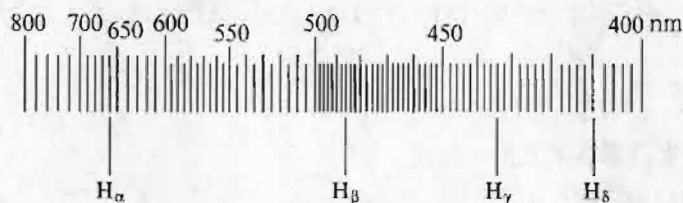


图 18-11 氢光谱图

下表列出了氢光谱线的名称、对应量子数、谱线颜色。

谱线名称	H_α	H_β	H_γ	H_δ
量子数 n	3	4	5	6
谱线颜色	红	蓝	紫	紫

【参考资料】

汞、钠的明线光谱如图 18-12、18-13 所示，J2552 型光谱管组中有汞及氢光谱管，观察钠的明线光谱时可用钠光灯作光源。

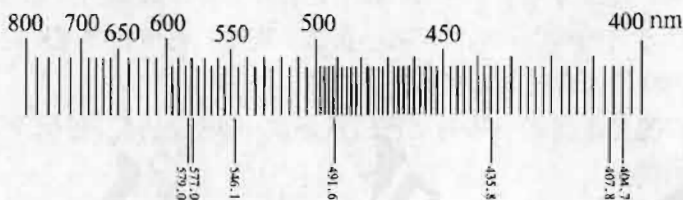


图 18-12 汞光谱图



图 18-13 钠光谱图

【注意事项】

（1）J2551-1 型分光镜是比较精密的光学仪器，应避免震动。平行光管、标度管及棱镜在出厂时均已调整好并固定，不要随便拆卸。

（2）调节狭缝宽度时，需边观察望远镜中的谱线边调节，避免狭缝闭合过紧挤伤刀口。



(3) 如谱带上出现横向暗条纹,表明刀口上有灰尘,需要清洗。清洗时先把狭缝调宽,滴几滴无水酒精冲洗;或者用6~8 mm宽的纸片,对折后塞在狭缝里上下轻轻拉动,靠纸片的弹性把刀口上灰尘抹掉。

(4) 感应圈的输出端电压很高,实验时应注意。

2. 测定氢光谱波长

【目的和要求】

测定氢光谱的波长,验证巴耳末公式;根据氢光谱的波长计算里德伯常量及普朗克常量。

【仪器和器材】

分光镜(J2551-1型),光谱管组(J2552型),感应圈(J1206型),低压电源(J1201型或J1201-1型,J1201-2型),学生电源(J1202型或J1202-1型),照明灯(6 V)。

【实验方法】

(1) 调节仪器

参阅《1. 用分光镜观察氢光谱》实验。

(2) 熟悉波长标尺的刻度

用照明灯(如J2507型光具座的光源)照明分光镜的标尺。望远镜装上低倍目镜,前后调节目镜,在望远镜中观察到清晰的波长标尺像。旋转手轮,移动望远镜,使整个标尺都在望远镜的视场中。

波长标尺是非等分刻度尺,标度范围是400~800 nm,在不同的波长区域,标尺的最小分度值是不同的。400~500 nm为2 nm/格;500~600 nm为5 nm/格;600~700 nm为10 nm/格;700~800 nm为20 nm/格。

(3) 测定氢光谱波长

旋转手轮,使波长标尺的500 nm刻线位于望远镜视场中央。移动狭缝前面的燕尾形光栏,使狭缝的长度为最大值。慢慢地按逆时针方向转动狭缝宽度的微调螺钉,把狭缝打开。用感应圈激发氢光谱管,并置分光镜狭缝前,在望远镜中就可以观察到氢光谱。如果光谱线比较宽,慢慢地按顺时针方向转动微调螺钉,减小狭缝的宽度。调节狭缝宽度时,边观察望远镜中的谱线边调节,避免狭缝闭合过紧,挤伤狭缝刀口。

转动手轮,把待测光谱线逐一移到望远镜视场的中央。根据波长标尺逐一读出氢光谱的红、蓝、紫色谱线的波长。

(4) 根据氢光谱的波长,计算里德伯常量及普朗克常量。

根据巴耳末公式,氢光谱巴耳末线系各谱线的波长为

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1)$$

R 为里德伯常量, $n=3, 4, 5, \dots$ 称量子数。测出对应于某一量子数 n 的谱线波长 λ ,即可计算出里德伯常量 R ,即

$$R = \frac{\frac{1}{\lambda}}{\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)} \quad (2)$$

附表列出了四条明线光谱的名称、对应的量子数、谱线颜色、波长理论值和测量值以及根据②式计算得到的里德伯常量 R 。计算时,波长以米为单位,1 nm=10⁻⁹ m。计算结果,与公认值1.097×10⁷ m⁻¹是一致的。

根据玻尔理论, 氢原子从较高的能级 (量子数 $n=3, 4, 5, \dots$) 跃迁到量子数 $n=2$ 的能级时, 辐射出的光子属巴耳末线系, 其能量差

$$h\nu = 13.6 \times \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

或

$$h \frac{c}{\lambda} = 13.6 \times \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (3)$$

式中 h 为普朗克常量, ν 为辐射出的光子频率, $\nu = \frac{c}{\lambda}$, c 为光速。13.6 是处于基态上的氢原子的电离能量, 单位是电子伏特。测出巴耳末线系的谱线波长 λ , 代入③式, 即可计算出普朗克常量。计算时, 波长以米为单位, 电子伏特转化为焦耳 (J), $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。把测量数据和计算结果列在下表中。普朗克常量的公认值为 $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

谱线名称		H_α	H_β	H_γ	H_δ
量子数 n		3	4	5	6
谱线颜色		红	蓝	紫	紫
谱线波长/nm	理论值	656.2	486.1	434.0	410.1
	测量值	658.0	487.5	433.5	411.0
里德伯常量 $R/(10^7 \text{ m}^{-1})$		1.09	1.09	1.10	1.09
普朗克常量 $h/(10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})$		6.64	6.64	6.61	6.63

【注意事项】

与《1. 用分光镜观察氢光谱》实验相同。

(1、2 均摘自《高中物理学生实验》, 教育部教学仪器研究所主编, 人民教育出版社, 2003 年)

五、补充习题

A 组

- 下列实验现象中, 支持阴极射线是带电微粒观点的是 ()
 - 阴极射线可以透过薄铝片
 - 阴极射线通过电场或磁场时, 要产生相应偏转
 - 阴极射线透过镍单晶时, 产生衍射现象
 - 阴极射线轰击荧光物质, 发出荧光
- 若在如图 18-14 所示的阴极射线管中部加竖直向上的电场, 则应加什么方向的大小合适的磁场才能让阴极射线不偏转 ()
 - 竖直向上
 - 竖直向下
 - 垂直纸面向里
 - 垂直纸面向外
- 否定汤姆孙原子模型的实验及其现象是 ()
 - 在 α 粒子散射实验中, 绝大多数 α 粒子穿过金箔后, 基本上仍沿原来的方向前进
 - 在 α 粒子散射实验中, 有少数 α 粒子发生了大角度偏转, 有的偏转角度甚至大于 90°
 - 阴极射线可在磁场或电场中偏转



图 18-14

D. 荧光物质在阴极射线或某些电磁波的照射下可以发出可见光

4. 图 18-15 所示为卢瑟福 α 粒子散射实验的原子核和两个 α 粒子的径迹, 其中可能正确的是 ()

5. 在 α 粒子散射实验中, 没有考虑 α 粒子跟电子碰撞所产生的效果, 这是由于 ()

- A. 电子体积实在太小, α 粒子完全碰不到它
- B. α 粒子跟电子相碰时, 损失的动量很小, 可忽略
- C. α 粒子跟各电子碰撞的效果互相抵消
- D. 由于电子是均匀分布的, α 粒子受电子作用力的合力为 0

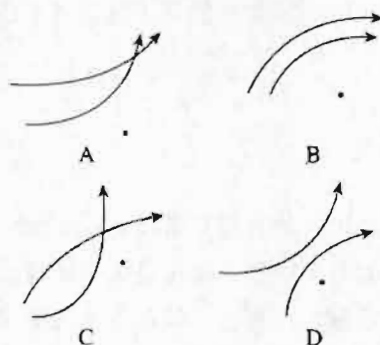


图 18-15

6. 下列说法中正确的是 ()

- A. 阴极射线的实质是电子流
- B. α 粒子散射实验揭示了原子不是组成物质的最小微粒
- C. 玻尔的原子结构理论成功地解释了氢原子的分立光谱, 因此玻尔的原子结构理论已完全揭示了微观粒子运动的规律
- D. 玻尔原子结构理论中的轨道量子化和能量量子化的假说, 启发了普朗克将量子化的概念用于黑体辐射的研究

7. 关于原子的特征谱线, 下列说法中正确的是 ()

- A. 不同原子的发光频率是不一样的, 每种原子都有自己的特征谱线
- B. 原子的特征谱线可能是由于原子从高能态向低能态跃迁时放出光子而形成的
- C. 可以用特征谱线进行光谱分析来鉴别物质和确定物质的组成成分
- D. 原子的特征谱线是原子具有核式结构的有力证据

8. 下列有关氢原子光谱的说法中, 正确的是 ()

- A. 氢原子的发射光谱是连续谱
- B. 氢原子光谱说明氢原子只发出特定频率的光
- C. 氢原子光谱说明氢原子能级是分立的
- D. 氢原子光谱线的频率与氢原子能级的能量差无关

9. 根据玻尔理论, 氢原子的电子由外层轨道跃迁到内层轨道时 ()

- A. 要放出光子, 氢原子的能量减小, 电子的动能增大
- B. 要吸收光子, 氢原子的能量增加, 电子的动能增大
- C. 要放出光子, 氢原子的能量减小, 电子的动能减小
- D. 要吸收光子, 氢原子的能量增加, 电子的动能减小

10. 根据玻尔理论, 在氢原子中, 量子数越大, 说明 ()

- A. 核外电子轨道半径越小
- B. 核外电子的速率越小
- C. 原子能级的能量越小
- D. 原子的电势能越大

11. 可见光光子的能量在 $1.61 \sim 3.10$ eV 范围内. 若氢原子从高能级跃迁到量子数为 n 的低能级的谱线中有可见光, 根据氢原子能级图 18-16 可判断 n 为 ()

- A. 1
- B. 2
- C. 3
- D. 4

12. 一群处于 $n=3$ 能级上的氢原子向低能级跃迁, 最多能够产生

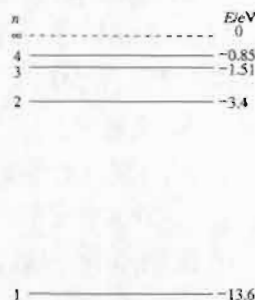


图 18-16

谱线的条数是 ()

- A. 1 B. 2 C. 3 D. 4

B 组

1. 图 18-17 所示是阴极射线显像管及其偏转线圈的示意图。显像管中有一个阴极，工作时它能发射阴极射线，荧光屏被阴极射线轰击就能发光。安装在管颈的偏转线圈产生偏转磁场，可以使阴极射线发生偏转。下列说法中正确的是 ()

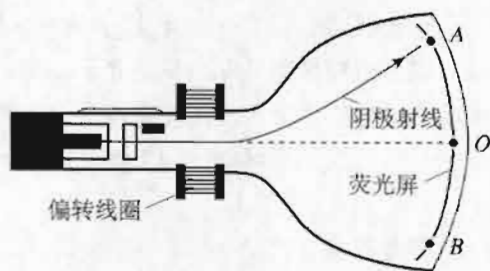


图 18-17

- A. 如果偏转线圈中没有电流，则阴极射线应该打在荧光屏正中的 O 点
 B. 如果要使阴极射线在竖直方向偏离中心，打在荧光屏上 A 点，则偏转磁场的方向应该垂直纸面向里
 C. 如果要使阴极射线在竖直方向偏离中心，打在荧光屏上 B 点，则偏转磁场的方向应该垂直纸面向里
 D. 如果要使阴极射线在荧光屏上的位置由 B 向 A 点移动，则偏转磁场强度应该先由小到大，再由大到小

2. 汤姆孙对阴极射线本质的研究，采用的主要方法有 ()

- A. 用阴极射线轰击金箔，观察其散射情况
 B. 用“油滴实验”精确测定电子电荷的带电量
 C. 让阴极射线通过电场和磁场，通过阴极射线的偏转情况判断其电性和计算其比荷
 D. 用阴极射线轰击荧光物质，对荧光物质发出的光进行光谱分析

3. 处于基态的一群氢原子受某种单色光的照射时，只发射波长为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的单色光，且 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ ，则照射光的波长为 ()

- A. λ_1 B. $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$ C. $\frac{\lambda_2 \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3}$ D. $\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$

4. 在氢原子光谱中，电子从较高能级跃迁到 $n=2$ 能级发出的谱线属于巴耳末系。若一群氢原子自发跃迁时发出的谱线中只有两条属于巴耳末系，则这群氢原子自发跃迁时最多可发出多少条不同频率的谱线 ()

- A. 3 B. 4 C. 5 D. 6

5. 某原子从 a 能级跃迁到 b 能级时发射波长为 λ_1 的光子，该原子从 b 能级跃迁到 c 能级时吸收波长为 λ_2 的光子。已知 $\lambda_1 > \lambda_2$ ，那么该原子从 a 能级跃迁到 c 能级时将要 ()

- A. 发射波长为 $\lambda_1 - \lambda_2$ 的光子 B. 吸收波长为 $\lambda_1 - \lambda_2$ 的光子
 C. 发射波长为 $\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$ 的光子 D. 吸收波长为 $\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$ 的光子

6. 氦氖激光器能产生三种波长的激光，其中两种波长分别为 $\lambda_1 = 0.6328 \mu\text{m}$ ， $\lambda_2 = 3.39 \mu\text{m}$ ，已知波长为 λ_1 的激光是氦原子在能级间隔为 $\Delta E_1 = 1.96 \text{ eV}$ 的两个能级之间跃迁产生的。用 ΔE_2 表示产生波长为 λ_2 的激光所对应的跃迁的能级间隔，则 ΔE_2 的近似值为 ()

- A. 10.50 eV B. 0.98 eV C. 0.53 eV D. 0.36 eV



7. 氢原子第 n 能级的能量为 $E_n = \frac{E_1}{n^2}$, 其中 E_1 是基态能量, 而 $n=1, 2, \dots$ 。若一氢原子发射能量为 $-\frac{3}{16}E_1$ 的光子后处于比基态能量高出 $-\frac{3}{4}E_1$ 的激发态, 则氢原子发射光子前后分别处于第几能级? (解该题时请注意正负问题)

8. 如图 18-18 所示, 氢原子从 $n>2$ 的某一能级跃迁到 $n=2$ 的能级, 辐射出能量为 2.55 eV 的光子。问: 最少要给基态的氢原子提供多少电子伏特的能量, 才能使它辐射上述能量的光子? 请在图中画出获得该能量后的氢原子可能的辐射跃迁图。

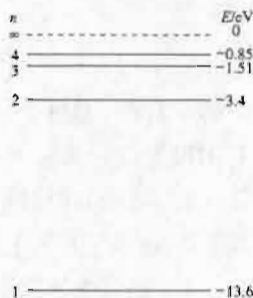


图 18-18

参考答案

A 组

1. B 2. D 3. B 4. A 5. B 6. A 7. A、B、C 8. B、C 9. A 10. B、D 11. B 12. C

B 组

1. A、C 2. C 3. D 4. D 5. D 6. D

7. 设氢原子发射光子前后分别位于第 l 与第 m 能级, 依题意有

$$\frac{E_1}{l^2} - \frac{E_1}{m^2} = -\frac{3}{16}E_1$$

$$\frac{E_1}{m^2} - E_1 = -\frac{3}{4}E_1$$

解得 $m=2, l=4$ 。

8. (1) 氢原子从 $n>2$ 的某一能级跃迁到 $n=2$ 的能级, 满足 $h\nu = E_n - E_2 = 2.55 \text{ eV}$, 即 $E_n = h\nu + E_2 = -0.85 \text{ eV}$, 所以 $n=4$ 。基态氢原子要跃迁到 $n=4$ 的能级, 应提供的能量为 $\Delta E = E_4 - E_1 = 12.75 \text{ eV}$ 。

(2) 跃迁图见图 18-19。

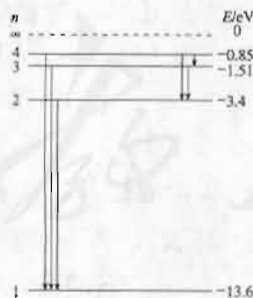


图 18-19

第十九章 原子核



课程标准要求

1. 知道原子核的组成。知道放射性和原子核的衰变。会用半衰期描述衰变的速度，知道半衰期的统计意义。
2. 了解放射性同位素的应用。知道射线的危害和防护。
3. 知道核力的性质。能简单解释轻核和重核内中子数、质子数具有不同比例的原因。会根据质量数守恒和电荷守恒写出核反应方程。
4. 认识原子核的结合能。知道裂变反应和聚变反应。关注受控聚变反应研究的进展。
5. 知道链式反应的发生条件。了解裂变反应堆的工作原理，了解常用裂变反应堆的类型。知道核电站的工作模式。
6. 通过核能的利用，思考科学技术与社会的关系。
7. 初步了解恒星的演化。初步了解粒子物理学的知识。

一、本章教材概述

本章的主要内容两个方面：有关原子核的知识，有关核能的开发与利用的知识。前者涉及原子核的组成、核力与结合能、核反应、衰变和半衰期、裂变和聚变、基本粒子和夸克模型；后者则包括放射性同位素和核能的开发与利用。本章的前七节主要介绍这两方面的内容，而本章的第8节则有一点为全书作总结的“大结局”意味。第8节通过对现代物理前沿两个最活跃而又紧密联系的领域——研究微观世界的粒子物理和研究宇宙的天体物理的统一介绍，为整个中学阶段的系统物理课程画上句号。

本章各节的编排顺序基本上是依循人类探索原子核内部奥秘的历程安排的。第1节“原子核的组成”就开宗明义地指出，关于原子核内部的信息，最早来自天然放射现象，因此，首先就介绍贝可勒尔和居里夫妇对天然放射现象的研究和“射线到底是什么”，然后介绍质子和中子的发现和原子核的组成。第2节紧接第1节的思路，指出天然放射现象产生的机制——原子核的衰变以及衰变遵从的特殊规律，即存在半衰期以及半衰期的统计意义。由于放射性同位素及其放射性的应用是人类应用核能的一个重要方面，所以教材的第3、4两节介绍“探测射线的方法”和“放射性的应用与防护”。到此，有关放射性及其应用、防护的内容基本结束。章末附有一个“课题研究：研究建筑石材的放射性”，是给学生开展研究性学习提供的一个好素材，有条件的地方可以让学生完成这项探究活动。本章接下来的三节关注的是释放核能的另一

条途径——通过裂变或聚变以增大比结合能的方式释放核能，即通过裂变或聚变让核发生更多的质量亏损，而这一亏损的质量将以能量方式释放出来，这是当前人类释放核能的主要方式。根据这个思路，第5节讲述核力与结合能，首先介绍核力与四种基本相互作用，指出在原子核内起支配作用的力是核力，核力是自然界四种基本相互作用中的一种，同时也指出在核内还存在另一种力——弱力（弱相互作用）。教材第5节也回应了《物理必修1》第三章第1节“思考与讨论”里所提出的问题。本节中“原子核中质子与中子的比例”是新增的内容，编写这部分内容的出发点有两个，一方面通过这个问题的讲解加深对核力特征特别是核力的短程性、饱和性的认识；另一方面也是引导学生通过观察和分析已知的信息，发现和提出新的问题。在第5节有关结合能、比结合能和原子核比结合能曲线的基础上，第6、7两节分别从重核裂变和轻核聚变两个方面介绍当前释放核能的两条途径，这两节教材紧扣时代气息脉搏，除了传统的常规内容外，精选了不少反映最新科技发展的信息和丰富的STS素材，老师们要充分利用好这些教育资源。

除以上的编写的逻辑线索外，在编写本章时还有以下思考。

1. 强化基础

“强化基础”是指对本章涉及的一些重要的基础知识的阐述力求准确清楚、层次分明、严谨扎实，以充分体现高中物理课程的基础性。本章涉及的不仅是原子核、质子、中子以及那些并不基本的“基本粒子”所处的微观世界，也把眼光投向了广袤无边的宇宙，介绍宏观世界中恒星的演化和宇宙大爆炸理论，本章内容的视野是很广阔的。在内容的处理上，即使是属于科普层次的内容，也尽量注意和重要的基础知识相联系。例如，第7节“核聚变”在介绍“受控热核反应”的磁约束时，就回顾了有关磁场的基础知识；带电粒子运动时在均匀磁场中会由于洛伦兹力的作用而不飞散，因此有可能利用磁场来约束参加反应的物质，这就是磁约束。

对于本章中天然放射现象、半衰期、结合能、裂变与聚变反应、链式反应、原子核的组成、核力的性质、裂变反应堆的工作原理以及夸克模型等知识，在可接受的原则下尽量阐明它们的物理本质和建立这些概念、理论的思维过程。比如，对于“原子核的组成”，教材的阐述思路是：首先指出原子核内部的信息，最早来自天然放射现象。人们从破解天然放射现象入手，一步步揭开了原子核的秘密。然后介绍天然放射现象的发现和对射线性质的研究，在此基础上指出实验发现，如果一种元素具有放射性，那么，无论它是以单质存在，还是以化合物形式存在，都具有放射性。由于元素的化学性质决定于核外的电子，这就说明射线与核外电子无关，也就是说，射线来自原子核。既然 β 射线（电子）、 α 射线（氦核）都来自原子核，就得到结论：原子核内部是有结构的。这样不仅让学生认识了原子核的结构，而且让学生经历分析和解决问题的过程，感悟和探索微观世界的方法：事实加思维，即在观察、实验得到的确切的物理事实（信息）和已有知识基础上进行科学思维（猜想和推理）以得出科学结论。当然这个结论还将经受更多的实验和观察得到的新的事实的检验。再比如第5节“核力与结合能”，也是本章的重要的基础知识，教科书也进行了比较充分的阐述。首先从学生熟悉的宏观现象（两个物体为了结合而付出的代价——失去了一部分能量）类推核子结合成原子核也要失去一部分能量，引出结合能的概念，进而讲质量亏损，比结合能，并特地安排了一个例题，让学生从一个具体的事例中认识到什么是质量亏损。然后通过教科书图19.5-3让学生了解不同原子核的比结合能是不一样的，中等大小的核的结合能最大（平均每个核子的质量亏损最大），进而提出释放核能的途径的设想，为后续内容作好铺垫。



2. 渗透方法

“渗透方法”是教材在展现具体的物理知识的过程中、贯穿着物理研究方法、思维方法这条暗线，即不仅要让学生知道科学家做了什么实验，观察到什么现象，进行了什么样的推理，而且要让学生感悟到科学家为什么要这样做、为什么会这样做。在本章中，对于物理研究方法突出强调了三个方面：

(1) 突出了科学探究过程中“猜想”的要素。对于微观世界，人们看不见摸不着，如果缺乏丰富的想象力，不能从现有的经验、知识和观察到的实验现象进行大胆的、富于想象力的猜想，就不可能设计出新的有针对性的实验和创新理论构建，就没有今天物理学的辉煌成就。教科书先后三次直接提出科学家如何猜想：①在讲述原子核的组成时：“卢瑟福猜想，原子核内可能还存在着另一种粒子……”并在节后的“问题与练习”中配置了一个简答题（第4题），来强化理解这个猜想的依据。②在讲述“核力与四种基本相互作用”时：“核物理学家猜想，原子核里的核子间有第三种相互作用存在，……后来的实验证实了科学家的猜测”。③在讲述结合能时：“这个现象在20世纪20年代末曾经引起遐想：如果使……这些能量岂不是可以供人使用？”

(2) 强调统计概率思想在微观世界探索中的重要性。在讲到半衰期时，教科书着重指出：“衰变是微观世界里原子核的行为，而微观世界规律的特征之一在于‘单个的微观事件是不可预测的’……然而，量子理论可以对大量原子核的行为做出统计预测。……半衰期，描述的就是这样的统计规律。”

(3) 强调实验仍然是探索微观世界奥秘的基础，首先，猜想和假说本身就是在对大量实验数据分析的基础上提出的，而所提出的新的假说或根据假说提出的一些可检验的预见又必须经受实验的检验。比如质子、中子的发现，原子核结构模型的提出都是如此。又如教材在讲到射线检测时说，肉眼看不见射线，但是，射线中的粒子与其他物质作用时产生的现象，会显示射线的存在。同时教科书也直接介绍或提及了卢瑟福 α 粒子散射实验、查德威克发现中子的实验、天然放射现象发现历程中的一系列实验、哈恩的裂变实验、费米建立第一个核反应堆等大量探究微观世界的实验。

3. 拓宽视野

“拓宽视野”主要是拓宽知识面，力图多反映一些当代粒子理论的新成果、新思想，就像《课程标准》中所强调的关注物理学与其他学科之间的联系，知道一些与物理学相关的应用领域。在教材中，安排了“科学漫步 碳14测年技术”，介绍了我国科技界多学科共同攻关的夏商周断代工程和碳14测年技术在其中的重要作用。在第6节“重核的裂变”中，介绍了当前因朝鲜核谈判、伊朗谈判而在媒体上经常出现的“石墨堆、重水堆、轻水堆……”。全书最后，还特地安排了一个紧密联系实际的课题研究“研究建筑石材的放射性”。与传统教科书的同样章节相比较，教科书中安排了一些中学生能够接受又符合《课程标准》要求的新内容、新知识。如，四种基本相互作用、核力的饱和性、轻核与重核中质子与中子比例不同的解释、夸克模型、磁约束和惯性约束、发现新粒子、恒星和宇宙的演化以及微观世界规律的统计性等。这些安排，使教材视野较宽，体现了“从生活走向物理，从物理走向社会”的理念，增强了教材的时代性。

对本章的课时分配作如下建议，仅供参考。

第1节 原子核的组成	1课时
第2节 放射性元素的衰变	1课时

第3节 探测射线的方法及第4节 放射性的应用与防护 1课时

第3、4节完成可安排一个习题课,作一些核反应方程和半衰期的练习。

第5节 核力与结合能 1课时

第6节 重核的裂变 1课时

第7节 核聚变 1课时

第8节 粒子和宇宙 1课时

复习小结 1课时

全章共9课时。课后的课题研究可作为研究性学习内容布置学生课外进行。

二、教材分析与教学建议

第1节 原子核的组成

1. 教学目标

- (1) 知道什么是放射性及放射性元素。
- (2) 知道三种射线的特性,知道原子核的组成,会正确书写原子核符号。
- (3) 通过核结构模型的探究,经历分析和解决问题的过程,体会物理学的研究方法。

2. 教材分析与教学建议

本节教材从强磁场中放射性物质放出的射线分成三束的实验事实出发,介绍 α 射线、 β 射线和 γ 射线,并通过对这三种射线的研究,确认射线来自原子核,进而介绍原子核的组成。原子核的组成是比较抽象的,教材注意引导学生把微观机制和它的宏观现象紧密地联系在一起,通过一些宏观实验,去猜测、探究微观结构,建立微观模型。教材的重点是三种射线的性质和原子核的组成。

(1) 天然放射现象

在教学过程中,建议用下列方式引入新课。将教科书中“科学足迹 天然放射现象的发现”提到最前面,引导学生感悟探索微观世界的方法:观察宏观现象(贝可勒尔发现一种能够使照相底片感光的神秘射线)→猜想(这种射线不是X射线,它来自原子核内部)→反复实验,对猜想进行验证(居里夫妇用不同元素进行实验,发现钍、钋、镭等都具有放射性)→得出科学的结论(放射现象与元素种类有关,发生在原子核内部)。

在新课的教学过程中,注意强调说明:天然放射现象在自然界是大量存在的,具有天然放射性的元素种类很多;天然放射现象表明原子核内部是有结构的。教科书在“射线到底是什么”部分明确指出:“实验发现,如果一种元素具有放射性,那么,无论它是以单质存在,还是以化合物形式存在,都具有放射性。……由于元素的化学性质决定于原子核外的电子,这就说明射线与这些电子无关,也就是说,射线来自原子核。这说明原子核内部是有结构的。”这与节首“关于原子核内部的信息,最早来自天然放射现象”相呼应,同时,为“原子核的组成”教学埋下伏笔。



(2) 射线到底是什么

天然放射现象被发现后,关于“射线到底是什么”的疑问是自然而然的。教材在处理这部分内容时,很好地利用了之前学过的物理知识,充分体现了物理知识的系统性和完整性。同时启迪学生要善于利用已有的知识储备解决出现的新问题。由于实验有一定难度,可以利用多媒体展示,加深学生对于射线的认识。

①射线的电性

教科书图 19.1-2,是让射线进入磁场中,观察射线在磁场中的行为。看到的现象是,射线分裂成三束,其中两束在磁场中向不同的方向偏转,另一束在磁场中不偏转。教学中务必对射线在磁场中的不同行为的形成原因进行仔细的分析。运动电荷在磁场中受到洛伦兹力发生偏转,利用左手定则可以判定: α 射线带正电, β 射线带负电。不带电的粒子在磁场中运动不会受到洛伦兹力的作用,所以不偏转,可见, γ 射线不带电。

在处理“思考与讨论”时,要充分调动学生的积极性,可以让学生分组讨论。让射线进入电场中,同样通过观察偏转情况来判断其电性。只要将负极板放在教科书图 19.1-2 的左侧,正极板放在右侧,形成从右到左的电场,三种射线的偏转方向与放在磁场中相似。注意说明,射线在电场中是因为受到静电力作用而发生偏转的。

②列表对比三种射线的性质

射线种类	射线组成	符号	电荷量	质量	射出速度	电离本领	穿透本领
α 射线	氦核	${}^4_2\text{He}$	$+2e$	$4 \times 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$	$0.1c$	强	弱
β 射线	电子	${}^0_{-1}e$	$-e$	$0.91 \times 10^{-30} \text{ kg}$	接近光速	较弱	较强
γ 射线	γ 光子	$h\nu$	0	无静止质量	光速 c	弱	强

(3) 原子核的组成

①质子和中子的发现

认识原子核内部结构,经历了“实验事实→猜想(预言)→实验验证”的过程,这个过程充分表明了人类对微观世界的认识是不断扩大和加深的,人类认识原子核组成的历史过程和研究方法具有典型性。务必在教学中渗透这种探索微观世界的科学方法。



教学片段

中子的发现

科学背景:卢瑟福已经在 1919 年发现原子核内部存在质子,并测出了质子的电荷量和质量。

提出问题:原子核内部只有质子吗?

科学推理:如果原子核内部只有质子,那么,任何一种原子核的质量与电荷量之比都应该相同,且都等于一个质子的质量与电荷量之比。

实验事实:绝大多数原子核的质量与电荷量之比都大于一个质子的质量与电荷量之比。

小结:原子核内部除了质子之外,一定还存在另外一种未知的粒子,而且这种粒子的电荷量一定比质子小。

提出问题:未知粒子是什么?

猜想(预言):1920年卢瑟福根据上述质荷比测定的结论,大胆猜想并预言在原子核内部存在一种不带电的与质子等质量的粒子——中子。

实验验证:卢瑟福的学生查德威克在1932年发现了中子。

②原子核的组成

引导学生关注质子和中子的区别:它们的质量非常接近;质子带一个元电荷的正电,中子不带电,两者统称为核子。在原子核内质子和中子的总数就是质量数 A ,在这里要特别强调质量数仅仅是核子的个数,并不是原子核的质量!为今后处理核反应方程中存在质量亏损,同时质量数又守恒,作好铺垫。电荷数 Z 是指原子核内质子的个数,教科书上说它“表示原子核的电荷量”。但要注意,这个电荷量的单位不是库仑,而是“元电荷”,即表示原子核中有 Z 个“元电荷 e ”,原子核的电荷量等于 Ze 。

③原子核的符号表示

这是本节的重点、难点内容,教学中要注意突破难点。书写原子核的一般步骤可以总结为:确定元素符号 X →确定电荷数 Z →确定质量数 A 。对于教科书第68页的“思考与讨论”,可如下处理。先让学生分组练习,教师再点拨:铀——原子序数92→电荷数92→质子数92;质量数是235→质子和中子总数为235→核子数为235→中子数为 $235-92=143$,符号表示为 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 。为了加深印象,可以将“问题与练习”中的第5题、第6题作为课堂练习题。

④同位素

应注意引导学生从以下几个方面理解同位素的概念。质子数相同(原子序数相同)而中子数不同的原子核互称同位素。同一元素的不同种同位素在元素周期表上具有相同的位置(因为原子序数相同所以“同位”),它们的核电荷数相同,核外电子数也相同,所以具有相同的化学性质。同一种元素的多种同位素中,有稳定的,也有不稳定的。不稳定的同位素会自发地放出 α 粒子或正负电子,衰变为新的元素。在此,为下一节的教学作好铺垫。

3. 问题与练习

内容分析

第1题考查学生观察和思考的能力、科学推理的能力,培养学生实事求是的科学态度。

第2题意在加强基础练习(光子的能量公式 $\epsilon=h\nu=\frac{hc}{\lambda}$),强化物理学科内的综合意识。

第3题考查学生对于 α 射线电离作用的认知程度,明白电离要消耗能量的道理,同时消除人们对于 α 射线陌生感和恐惧感。

第4题考查学生科学推理的能力,加深对于原子核内部结构的认识。

第5题、第6题考查学生对于原子核符号中各部分所表示的物理意义的认知能力,能够区分质量数与质量。

解答与说明

1. 实验发现,如果一种元素具有放射性,那么无论它是以单质存在,还是以化合物形式存在,都具有放射性,而且放射性的强度也不受温度、外界压强的影响。由于元素的化学性质决定于原子核外的电子,这说明射线与核外电子无关。也就是说,射线来自原子核内部。

天然放射现象的发现,使人们认识到原子核内部有复杂的结构,而且原子核可以发生变化,成为另一种原子核。实际上,人们认清原子核的结构就是从天然放射现象开始的。



2. 根据光子的能量公式 $\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ 可知, 电磁波的光子能量越大, 频率越高, 波长越短。

3. 验电器金属箔的张角将变小。因为放射性元素放出的 α 射线具有一定的电离作用, 它能使所经过的路径上的空气分子电离, 使空气变成导体, 从而使带正电的验电器上的正电荷发生转移、中和, 所以验电器金属箔的张角将变小。

4. 如果原子核中只有质子, 那么任何一种原子核的质量与电荷量之比, 都应该等于质子的质量与电荷量之比。实际并不是这样。绝大多数原子核的质量与电荷量之比都大于质子的相应比值。所以卢瑟福猜想, 原子核内可能存在着另一种粒子。

5. (1) $^{238}_{92}\text{U}$ (2) $^{12}_6\text{C}$ (3) $^{14}_6\text{C}$ (4) $^{17}_8\text{O}$ (5) ^4_2He

6. (1) 钾 40 的质子数为 19, 中子数为 21。 (2) $^{66}_{29}\text{Cu}$ 的质子数为 29, 中子数为 37。 (3) $^{222}_{86}\text{Rn}$ 的质子数为 86, 中子数为 136。

第2节 放射性元素的衰变

1. 教学目标

- (1) 知道原子核的衰变。
- (2) 会用半衰期描述衰变的速度, 知道半衰期的统计意义。
- (3) 知道两种衰变的规律, 能够熟练写出衰变方程。

2. 教材分析与教学建议

本节知识从内容上来讲非常抽象, 从掌握知识的角度来讲理解、记忆的成分较多。因此本节课应该引导学生进行讨论, 加深对相关内容的理解。而对于衰变方程式、半衰期描述的对象、统计规律等知识的学习都应引导学生复习前面学过的相关知识, 并用类比的方法, 注重知识的迁移。最后布置学生课后阅读“科学漫步”栏目, 以留给学生课后思考和学习的空间。本节重点是 α 衰变、 β 衰变及其规律和半衰期的概念, 引导学生运用质量数守恒和电荷数守恒的规律正确书写衰变方程。正确理解半衰期的概念是本节的难点, 因此教学中应注意讲清半衰期的概念, 使学生学会计算较简单的有关半衰期的问题。

(1) 原子核的衰变

①核反应方程

衰变是一种基本的原子核反应, 天然放射性元素原子核和人工制造的放射性同位素都能发生衰变。由于衰变是原子核发生的变化, 学生往往容易简单地认为衰变中放射出来的电子或 α 粒子是原子核中本来就存在的。实际情况到底如何? 为此, 特设计一个教学片段。

教学片段

α 衰变、 β 衰变的实质和规律

结合以下问题学生自习原子核的衰变部分 (务必保证时间充分)。

- ① α 衰变、 β 衰变指的是原子核发生的什么样的变化?

②原子核内除了质子和中子还有没有其他粒子,比如电子?

③ α 衰变、 β 衰变的实质到底是什么?

师生共同探讨

前两个问题十分关键,为解决问题③这个难点提供了知识上的支撑和思维上的梯度。

问题①

α 衰变:原子核放出一个 α 粒子,新生成的核比原来的核质量数减少4,电荷数减少2,即新核在元素周期表中位置比原来核的位置向前移两位。

β 衰变:原子核放出一个电子(β 粒子),新生成的核与原来的核质量数相同,电荷数增加1,即新核在元素周期表中位置比原来核的位置向后移了一位。

大量观察表明:原子核衰变时电荷数和质量数都守恒。提醒学生注意:①“守恒”指衰变前的“质量数之和”与衰变后“质量数之和”相同,衰变前的“电荷数之和”与衰变后“电荷数之和”相等;②“之和”是指代数和。

注意,在这里要特别强调:质量数守恒仅仅指衰变前后核子的总数不变,并不是质量不变!

问题②

由第1节“原子核的组成”知:原子核内只有质子和中子两种组成成分,既没有电子,也没有 α 粒子。

这里很自然就会演绎出一个本质性的问题:既然衰变发生在原子核部分,那么只能是原子核内部的组成成分发生了变化;既然原子核内部没有电子和 α 粒子,那么衰变放出的电子和 α 粒子又是从哪里来的?

问题③

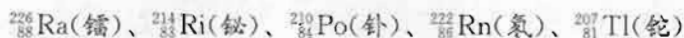
引导学生自学教材中关于两种衰变的实质的内容。然后两人一组分组讨论,教师注意巡视,收集讨论的结果,最后教师进行以下点拨。

事实上,原子核内并不存在电子,也没有 α 粒子,衰变放射出的电子是在衰变过程中原子核内部一个中子转变为质子时产生的,核反应方程式: ${}_0^1\text{n} \rightarrow {}_1^1\text{H} + {}_{-1}^0\text{e}$,即每发生一次 β 衰变,原子核内减少一个中子,减少的那个中子转变为一个质子和一个电子,其中质子留在原子核内部,使其电荷数增加1,电子发射出去。

原子核每发生一次 α 衰变,同时减少两个质子和两个中子,而2个质子和2个中子能十分紧密地结合在一起,在一定条件下,它们会作为一个整体从较大的原子核中被抛射出来,形成 α 射线。核反应方程式: $2{}_1^1\text{H} + 2{}_0^1\text{n} \rightarrow {}_2^4\text{He}$ 。

课堂练习

(1)写出以下元素进行一次 α 衰变的反应方程式:



(2)写出以下元素进行一次 β 衰变的反应方程式:



书写原子核的衰变方程时,要特别强调:①核反应指的是在原子核内部核子数发生相应的变化,而化学反应指的是在原子核外最外层电子数发生变化,二者存在本质的不同。②核反应过程一般都不是可逆的,所以核反应方程只能用单向箭头表示反应方向,不能用等号连接。③核反应的生成物一定要以实验事实为基础,不能依据两个守恒规律杜撰出生成物来写核反应方程。④核反应遵循质量数守恒而不是质量守恒,核反应过程中反应前后的总质量一般会发生



变化(质量亏损)且释放出核能(提醒学生这一点在第5节会学到)。

②核反应过程中释放能量

引导学生阅读“原子核的衰变”最后一段,强调原子核的能量变化和原子的能量变化一样都是不连续的,具有量子化特征,体会物理知识的系统性。明确 γ 射线只是伴随两种衰变而发生的能量辐射方式。

(2) 半衰期

①物理意义

教材明确指出:半衰期是用来描写原子核衰变快慢的物理量,指放射性元素的原子核有半数发生衰变所需的时间。不同元素的原子核,衰变快慢不同,半衰期也不同,甚至差别非常大。

②统计意义

半衰期的统计意义是教学的难点,要引起高度的重视。对于“统计”,大多数学生的认识是模糊的,为此,可帮助学生复习以前学过的相关内容,其要点是理解半衰期是对大量的原子核整体衰变做出的“统计预测”,对少量的、单个的原子核说它的半衰期是毫无意义的。

③决定因素

为了深刻理解放射性元素的半衰期“跟原子所处的化学状态和外部条件没有关系”,务必强调:衰变发生在原子核内部,衰变的快慢是由核内部自身的因素决定的,而原子所处的化学状态和外部条件,一般不会影响原子核的结构。

3. 问题与练习

内容分析

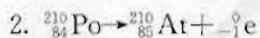
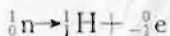
第1题要求会书写 β 衰变的衰变方程,能够透过衰变现象看到衰变的实质。

第2、3、4题要求学生熟悉二种衰变方程,能够正确地书写核反应方程,明确衰变无需借助外部条件,而是自发地进行。

第5、6题要求熟悉半衰期的概念,能够利用半衰期的物理意义进行简单的运算。

解答与说明

1. β 衰变的实质是原子核内的中子转化成了一个质子和一个电子。其转化方程为



4. 设 α 衰变为 x 次, β 衰变为 y 次。核反应方程为 ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + x {}_2^4\text{He} + y {}_{-1}^0\text{e}$ 。根据质量数和电荷数守恒,有 $4x=16$, $2x-y=6$,解得 $x=4$, $y=2$ 。

5. 根据半衰期的定义,剩下的钍为 $m = m_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} = 132 \text{ g}$ 。

6. 由半衰期定义可知,经过时间 t 后,剩余的为 $m = m_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} = 1.25 \text{ g}$, $t=20$ 天。

第3节 探测射线的方法

1. 教学目标

- (1) 知道放射线的粒子能使气体或液体电离、使照相底片感光、使荧光物质产生荧光。
- (2) 了解云室、气泡室和计数器的简单构造和基本原理。

2. 教材分析与教学建议

本节简要介绍了现代几种常用的探测射线的方法，包括威耳逊云室、气泡室、计数器等，简单介绍了各种探测方法的原理、使用方法等。本节所介绍的三种仪器是核物理研究中最基本、最常用的实验仪器。通过对实验的观察和对仪器原理的介绍，应让学生知道，研究原子核变化中的微观现象，可以根据各种粒子产生的宏观效应来观察，并在观察的基础上分析推理，进而作出预测和判断。

教学中应注意结合以前学过的知识来帮助学生理解。如结合过饱和汽《物理选修3-3》第九章第3节的知识，讲清云室的原理；结合电场的知识，讲清射线粒子进入盖革管中产生大量电子的过程。盖革—米勒计数器的工作原理是本节难点。在教学中尽可能地做好演示实验，或者组织学生观看图片、实物、录像等。注意激发学生的学习兴趣，并鼓励学生阅读相关书籍和资料，或通过上网等其他方式来获得新知识，这样可以在提高学生能力的同时开阔学生的思路 and 眼界，使学生感受到现代科学技术并不遥远、并不神秘。

(1) 威耳逊云室

应尽可能通过演示让学生观察云室。学生通过对云室实验的观察，看到射线的径迹，既感到新鲜，又加深了对所学知识的理解。



教学片段

利用云室探测射线

实验装置：威耳逊云室实物或图片

实验过程：

①往云室里加适量酒精，形成酒精的饱和蒸气。

②迅速向下拉动活塞。

强调：“迅速”——酒精蒸气来不及与外界进行热交换， $Q=0$ 。

“向下”——气体膨胀，对外做功， $W<0$ 。

分析：根据热力学第一定律，酒精蒸气的内能减小，温度降低，酒精蒸气的分子平均动能减小。单位时间内回到酒精中的分子数，大于从液面跑出来的分子数，即达到过饱和状态，酒精蒸气极易液化。

③观察射线径迹

原理分析：粒子通过过饱和状态的酒精蒸气，使沿途的气体电离，形成离子，过饱和酒精蒸气以这些离子为核心凝结成小雾滴，显示出射线的径迹。

实验现象：



α 射线的径迹直而粗。这是因为 α 粒子电离本领大，形成的离子多，凝结的雾滴多，所以径迹粗； α 粒子质量大，运动方向不易改变，所以径迹直。

β 射线的径迹细而弯。这是因为 β 粒子电离本领小，形成的离子少，凝结的雾滴少，所以径迹细； β 粒子质量很小，运动方向很容易改变，所以径迹容易弯曲。

由于 γ 粒子电离本领极小，几乎不能使气体电离，所以 γ 射线的径迹一般看不见。

要特别强调的是，在云室看到的只是成串的小液滴，它描述的是射线粒子运动的径迹，而不是射线本身。

(2) 气泡室

气泡室在核物理研究中经常用到。气泡室里装的是液体，根据液体沸点和气压的关系（指导学生复习《物理选修3-3》“气体的液化”），当气泡室的压强突然降低时，液体的沸点降低。若温度略低于液体的沸点，就会导致液体过热，通过液体的射线粒子周围就有气泡形成。科学家通过照片上记录的情况，可以分析粒子的带电、动量、能量等情况（具体分析方法不要求）。

(3) 盖革—米勒计数器

在盖革—米勒计数管中，有外加电压和容易电离的惰性气体。当射线粒子（不管带正电还是带负电）进入管中时，由于粒子的电离作用，使管内气体电离，产生电子和正离子，电子在外加静电力的作用下加速，并与其他气体分子碰撞，使其电离，再产生电子和正离子，如此循环，射线粒子的进入将在管中产生大量的电子和正离子。在外加电场的作用下，电子向着阳极——金属丝偏转，正离子向着阴极——导电圆筒偏转，形成一次电脉冲，计数管计数一次。很明显，盖革—米勒计数器具有明显的优点：方便、灵敏。同时，它也有明显的局限：若射线粒子进入管内的时间间隔太小（200 μ s），计数器将无法分辨；并且，计数器不能分辨射线粒子的种类。

3. 问题与练习

内容分析

通过习题让学生总结威耳逊云室和盖革—米勒计数器的原理及特点。

解答与说明

1. 用云室可以清楚地看出 α 粒子和 β 粒子的径迹（教科书图19.3-2）。 α 粒子质量比较大，在气体中行进时不易改变方向，它的电离本领大，在每厘米的路程中能使气体分子产生10 000对离子，所以它的径迹直而清晰。 γ 粒子的电离本领更小，在云室中一般不直接留下径迹。

2. 云室利用过饱和蒸气能以离子为核心凝结成雾滴显示气体离子的存在。盖革—米勒计数管利用在电场中被加速的离子可以在电路中引起脉冲放电来显示气体离子的存在。

3. 威耳逊云室可以观察粒子的径迹，知道粒子的性质；把云室放在磁场中，还可以知道粒子所带电荷的正负，但是不能用来计数。盖革—米勒计数器只能用来计数，不能区分射线的种类。

第4节 放射性的应用与防护

1. 教学目标

- (1) 知道什么是放射性同位素和人工放射性同位素。
- (2) 知道核反应及其遵从的规律，会正确书写核反应方程。
- (3) 了解放射性在生产和科学领域的应用。
- (4) 知道射线的危害及防护。

2. 教材分析与教学建议

本节内容介绍了通过原子核的人工转变研究原子核结构（核反应）、发现和制造新元素的研究方法，比较了人工放射性同位素和天然放射性物质的区别，并列出了大量实例讲解放射性的应用。教师应归纳利用射线的两个主要途径：一是利用它的射线，二是作为示踪原子。这部分内容可以让学生先阅读课本，然后讨论、总结放射线的各种应用和防护措施。

(1) 核反应

广义地讲，原子核的衰变和原子核的人工转变都属于核反应，但是两者各有特点，要注意它们的区别和联系。核反应的教学是本节和本章的重点，正确书写核反应方程是后续章节正确计算核能的前提，学生必须掌握。



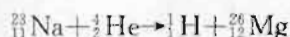
教学片段

原子核的人工转变与原子核的衰变

	原子核的衰变	原子核的人工转变
发生反应的原子核	具有放射性的不稳定核	所有的原子核
反应条件	自发进行，无条件	利用 α 粒子、质子、中子或 γ 光子作为“炮弹”轰击靶核
反应本质	核子数变化，形成新核	核子的重组，形成新核
典型反应	${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$	${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$
核反应方程的特点	箭头左边只有一个放射性原子核	箭头左边有靶核和“炮弹”各一个
核反应的规律	质量数守恒（注意质量并不守恒），电荷数守恒	
书写方程的原则	尊重实验事实，不能仅仅依据守恒定律主观臆造	

巩固练习： ${}^{23}_{11}\text{Na}$ （钠核）俘获一个 α 粒子后放出一个质子，写出这个反应的方程式。

解答： ${}^{23}_{11}\text{Na}$ （钠核）俘获一个 α 粒子（ ${}^4_2\text{He}$ ）后，电荷总数为13，质量总数为27。放出一个质子（ ${}^1_1\text{H}$ ）后，形成的新核电荷数为 $Z=13-1=12$ ，核外电子数即原子序数为12，可知新核为镁元素的原子核；新核的质量数为 $A=27-1=26$ ，新核为 ${}^{26}_{12}\text{Mg}$ ，反应方程为





需要特别强调的是,核子数发生变化导致元素种类发生了变化,是一种质的变化。而一般的化学反应只是原子或离子的重新排列组合,元素本身并没有变化。

(2) 人工放射性同位素

应使学生明白,同一元素的各种同位素中,有的稳定,有的可能不稳定,不稳定的同位素会自发地放出粒子而衰变为其他元素,这种不稳定的同位素就叫做放射性同位素。

放射性同位素具有以下三个特性:①能放出各种不同的射线。有的放出 α 射线,有的放出 β 射线,有的放出 γ 射线或者同时放出其中的两种射线。②放出的射线由不同原子核本身决定。例如钴60原子核每次发生衰变时,都要放射出三个粒子:一个 β 粒子和两个光子,钴60最终变成了稳定的镍60。③具有一定的寿命。例如钴60的半衰期大约是5年。

教材介绍了天然放射性物质与人工放射性同位素的优劣对比,在课堂教学中,教师可以从放射强度的控制难度、半衰期的长短等角度出发,指出人工放射性同位素广阔的应用空间,为放射性同位素应用的教学顺利过渡。

(3) 放射性同位素的应用

在进行放射性同位素应用的教学时,主要应使学生回顾射线的穿透本领、电离作用以及射线的物理、化学和生物作用以及在工农业生产、人民生活和医疗卫生等领域中的广泛应用,同时注意介绍我国在这方面所取得的成就。教学中可让学生通过课前查阅资料和阅读教材等方式来掌握本节内容。对于放射性同位素放出的射线的利用,可以着重介绍下面一些应用。①利用人工放射性同位素放出的 γ 射线的穿透本领检查金属部件是否存在砂眼、裂痕等,即利用 γ 射线探伤。②利用 γ 射线的穿透本领与物质厚度和密度的关系,来检查各种产品的厚度和密封容器中液体的高度等,从而实现自动控制。③利用射线使空气电离而把空气变成导电气体,以消除化纤、纺织品上的静电。④利用射线照射植物,引起植物变异而培育良种,也可以利用它杀菌、治病(如放疗)等。

了解示踪原子的原理。由于放射性同位素跟同种元素的非放射性同位素具有相同的化学性质,如果在某种元素中掺进一些放射性同位素,那么元素无论走到哪里,它的放射性同位素也经过同样的过程。而放射性同位素不断放出射线,再利用仪器探测这些射线,即可知道元素的行踪。

在教学中,可以组织学生访问医院有关人员了解“放疗”和“ γ 刀”的基本原理和相关应用,阅读有关放射性的课外材料或查阅相关网站资料。可让学生根据自己所学知识,通过有关资料的搜集完成一些科技小论文,例如“怎样利用放射性同位素”,写出相关的探究报告,在全班交流,并评选出最佳作品。通过这样的活动,成员相互交流,可以培养学生的团体合作意识,并能发现学生在知识理解上存在的问题。

(4) 辐射与安全

过量的放射线会对环境造成污染,对人类和自然界产生破坏作用。让学生事先查阅有关放射性污染和防护的资料、信息,在课堂上讨论,丰富这方面的知识,激发学生学习的兴趣。老师可介绍几件放射性污染事件,如:①1945年美国向日本的广岛和长崎投了两枚原子弹,当日炸死了十多万人,另有无数的平民受到辐射后患有各种疾病,使无辜的平民痛不欲生。②1987年苏联切尔诺贝利核电站的泄露造成了大量人员的伤亡,至今大片土地仍是生物活动的禁区。③美国在近几年的两次地区冲突(海湾地区、科索沃地区)中大量使用了含有放射性物质的贫铀弹,使许多人患上莫名其妙的疾病。

介绍常见的射线防护方法。为了防止有害的放射线对人类和自然的破坏,人们采取了有效

的防范措施。例如,在核电站的核反应堆外层用厚厚的水泥来防止放射线的外泄;用过的核废料要放在很厚的重金属箱内,并深埋。教育学生在生活中对那些有可能有放射性的物质要有防范的意识,尽可能远离放射源。

3. 问题与练习

内容分析

第1题要求学生能够从人工转变与衰变的物理意义和原子核的反应方程两个方面出发,全面认识两种反应的根本区别,借此加强学生思考、理解能力的锻炼。

第2、3题要求学生能正确书写原子核的人工转变方程,充分认识到方程的书写不能仅仅依据方程两边是否平衡而主观臆造,必须尊重客观事实,从而使学生养成实事求是的科学态度。

第4题,通过练习知道衰变现象十分普遍。

第5题是一道开放性的题目,答案因为学生的视野不同会有所不同。通过本题的练习,学生会认识到,物理学研究的对象就在我们身边,增加学生对于物理知识的亲近感,明白物理知识的实用价值。

解答与说明

1. 原子核的人工转变是指核在其他粒子的轰击下变成新核的过程。而放射性元素的衰变是指核自动转变成新核的变化过程。

$$2. (1) {}_{11}^{23}\text{Na} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_1^1\text{H} + {}_{12}^{26}\text{Mg}$$

$$(2) {}_{13}^{27}\text{Al} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_0^1\text{n} + {}_{13}^{30}\text{P}$$

$$(3) {}_8^{16}\text{O} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_1^1\text{H} + {}_7^{16}\text{N}$$

$$(4) {}_{14}^{30}\text{Si} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_0^1\text{n} + {}_{14}^{30}\text{P}$$

$$3. (1) {}_9^{19}\text{F} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_1^1\text{H} + ({}_{10}^{22}\text{Ne})$$

$$(2) {}_5^{11}\text{B} + ({}_2^4\text{He}) \rightarrow {}_0^1\text{n} + {}_7^{14}\text{N}$$

$$(3) {}_7^{14}\text{N} + {}_0^1\text{n} \rightarrow ({}_6^{14}\text{C}) + {}_1^1\text{H}$$

4. 设某同学身体质量为 50 kg。该同学体内含碳质量为 $50 \times 18\% \text{ kg} = 9\,000 \text{ g}$ 。该同学身体中 1 s 内衰变的碳原子的个数为 $9\,000 \times \frac{10}{60} = 1500$ 。

5. 在医院的放射室看见过这个标志。一般情况要远离这些地方,特殊情况下要在医生指导下进出这些场所。

第5节 核力与结合能

1. 教学目标

- (1) 了解四种基本相互作用,知道核力的性质。
- (2) 认识原子核的结合能及质量亏损,并能应用质能方程进行计算。
- (3) 能简单解释轻核和重核内中子数、质子数具有不同比例的原因。

2. 教材分析与教学建议

本节教材是在学生已经掌握了原子核是由质子和中子组成的基础上,探究是什么作用使得质子和中子可以有机地组成一个稳定的整体。为此,教材首先安排了“核力与四种基本相互作用”,在教授这部分内容时,注意引导学生复习《物理必修1》第三章第1节的知识,同时突



出科学家的大胆“猜想”在研究中的作用。在利用核力的性质解释“原子核中质子与中子的比例”时，首先注意读懂教科书图 19.5-2 所揭示的稳定核中核子的组成情况，再结合核力和电磁力的共同作用，借鉴经典的动力学理论，寻求稳定原子核中核子按不同比例组成的原因。从力的角度认识了原子核后，“结合能”的教学实际上是从能量的角度再次认识原子核，结合能和比结合能的教学，是本节的难点，也是重点，注意结合教科书的例题和教科书图 19.5-3 讲清楚其物理意义。

(1) 核力与四种基本相互作用

① 四种基本相互作用

在《物理必修 1》第三章第 1 节中介绍了四种基本相互作用：万有引力、电磁力、强相互作用和弱相互作用，后两种只能在微观领域内（原子核的尺度 10^{-15} m 范围内）发挥作用，是一种短程力。注意引导学生从两个方面解读教科书的旁批：不同的力在不同的尺度上发挥作用；小粒子和大宇宙之间存在着密切的联系。

② 核力

核力的发现过程充分展示了在科学探究过程中猜想的作用：依据一些事实进行大胆“猜想”，然后通过实验对“猜想”进行科学的论证，直至问题得到圆满的解释。



教学片段

核力的发现

科学背景：20 世纪初，人们知道自然界存在万有引力和电磁力。在相同的距离上，电磁力大约要比万有引力强 10^{35} 倍！

客观事实：在原子核内部的狭小空间，共存有质子和中子。

提出问题：原子核中的质子要靠自身的万有引力来抗衡相互间大得多的库仑斥力是不可能的。是什么作用使质子能够在原子核内共存？

猜想：原子核内的核子间存在第三种相互作用——强大的核力。正是这种强大的核力把核子紧紧地束缚在原子核的范围内，形成稳定的原子核。

实验验证：科学家的猜想得到了实验的验证。不仅如此，科学家还认识到了核力的特点。在介绍核力的特点时，可以根据学生的实际情况适当补充“核力的无电荷性”，即相邻的质子之间、中子之间、中子和质子之间都存在核力。

注意引导学生关注第 80 页旁批的内容，帮助他们认识到，人们对于核力的了解还很不够，尤其是小于 0.8×10^{-15} m 时的核力的变化规律还不清楚，有待于后人们的进一步研究。

(2) 原子核中质子与中子的比例

① 轻、重原子核中质子和中子的比例不同

引导学生识别教材中关于“稳定核的质子数与中子数的关系”图，同时复习处理图象问题的一般方法：纵坐标表示中子数，横坐标表示质子数；图中斜向线段表示理想的质子数和中子数相等的稳定原子核，不规则的斜向曲线表示实际存在的原子核。由图象可以清楚地看到：稳定轻核（原子序数小于 20）的质子数和中子数大致相等；稳定重核（原子序数大于 20）的中子数大于质子数；原子序数越大，这种差异越明显。

②分析原因

稳定的轻、重原子核中质子和中子的比例之所以不同,根本原因在于核子间核力与电磁力的特点不同。对于轻核而言,核子数量相对较小,核子间距处于核力作用范围之内,由于核力远大于电磁力,即使质子和中子成对出现,强大的核力也可以将核子紧紧地束缚在原子核的范围之内,形成稳定的原子核。

对于重核而言,核子数量大,核子间距也大,由于核力的饱和性,核力会因为核子间距变大而大幅度减小,甚至小于电磁力。如果质子、中子再成对出现,会导致电磁力大于核力,原子核不稳定,这就是只有200多种稳定的原子核长久地留了下来。如果只增加中子,由于中子之间不存在库仑斥力,但有相互吸引的核力,所以有助于维系原子核的稳定。所以,稳定的重核内中子数会明显大于质子数。

(3) 结合能

结合能这部分内容的教学可按照书中提供的线索进行,要拆散原子核,必须赋予原子核能量,这个能量就是原子核的结合能。这里要强调81页的旁批,千万不能把结合能理解为“原子核具有的能量”!如何求出这种能量呢?利用质能方程即可计算。教学中应注意一定的质量 m 和一定的能量 mc^2 相对应的观点,以及原子核在变化时,其变化前后的总质量是不同的,这种质量的差异对应的就是核反应中所吸收或释放的能量。还应注意向学生说明,原子核反应中的质量亏损并不破坏质量守恒定律,因为质量、能量是物质存在的两种不同的表现形式,一定的质量和一定的能量相对应。在核能的计算中,要注意训练学生进行单位的换算。如原子质量单位和千克的关系,焦耳和电子伏特的关系。

讲清比结合能的概念,使学生知道比结合能越大,意味着把同样数量的核子分开所需要的能量越大,说明核子的结合越牢固,原子核越稳定。一般说,我们并不关心结合能的绝对大小,而是关心它的变化。发生核反应,从一种核变成另一种核时,结合能会发生变化。比如,由结合能小的核变成结合能大的核,就有可能有能量释放出来。这种在核反应中释放出来的能量就是人们通常所说的核能,而改变原子核就是人们获取核能的基本途径。

(4) 质量亏损

教学中应使学生了解:①一定的质量总跟一定的能量对应,核子在结合成原子核时总质量减少了,相应的总能量也要减少。根据能量守恒定律,减少的这部分能量不会凭空消失,它要在核子结合时释放出去。反过来,把原子核分裂成核子,总质量要增加,总能量也要增加,增加的能量要从外部供给。在原子核反应中往往伴随巨大的放能、吸能现象。②核反应中释放或吸收的能量,可以根据反应物和生成物的质量差用质能方程计算。③核反应中能量的吸放与核力的作用有关。当核子结合成原子核时,核力要做功,所以放出能量(跟重力做功时物体的势能减少、动能增加类似)。原子核分裂为核子时,要克服核力做功,所以要从外界吸收能量。④原子核的质量亏损并不破坏质量守恒定律。例如,在核反应 ${}_0^1\text{H}+{}_1^1\text{H}\rightarrow{}_2^2\text{He}+\gamma$ 中,以 γ 辐射的形式释放能量,光子是有动质量的(静质量为0),它的动质量与氦核的质量亏损相当。

新教材恰到好处地设计了一道例题,通过对例题的处理,可以达到这样几个目的:

①可以帮助学生切实体会到什么叫质量亏损。

一个中子和一个质子结合成一个氦核,结合前质量为 m_n+m_p ,结合后质量为 m_{He} ,因为 $m_n+m_p>m_{\text{He}}$,所以出现质量亏损, $\Delta m=(m_n+m_p)-m_{\text{He}}$ 。

②可以帮助学生体会利用质能方程计算核能的方法。

这个核反应会释放核能: $\Delta E=\Delta mc^2$ 。



③加深对结合能的理解。

一个中子和一个质子结合为一个氘核，会释放 $3.51 \times 10^{-13} \text{ J}$ 能量，意味着将氘核内的中子和质子分开，必须克服核力做功 $3.51 \times 10^{-13} \text{ J}$ ，这就是氘核的结合能。

④加深对比结合能的理解。

氘核内部的核子数 $N=2$ ，所以氘核的比结合能为 $\frac{\Delta E}{N}$ 。

例题分析完后，可顺利过渡到对教科书图 19.5-3 原子核的比结合能的处理。由图象可以清楚地看到：中等大小的核比结合能最大，一方面说明中等大小的核最牢固；另一方面说明由轻核结合为中等质量的核，或由重核分裂为中等质量的核都会出现新的质量亏损。伴随最大的核能释放，这为我们解决能源危机提供了科学上的支持，也正是引起人们“遐想”的根本原因。

3. 问题与练习

内容分析

第 1 题要求能区分核反应方程和化学反应方程，知道两种方程不同书写格式的根本原因。

第 2、3、4 题意在通过简单的计算，深化客观事实与主观感觉的根本区别，加深对于质能方程的理解。

解答与说明

1. (1) 核反应涉及四种基本力中的强相互作用，化学反应涉及四种基本力中的电磁相互作用。(2) 核反应改变了原子核，化学反应可以改变核外电子的排列，从而改变分子结构。

2. 根据质能关系可知 $\Delta E = \Delta mc^2$ 。由于光速很大，我们通常看到的物体能量的变化量对应的质量的变化量很小，因此我们觉察不到质量发生变化。

3. 将题中所给的数据代入公式 $E = mc^2$ ，得

$$E = 1.6606 \times 10^{-27} \times (2.9979 \times 10^8)^2 \text{ J} = 1.4924 \times 10^{-10} \text{ J} = 931 \text{ MeV}$$

4. $1 \mu\text{g}$ 的质量对应的能量为 $E = mc^2 = 1 \times 10^{-9} \times (3 \times 10^8)^2 \text{ J} = 9 \times 10^7 \text{ J}$ 。载有学生的直升机升高的高度为 $h = \frac{E}{(m_1 + m_2)g} = \frac{9 \times 10^7}{(3000 + 6000) \times 9.8} \text{ m} = 1.02 \times 10^3 \text{ m}$ 。

第 6 节 核裂变

1. 教学目标

- (1) 知道核裂变反应。
- (2) 知道链式反应的发生条件。
- (3) 知道原子弹原理。
- (4) 了解裂变反应堆的工作原理，了解常用裂变反应堆的类型。
- (5) 知道核电站的工作模式。

2. 教材分析与教学建议

当前，在新能源的开发和利用中，核能非常重要。核能包括裂变能和聚变能，本节只讨论裂变能的产生及其和平利用。教材沿重核裂变→链式反应→核反应堆（可控链式反应）→核电

站这条主线展开。教学方法主要是以学生阅读教材、背景材料及相关图片为基础,以问题为中心,锻炼学生的思维能力。可以介绍一下我国“两弹元勋”核武器专家邓稼先的杰出贡献及其为科学献身的精神。

(1) 核裂变

①重核的裂变

在教授裂变概念时,可以总结出裂变的几个特点:①裂变过程中能放出巨大的能量,“平均每个核子放出的能量约为 200 MeV。如果 1 kg 铀全部裂变,它放出的能量相当于 2 800 t 优质煤完全燃烧时释放的化学能!”。②裂变的同时能放出 2~3 个(或更多个)中子。③裂变的产物不是唯一的。注意:裂变反应的依据是实验事实,不能仅凭反应前后质量数守恒和电荷数守恒,杜撰裂变反应。重核裂变的机制,一般可不作说明。如果有的同学问到这个问题,可做粗浅的解释,告诉他们:中子打进铀 235 后,形成一个新的处于激发态的核,由于其中核子的剧烈运动,核子间的距离增大,核力迅速减小,不足以克服质子之间的库仑斥力,核就分裂成两部分。应当告诉学生,我国物理学家钱三强、何泽慧夫妇发现铀的三分裂和四分裂现象,是我国科学家在核裂变研究中作出的贡献。不过三分裂和四分裂现象产生的几率为二分裂现象产生的几率的千分之三。利用这点向学生进行爱祖国、爱科学的教育。

②链式反应

应该让学生了解,维持链式反应要有一定的条件。如果每次裂变放出的中子平均有一个能再度引起裂变反应,或者说一代裂变中子的总数不少于前一代的中子数,链式反应就能维持下去。由于裂变中放出的中子有的可能从裂变物质中漏失出去,有的可能被裂变物质吸收而没有产生裂变,也有的可能被裂变物质中所含的杂质吸收,所以链式反应未必能持续地进行下去。要维持链式反应,就要减少裂变物质中的杂质(要浓缩铀),还要增大裂变物质的体积,这就引入了临界体积的概念。要让学生了解,参加裂变反应的裂变物质体积越大,中子的漏失越少。裂变物质达到一定体积(即临界体积)时,链式反应就可以持续下去。还可以告诉学生,跟临界体积相对应的裂变物质的质量,叫临界质量。纯铀 235 的临界体积(球形)直径只有 4.8 cm,相应的临界质量只有 1 kg 左右。核反应堆,由于堆型的不同,临界质量可以从几千克到几百千克。瞬时集中释放能量就是爆炸,在此,注意指导学生阅读 STS,引导他们关注科学技术的社会责任。

(2) 核电站

核反应堆是可控的链式反应装置,它能使核能平稳释放。重点介绍核反应堆的主要组成:①核燃料,由天然铀或浓缩铀(能吸收慢中子的铀 235 占 3%~4%)制成的铀棒。②慢化剂(减速剂),常用的慢化剂有石墨、重水和普通水(轻水)。重核裂变(铀棒“燃烧”)产生的快中子,与慢化剂中的原子核碰撞后,能量减少,变为慢中子。③控制棒,镉棒吸收中子的能力很强,镉棒插入越深,吸收的中子越多,链式反应的速度越慢,反之亦然。④冷却剂,水或液态钠把反应堆内释放的热量传输出去用于发电,同时使反应堆冷却,保证安全。⑤水泥防护层,用来屏蔽裂变产物放出的各种射线。

核反应堆有非常广泛的用途,可以作为核动力,例如核电站、核舰艇、核潜艇的动力源。核反应堆还可以用来生产各种放射性同位素,提供中子源和生产裂变材料等。结合核电站的教学,应该适当介绍世界上各发达国家以及一些发展中国家和地区在核能发电上取得的进展,介绍我国广东大亚湾和浙江秦山核电站的有关情况,指明发展核电站以应对能源日益增长的需求。



要是一种必然的趋势,使同学们能够正确认识我国对发展核电站建设的政策和措施。教学中让学生了解目前所有正式运行的核电站都是应用裂变发电的。

3. 问题与练习

内容分析

第1、2题主要考查学生对核裂变、核反应堆的了解情况。

第3题要求学生知道核反应过程中质量数守恒,但是质量并不守恒。能够利用质能关系方程进行简单的计算,真正认识到小小的原子核中蕴藏着丰富的能量,激发学生开发核能的原动力。

第4题主要考查学生运用已有的知识(动量守恒)解决新问题的能力,加深学生对于物理知识的系统性的认识。

第5题要求学生能够利用质能关系方程进行简单的计算。

第6题意在让学生初步认识核能的和平利用及其美好前景。

解答与说明

1. 重原子核受到中子的轰击分裂成两个或两个以上中等质量原子核的现象,称为核裂变。由重核裂变产生的中子使裂变反应一代接一代继续下去的过程,叫做核裂变的链式反应。

2. 在核反应堆中,主要通过调节控制棒(镉棒)的位置控制核裂变的速度。

3. 衰变后的质量亏损为 $\Delta m = (226.025\,4 - 222.017\,5 - 4.002\,6)\,u = 0.005\,3\,u$ 。

由第5节“问题与练习”中的第3题可知, $1\,u$ 相当于 $931\,\text{MeV}$, 因此释放的能量为

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 0.005\,3 \times 931\,\text{MeV} = 4.934\,3\,\text{MeV} = 4.934\,3 \times 10^6\,\text{eV}$$

4. (1) 中子与原子核相碰,系统的合外力为0,动量守恒。设中子的质量为 m , 碰撞前的速度为 v_0 , 碰撞后的速度为 v_1 , 碳核碰后的速度为 v_2 。由动量守恒得 $mv_0 = mv_1 + 12mv_2$, 由能量守恒得 $\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2} \times 12mv_2^2$ 。两式联立得 $v_1 = -\frac{11}{13}v_0$ ($v_1 = v_0$ 与实际不符,舍去), “-”表示碰撞后中子反向。中子损失的动能为

$$\Delta E = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{48}{169}E_0$$

(2) 中子每次与原子核相碰的情景都一样,由于每碰一次,中子的速度大小都变为碰前的 $\frac{11}{13}$, 因此碰撞 n 次后,中子的速度大小变为 $v_n = \left(\frac{11}{13}\right)^n v_0$, 动能变为 $E_n = \frac{1}{2}mv_n^2 = \left(\frac{11}{13}\right)^{2n} E_0$, 由 $E_n = \left(\frac{11}{13}\right)^{2n} E_0 = 10^{-6} E_0$ 得 $n \approx 42$ 。即至少经过42次碰撞,中子动能才能小于 $10^{-6} E_0$ 。

5. 衰变后的质量亏损为 $\Delta m = (3.853\,131 \times 10^{-25} - 3.786\,567 \times 10^{-25} - 6.646\,72 \times 10^{-27})\,\text{kg} = 0.000\,096\,8 \times 10^{-25}\,\text{kg}$, 释放的能量为

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 0.000\,096\,8 \times 10^{-25} \times (3 \times 10^8)^2\,\text{J} = 8.712 \times 10^{-13}\,\text{J}$$

6. 年发电量为 $3.0 \times 10^8 \times 365 \times 24 \times 3\,600\,\text{J} = 9.460\,8 \times 10^{15}\,\text{J}$ 。

每年耗铀量为 $\frac{9.460\,8 \times 10^{15}}{8.2 \times 10^{10}}\,\text{g} = 115\,\text{kg}$ 。

1. 教学目标

- (1) 知道核聚变反应。
- (2) 关注受控聚变反应研究的进展。
- (3) 通过核能的利用, 思考科学技术与社会进步的关系。

2. 教材分析与教学建议

本节介绍了聚变这一获得核能的又一重要途径、聚变的优点以及目前的研究进展。人类对聚变的研究已取得了一定的成果, 但目前聚变所获得的核能还只能用于核武器中。和平利用聚变所产生的核能还在研究之中, 虽然取得一些进展, 但技术还不成熟。如果哪个国家(集团)最先获得成功, 就会抢占应用核能的制高点。

(1) 核聚变

核聚变是轻原子核相遇聚合成较重原子核时, 由于比结合能增大, 发生新的质量亏损而放出巨大能量的过程。实现核聚变必须要有极高的温度, 故又称热核聚变。要引导学生理解关于聚变反应的条件: 为什么需要极高的温度? 热核反应发生后, 还需要外界条件吗? 自然界中只有在太阳等恒星内部才具有发生热核聚变的条件。氢弹爆炸虽是人工热核聚变, 但无法控制。这样, 受控热核聚变就成为当前世界科学技术最大的主攻课题之一。

让学生知道聚变反应能够释放能量, 每个核子平均释放的能量在聚变反应中比在裂变反应中的大, 聚变反应比裂变反应更剧烈。在太阳内部, 氢核在极高温下聚变成氦核, 在这过程中释放出 28 MeV 的能量。但是聚变反应要求的条件更高, 因为要使核发生聚变反应, 必须使它们接近到 10^{-15} m 的距离。由于质子带正电, 要使它们接近到这种程度, 必须克服电荷之间很大的斥力, 这就需要核有很大的动能。当物质达到几百万度以上的高温时, 原子核核外电子已经完全和原子脱离, 成为等离子体, 这时小部分原子核就有足够的动能克服相互间的库仑力, 在相互碰撞中接近到可发生聚变反应的距离而发生核反应。这种聚变过程不是一次反应就能完成的, 要经过几次反应才能把四个氢核聚合成一个氦核。

(2) 受控热核反应

引导学生了解核聚变能源同世界上已有的核电站所产生的核裂变能相比, 不仅能源储量极大, 而且更加“清洁”。它的原料是从浩瀚的海水中提取的。受控热核反应一旦研究成功, 人类就将从海水中的重氢(氘)中获得无限丰富的新能源。

介绍磁约束时, 注意回归基础: 在垂直磁感线(磁场)的平面内, 运动电荷受到洛伦兹力作用做圆周运动, 运动半径 $r = \frac{mv}{qB}$, B 越大, r 越小, 运动电荷就会绕着磁感线绕圈子而不飞散。着重介绍“中国环流器一号”是从事受控热核聚变反应研究的实验装置, 是依靠我国的工业、技术基础研制成功的。它的建成并投入正常运转, 说明我国受控热核聚变反应科研工作进入了一个新阶段。

3. 问题与练习

内容分析

本节练习的第 1、2、5 题, 主要考查学生的阅读和自学能力, 在教材上可以找到现成的



答案。

第3题是一道科普方面的练习，虽然计算简单，但题目的本意是培养学生崇尚科学、远离迷信的正确的世界观。

第4题的练习可以巩固学生对于质能关系方程的熟悉程度。

解答与说明

1. 两个轻核结合成质量较大的核，这样的核反应叫做核聚变。从比结合能图线看，聚变后比结合能增加，因此反应中要释放能量。

2. 核反应方程式为 $^3_2\text{He} + ^{16}_8\text{O} \rightarrow ^{20}_{10}\text{Ne}$ 。从比结合能曲线看，反应后比结合能增加，反应中要释放能量，说明反应式左边的原子核具有较多的能量。

3. 太阳每秒释放的能量为 $E = 4 \times 10^{26} \text{ J}$ 。太阳每秒失去的质量为

$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{4 \times 10^{26}}{(3 \times 10^8)^2} \text{ kg} = 4.44 \times 10^9 \text{ kg}$$

4. 三个 α 粒子结合成一个 $^{12}_6\text{C}$ 核的质量亏损为： $\Delta m = 3m_\alpha - m_c = (3 \times 4.0026 - 12.0000) \text{ u} = 0.0078 \text{ u}$ ，放出的能量为 $\Delta E = \Delta mc^2 = 0.0078 \times 931 \text{ MeV} = 7.26 \text{ MeV}$ 。

5. 必要性：由于地球上化石燃料和裂变材料的贮量有限，开发聚变能非常重要，并且是一项十分紧迫的任务。各国科学家都在加紧研究，以期尽快在地球上制造出人类自己的“太阳”，缓解甚至消除能源危机的困扰。

可能性：地球上聚变燃料的储量丰富。每升水中含有 0.03 g 氘，地球上的河流、湖泊、海洋等有 138.6 亿亿立方米的水，大约有 40 多亿吨氘。反应中所用的氘可以利用锂来提取，地球上锂的储量有 2000 亿吨，用来制取氘足以满足聚变的需要。

困难：地球上没有任何容器能够经受住热核反应所需要的高温。

第8节 粒子和宇宙

1. 教学目标

- (1) 初步了解粒子物理学的基础知识。
- (2) 初步了解恒星的演化。
- (3) 学生在学习过程中了解、感受科学发展过程中蕴藏着的科学和人文精神。

2. 教材分析与教学建议

本节介绍了粒子物理学中的一些基本知识，如人类发现的三类粒子（强子、轻子和媒介子）和夸克模型，要求学生有常识性的了解就可以了。对于宇宙和恒星的演化，简单介绍了宇宙大爆炸理论和恒星的演化过程，使学生认识到恒星与其他事物一样，也有发生、成长与消亡的过程。

通过本节的教学，让学生知道现代物理前沿，了解人类对物质结构的认识是不断深入的。物理学家们期望能从宇宙射线中得到来自宇宙远方的新粒子的信息。科学探索是永远没有尽头的，人类对真理的追求也是永无止境的。随着科学技术的不断进步，粒子物理学必然会踏上更高的台阶，不断加深人们对自然界物质的本质的认识。

在课堂教学中，可以用表格的形式，罗列粒子的种类（参考“问题与练习”第1题），让学生对于粒子物理有一些常识性的了解。本节教材之所以将大宇宙与小粒子写在一起，是希望

突出“研究微观世界的粒子物理、量子理论，与研究宇宙的理论竟然相互沟通、相互支撑。”科学家在两个极端尺度上做了哪些探索？这两个极端尺度又怎样相互支撑？反映了一个怎样的自然观？描述了一个怎样的自然图景？教师可以和学生一起通过查阅资料了解这些问题。

3. 问题与练习

内容分析

本节练习可以以教材为根本，指导学生通过网络完善知识体系，丰富学生学习和求知的手段。

解答与说明

1. 粒子分类参考表格

强子			轻子	媒介子
介子		重子	电子、电子中微子、 μ 子、 μ 子中微子、 τ 子、 τ 子中微子	光子、中间玻色子、胶子
π 介子	K介子	质子、中子、超子		

2. 宇宙演化过程的示意图：

大爆炸→夸克、轻子、胶子等→强子时代→轻子时代→核合成时代→电子与质子复合成氢原子→形成恒星和星系。

恒星演化过程的示意图：

宇宙尘埃→星云团→恒星诞生→氢核聚合成氦核→氦核聚合成碳核→其他聚变过程→无聚变反应，形成白矮星或中子星或黑洞。

三、教学设计案例

放射性元素的衰变

1. 教学目标

- (1) 知道原子核的衰变。
- (2) 会用半衰期描述衰变的速度，知道半衰期的统计意义。
- (3) 知道两种衰变的规律，能够熟练写出衰变方程。

2. 教学过程

(1) 导入新课

师：同学们有没有听说过“点石成金”的传说，“点石成金”者在追求什么？

生：学生讨论非常活跃，孙悟空，八仙，神仙，魔术，街头骗局……

师：刚才同学们讲的都很好，但都是假的。

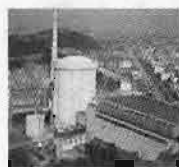
生：学生顿时安静，同时也心存疑惑：当然是假的，难道还有真的不成？

师：那有没有真的“点石成金”呢？

生：学生愕然。

师：有（大声，肯定地回答）。

生：学生惊讶，议论纷纷。



师：其实，“自然”这个伟大的魔术师早就在做着这种事情，这就是我们今天要学习的放射性元素的衰变。

(2) 进行新课

① 原子核的衰变

师：原子核放出 α 或 β 粒子，由于核电荷数变了，它在周期表中的位置就变了，变成了另一种原子核，也就是由一种物质变成了另一种物质，我们把这种变化称为原子核的衰变。

生：（豁然开朗）原来自然界早就在不断发生着这种变化，只是当时的人们并没有及时发现它。

师：铀 238 放出一个 α 粒子后，核的质量数减少 4，核电荷数减少 2，变成新核——钍 234。这种放出 α 粒子的衰变叫做 α 衰变。

这个过程可以用衰变方程式来表示： ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$ （一边说一边写，不要解释，要请学生来分析其中的奥秘）。

生：衰变方程式和化学反应方程式有何联系与区别？

师：请同学们仔细观察衰变方程式和大家熟悉的化学反应方程式有何不同？

学生充分讨论。

师：和化学反应方程式、离子反应方程式一样，原子核的衰变方程式也遵守自己的守恒定律，即质量数守恒和核电荷数守恒。请问这是为什么？

学生思考。

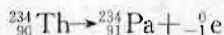
师：原子核自发进行衰变，每释放一个 α 粒子（ ${}_2^4\text{He}$ ），质子数（电荷数）理应减少 2，质量数（核子数）理应减少 4，元素发生了变化，一种物质就变成了另一种物质。而在这个过程中，仍然遵守电荷数守恒和质量数守恒，因此，方程两边的电荷数、质量数相等。

α 衰变规律： ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4\text{He}$

钍 234 也具有放射性，它能放出一个 β 粒子而变成 ${}_{91}^{234}\text{Pa}$ （镤），那它进行的是 β 衰变，请同学们写出钍 234 核的衰变方程式？

学生探究、练习写出钍 234 核的衰变方程式。

师：钍 234 核的衰变方程式



衰变前后核电荷数、质量数都守恒，新核的质量数不会改变但核电荷数应加 1。

β 衰变规律： ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_{-1}^0\text{e}$

师：在 α 衰变、 β 衰变中，分别从原子核中释放出了 α 粒子和 β 粒子，难道原子核内还存在着这两种粒子吗？

指导学生阅读教材。

师：由第一节的知识，大家知道，原子核内部只有质子和中子。请问大家， α 粒子和 β 粒子是如何形成的？

探究：衰变的本质就是原子核内部核子数的变化。每发生一次 α 衰变，原子核都要减少两个质子和两个中子。但是，在衰变的产物中，并未出现质子和中子。这充分说明，从原子核内部“剥离”出来的两个质子和中子是以另外一种形式被释放出来的，这就是 α 粒子。即 $2{}_1^1\text{H} + 2{}_0^1\text{n} \rightarrow {}_2^4\text{He}$ 。

结合教材，请同学们解释在 β 衰变中释放出电子的原因。

通过师生的共同探究，得到以下共识。原子核内虽然没有电子，但核内的质子和中子是可

以相互转化的。当核内的中子转化为质子时同时要产生一个电子： ${}_0^1\text{n} \rightarrow {}_1^1\text{H} + {}_{-1}^0\text{e}$ 。这个电子从核内释放出来，就形成了 β 衰变。可以看出新核少了一个中子，却增加了一个质子，并放出一个电子。

师：原子核处在比原子更小尺度的微观世界，因此，它也遵从微观世界的规律，能量也是不连续的，也有能级，同样是能级越低越稳定。在发生 α 衰变和 β 衰变时，原子核受激发处于高能级状态，不稳定，在向低能级跃迁的过程中，产生光（能量）辐射，形成 γ 射线。

生： γ 射线的本质是能量，伴随 α 射线和 β 射线而产生。

②半衰期

阅读教材半衰期部分，教师展示问题：放射性元素的衰变的快慢有什么规律？用什么物理量描述？这种描述的对象是谁？

生：学生带着问题看书。

师：教师提供教材上的氢的衰变图的投影（教科书图 19.2-3）

$$\frac{m}{m_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

生：（学生交流阅读体会）氢每隔 3.8 天质量就减少一半；放射性元素衰变的快慢用半衰期来表示；半衰期描述的对象是大量的氢核，具有统计意义。

师：同学们的回答都很精彩（鼓励）。

教师总结：

半衰期表示放射性元素衰变的快慢，放射性元素的原子核，有半数发生衰变所需的时间，叫做这种元素的半衰期。半衰期描述的对象是大量的原子核，不是个别原子核，这是一个统计规律。

在这里，学生对于半衰期的统计意义理解起来有一定的难度，要注意引导学生复习、回顾《物理选修 3-3》有关“统计”的知识。

师：硬币有两面：一面是国徽，一面是字。上抛硬币，从理论上讲出现国徽和字的可能性各为 50%。现在先后两次上抛硬币，如果第一次出现国徽，第二次是否一定出现字？

生：第二次不一定出现字。

师：“出现国徽和字的可能性各为 50%”的结论有错误吗？

至此，学生应该可以明白：之所以两面出现的几率不等，是因为上抛次数不够多的原因，关于“统计”的含义，学生有了直观的认识。

师：“衰变是微观世界里原子核的行为，而微观世界规律的特征之一在于‘单个的微观事件是不可预测的’”。放射性元素的半衰期是对大量原子核衰变快慢统计的结果。

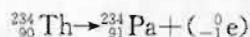
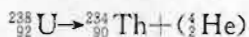
巩固练习：氢的半衰期是 3.8 天，若有 4 个氢原子核，经过 7.6 天后，是否只剩下一个氢原子核？

答案：不对。半衰期是大量原子核衰变时遵循的统计规律，对少数原子核的衰变不成立。就像把硬币向上抛出 100 次，你不能说国徽向上的次数总是 50 次一样。

师：衰变发生在原子核内部，衰变的快慢是由核内部自身的因素决定，而原子所处的化学状态和外部条件，都不会影响原子核的结构。所以元素的半衰期与原子所处的化学状态和外部条件无关。

③巩固提高

1. 配平下列衰变方程：



2. 钍 ${}_{90}^{232}\text{Th}$ 经过_____次 α 衰变和_____次 β 衰变, 最后成为铅 ${}_{82}^{208}\text{Pb}$?

生: 因为 α 衰变改变原子核的质量数而 β 衰变不能, 所以应先从判断 α 衰变次数入手

$$\alpha \text{ 衰变次数} = \frac{232 \text{ u} - 208 \text{ u}}{4 \text{ u}} = 6$$

每经过 1 次 α 衰变, 原子核失去 2 个基本电荷, 那么, 钍核经过 6 次 α 衰变后剩余的电荷数与铅核实际的电荷数之差, 决定了 β 衰变次数

$$\beta \text{ 衰变次数} = \frac{(90e - 2e \times 6) - 82e}{(-1)e} = 4$$

课后探究: 如何利用放射性元素的衰变来测定古物的年代?

3. 教学设计说明

本堂课从内容上来讲非常抽象, 从掌握知识的角度来讲理解和记忆的成分较多。其中, 半衰期的统计意义和衰变的本质, 学生理解起来都有一定的难度。在教学设计中, 力图通过类比、例证、推理等学生容易接受的方法实施突破, 用经典的、常见的练习作为课堂巩固, 来加深学生对这部分知识的理解和记忆。

四、教学资源库

(一) 概念、规律和背景资料

1. 衰变定律

实验表明, 在时间 dt 内, 放射性元素衰变的原子核数 dN 跟放射性元素的原子核数 N 以及 dt 成正比。

$$dN = -\lambda N dt \quad (1)$$

式中 λ 是比例恒量, 叫做衰变恒量, 表征放射性元素衰变的快慢。式中出现的负号是由于放射性元素的原子核数目是随着时间的增加而减少的。把公式改写成

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

积分得

$$\ln N = -\lambda t + C$$

用 N_0 表示 $t=0$ 时放射性原子核的个数, 代入上式得 $C = \ln N_0$, 因此

$$\ln N = -\lambda t + \ln N_0$$

即

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

所以

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

由于放射性元素的质量 m 和它所包含的原子核数成正比, 所以



$$m = m_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

式中 m_0 为 $t=0$ 时放射性元素的质量。②和③式叫做放射性元素的衰变定律。

习惯上常用半衰期来表示放射性元素衰变的快慢。半衰期就是原有的原子核数衰变掉一半所经历的时间，用 τ 表示。当 $t=\tau$ 时， $N=\frac{1}{2}N_0$ ，由②式得

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda \tau}$$

所以

$$\begin{aligned} \lambda \tau &= \ln 2 \\ \tau &= \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \end{aligned}$$

可见半衰期是由衰变恒量决定的一个恒量。不同的放射性元素，它们的半衰期也不同，半衰期越短的放射性越强。

2. 贝可勒尔 (Henri Becquerel, 1852—1908)

法国物理学家，1895年任巴黎高等工业学校物理学教授，1897年成为科学院院士。伦琴发现了X射线后，贝可勒尔在研究这种不可见辐射与可见光之间的联系时发现，某些铀盐能放出不可见的射线，使包在厚黑纸中的胶片感光，这就是后来称之为放射性的现象。1899~1900年，他测定了放射的成分β射线在电场和磁场中的偏转，证明了β粒子就是电子。1901年，他又提出了有关辐射的生理效应的报道，他因内衣口袋里装着放射样品而受到了灼伤。贝可勒尔因发现放射性，与居里夫妇一起，荣获1903年诺贝尔物理学奖。

3. 玛丽·居里 (Marie Curie, 1867—1934)

杰出的法国物理学家和化学家，放射性学说的奠基人之一。原籍波兰，出生于华沙。1891~1894年在巴黎大学学习，1895年和物理学家皮埃尔·居里 (Pierre Curie, 1859—1906) 结婚。夫妻共同致力于科学研究工作。皮埃尔的早期贡献有：确定了磁性物质的转变温度，建立了居里定律，发现了晶体的压电现象。

1896年贝可勒尔发现了放射性。居里夫妇对铀、钍等矿物的放射性进行了研究，并从大量沥青铀矿中分离出放射性更强的物质，于1898年发现了两种元素：钋和镭。由于发现放射性，居里夫妇和贝可勒尔共获1903年诺贝尔物理学奖。

1906年，皮埃尔因车祸不幸逝世。玛丽接任了她丈夫在巴黎大学的物理学教授职位，成为该校第一位女教授。1910年，她和法国化学家德别尔诺一起分析出纯镭元素，并确定了它的原子量和在元素周期表中的位置。她还测出了钋和其他许多放射性元素的半衰期，整理出放射性元素衰变的系统关系。由于这些重大成就，又荣获1911年诺贝尔化学奖。

居里夫人研究了放射性辐射对人体细胞的影响，第一个在医学上利用了放射性。1922年被选为医学研究院会员，此后她专心致力于化学和放射性物质在医学上的应用研究。

4. 约里奥·居里 (Frederic Joliot Curie, 1900—1958)

法国物理学家，居里夫人的女婿。在卢瑟福提出的用α粒子轰击原子核技术的启示下，他和他的妻子伊丽芙·居里 (1897—1956) 一起，从事原子核研究。1932年在云室实验中取得第一张同时产生的正负电子对的照片。他们对中子的发现，也做出了重要贡献。1932年1月，曾就一种强穿透性粒子发表论文，同年2月，经查德威克研究，确定为中子。1934年，他们用钋产生的α粒子轰击铝，产生出中子和正电子，生成放射性磷，首次获得人工放射性物质。



他们用同样方法又制成许多其他放射性物质，并发现放射性同位素在医学和生物学上有广泛用途，因此获得了1935年诺贝尔化学奖。1938年底，哈恩等人发现核裂变不久，约里奥·居里也独立发现了这一过程，并提出裂变中产生的许多中子有可能发展成链式核爆炸反应。

5. 核力

核力是指核子之间的相互作用力。这种相互作用力极其复杂，到现在为止，对核力的认识还不完全清楚。但是通过实验和理论的广泛研究，对核力的认识已积累了多方面的知识。

核子之间的相互作用力是一种短程的强相互作用，作用范围在费米($=10^{-15}\text{m}$)的量级上。这种强相互作用应在多种强子之间起作用，而且很可能是一种多体力。但是现在普遍认为核力主要是两体力，只在每两个核子之间起作用，而多体力是较小的；并且认为核力可以用一位势给出，它只与核子的运动自由度（位置、动量、角动量等）有关。因此，我们就可以将含有 A 个核子的原子核的哈密顿量写成：

$$H = T + V$$

动能项

$$T = -\sum_{i=1}^A \frac{\hbar^2}{2m_i} \nabla_i^2$$

势能项

$$V = \sum_{i < j}^A V_{ij}$$

其中 m_i 为第 i 个核子质量， V_{ij} 就是通常所说的二体核势，或称二体核力。

二体核力 V_{12} 按上面的假设，应只与两个相互作用的核子的位置 r_1 、 r_2 ，动量 p_1 、 p_2 和自旋 $s_1 = \frac{\hbar}{2}\sigma_1$ ， $s_2 = \frac{\hbar}{2}\sigma_2$ 有关。这里 σ 为泡利矩阵。由于两体运动可以分成质心运动和相对运动，而对相互作用而言，只需考虑二者的相对位置 r 和相对动量 p ，即只与相对运动有关。因此二体核力应具有如下的函数形式：

$$V_{12} = V(r, p, \sigma_1, \sigma_2)$$

通过一系列的实验研究，例如，对氦核的性质的研究，对中子—质子散射的研究，对质子—质子散射的研究等，了解到 V 所具有的一系列特性：①含有中心力和非中心力，中心力又包含交换力和非交换力；②核力为短程强相互作用；③具有电荷无关性；④含有速度无关成分和速度相关成分，速度相关的最低项为自旋—轨道耦合力；⑤核力具有排斥性。

关于核力主要是二体力的假设在许多实验中获得了成功，但多体核力的作用，特别是三体核力（由三个核子的运动自由度所决定）的影响也得到了实验的证实，这仍需作进一步的研究。

关于核力的根本问题还在于对其本质的了解，也就是关于强相互作用的理论。近些年来，关于核力的夸克理论，量子色动力学等理论的发展，对核力的研究正在深入之中。

（摘自《原子与原子核物理学手册》，陈辰嘉主编，北京出版社，1993年，有改动）

6. 结合能随质量数 A 和电荷数 Z 变化的平均趋势

从一个核到另一个核，比结合能忽高忽低，然而却不是杂乱无章的。如果将比结合能对 A （或 Z ）相近的核作平均，这平均值随 A （或 Z ）的变化组成一光滑曲线（教科书图 19.5-3）。实际核的比结合能在这光滑曲线上上涨落。除了极轻的核外，涨落幅度都不大。这种结合能曲线表现出结合能随 A （或 Z ）变化的平均趋势，向我们传递核结构的基本信息。稳定核的比结合能最大。

首先我们注意到较轻的稳定核中，中子数 $N=A-Z$ 和质子数 Z 是近似相等的。这说明核

的结合能中有一项对称能,当中子数和质子数相等而处于对称地位时这项结合能最大;而当两者的差增加,中子和质子在核内的地位变得不对称时这项结合能变小。对称能的存在至少可部分地由泡利原理说明。两个中子或两个质子都是全同费米子,它们只能组成全反对称态。这就使它们能组成的态受到限制,而一个中子和一个质子则不是全同的。它们能组成的态不受限制,这就使它们能选择能量更低的态,也就是到达结合能更大的态。这一点对二核子系统最明显。氘核含一个中子和一个质子,是稳定的。可是却不存在由两个中子或两个质子组成的束缚态。氘核中两个核子总自旋为三重态,对交换两核子的自旋是对称的。氘核中的波函数对交换两核子的空间坐标也是对称的,即它处于两个核子的自旋—空间全对称态。这种态只对一个中子和一个质子的情形可以实现,而对两个质子或两个中子的系统则由于泡利原理而不能实现。恰巧只有在这种态中两个核子才能结合,因此只存在中子与质子的束缚态而不存在两个中子或两个质子的束缚态。同样的机制在一般情形下会贡献一份不对称能。

核内质子的正电荷间有一项静电能,称为库仑能。这是一份正能量,因而起着降低结合能的作用。库仑能对中子和质子是不对称的。在核子数 A 一定的条件下它使稳定核的电荷数 Z 向减小的方向移动,移向 $Z < \frac{A}{2}$ 的方向。可见库仑能起着与对称能相抗衡的作用。核稳定条件是比结合能极大。对一定的核子数 A , 这条件决定了稳定核的 Z 值。或者说它决定了稳定核中中子数 N 与质子数 Z 的关系。将这一关系在 $Z-N$ 平面上画出来就是 β 稳定线(教科书图 19.5-2), 稳定核分布在此线附近的狭长带内,称为 β 稳定区。在稳定区外左上方的核称为丰中子核。这种核因中子过多而不稳定,会通过 β 衰变放出电子和反中微子,沿 $N+Z=\text{常数}$ 的直线移向 β 稳定区。在 β 稳定区外右下方的核称为缺中子核。这种核因中子过少而不稳定,会通过 β^+ 衰变放出正电子和中微子,沿 $N+Z=\text{常数}$ 的直线移向稳定区。 β 稳定线在轻核区接近直线 $N=Z$, 随着核子数的增加而向 $N>Z$ 的方向弯曲。

结合能曲线的一个重要特征是在 A 从 50 到 150 的 β 稳定区内是近似平坦的。比结合能接近常数。这是由于核作用为短程强作用,它使每个核子只与邻近核子结合,而与远处核子无关。因此比结合能 b 接近常数,而总结合能 $B=bA$ 与质量数 A 成正比。与之对照,质子间的库仑力为长程力,每个质子受到核内所有质子的库仑作用,每质子的库仑能正比于质子数 Z , 因而总库仑能正比于 Z^2 。这就可以理解重核的比结合能下降而趋于不稳定。每核子结合能在轻核方面的下降可由表面效应理解。核内每个核子四周都有核子包围。而核表面的核子只有一侧与其他核子相邻,另一侧是空的。这就使表面上每核子的结合能低于核中心部分每核子的结合能。这份与核表面面积成比例的能量称为核表面能。轻核表面的核子数在总核子数中占的比率较高,表面效应较突出,因而使比结合能下降。

(摘自《原子核物理——它的成就、问题和发展》,张启仁著,山西教育出版社,1995年)

7. 核裂变反应堆

假如我们把一定数量的铀元素堆放在一起,其中某些铀 235 原子核由于偶尔被天然宇宙射线中的中子击中,会产生裂变,会放出能量,也会放出中子。那么,这种反应能不能持续下去呢?可能有三种情况。

第一种情况,如果这堆铀元素中含的铀 235 量很少(例如天然铀只含 0.714%),堆放得也很分散,则每次裂变后放出的 2~3 个中子都散失到空间去了,只是偶尔有 1~2 个又能击中别的铀原子核。这样,裂变反应不会连续不断地进行,只是偶尔出现一次,这堆铀的裂变反应情况与它们在天然铀矿中时没有多大差别。铀在矿藏中未被开采出来以前,也会偶尔有几个原



子核裂变，一般每千克铀元素中每分钟有 15 个原子核发生裂变，这叫做自发裂变。

第二种情况，如果这堆铀元素中含的铀 235 量非常高，比如达 90% 以上，堆放得又很紧凑，则一个铀原子核裂变放出的 2~3 个中子马上又会引起 2~3 个原子核裂变，这 2~3 个原子核裂变物中约 4~9 个中子又引起 4~9 个原子核裂变，放出 8~27 个中子引起 8~27 个原子核裂变，如此迅速蔓延，使裂变不断成倍增长，如排山倒海而来，十分迅猛，能量释放也十分剧烈。如果这堆铀有一定数量，例如几十千克，就会产生核爆炸，这就是原子弹爆炸。

第三种情况，如果这堆铀堆放得很巧，使每个原子核裂变后放出的 2~3 个中子中，恰好只有一个击中别的原子核引起裂变，其余 1~2 个中子散失到空间，或被别的物质吸收而不引起裂变，那么，连锁反应就会以稳定的水平持续不断地进行下去，能量平稳释放。这样堆放铀的一整套装置就是我们通常所说的核反应堆。在核反应堆里，单位时间内的核裂变次数是稳定不变的。要达到这一点，就必须设法调节中子的去向，使每一代中子中用于裂变的数量总是不变的，多余的中子或被吸收（不引起裂变）或被泄漏到反应堆外的空间。这就是反应堆控制系统的任务。

铀 235 每次裂变产生的中子，除了泄漏和吸收的以外，还有一个中子能引起另一个铀 235 原子核裂变。上一代中子引起裂变的数目刚好与下一代中子引起裂变的数目相等，使裂变刚好能维持下去，也就是达到了临界，即增殖系数 $k=1$ 的状态。要想达到临界需具备四个基本条件：①必须使裂变材料多而且集中；②中子的泄漏少；③中子的非裂变吸收少；④应该使中子有充分的慢化。如果这些条件同时得到满足，就容易达到临界。若是在这些条件中的某一方面不能得到充分满足或不能完全满足，则需要加强别的条件以弥补所造成的缺陷。铀 235 受到中子轰击后很容易分裂，并且对任何速度的中子都是来者不拒，但速度越慢的中子越容易引起铀 235 核的分裂。所以，要想办法让中子速度减慢，使在含铀 235 极少的天然铀中发生链式反应，同时还要避免中子被铀 238 吸收。办法是把天然铀做成一根根的棒，称它为“燃料元件”。把燃料元件插在能使中子速度减慢的慢化剂中，燃料元件之间有一定的距离，使中子刚好能减速到最慢的速度。那么，用什么材料做慢化剂的问题又提出来了。我们不难联想到，作为慢化剂，其原子核的质量接近于中子的质量的效果最好，也就是说，做慢化剂的材料要越轻越好。但由于种种综合因素，人们选用石墨、水、重水作为慢化剂，而重水是最好的慢化剂。不过，重水在自然界中的量很少，普通水中只有五分之一是重水，要用电解的方法才能把重水分离出来，其费用很大，因此重水很贵。中子在慢化剂内的运动速度也符合布朗运动的原理，中子的运动速度一直降低到慢化剂所处温度下的热速度时为止。以热速度运动的中子称之为“热中子”，这时的中子速度为最低（在 $T=300\text{ K}$ 时，中子平均热运动动能约为 0.025 eV ，速度约为 $2.2\times 10^3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）。中子与铀 238 要碰撞 2 100 次后才慢化为热中子，与碳（石墨）、重水分别是在碰撞 110 次、24 次后慢化为热中子。把燃料元件插在慢化剂里的结果，使中子在慢化剂中慢化的那一过程中，恰好躲过了铀 238 共振吸收的范围，所以我们可以认为，慢化剂是中子躲过共振吸收的避风港，待到中子已变为热中子再冲回燃料元件中去时，就只会引起铀 235 的分裂了，链式反应就能持续进行下去了。

从能量的角度来说，原子核刚裂变时放出的中子具有很高的能量，平均每个中子有 2 MeV ，这是快中子。它能在物质中快速穿梭运动，与别的原子核撞击，失去动能，放出热能。快中子与裂变物质（例如铀）原子核撞击时，虽然可能引起分裂，但是更可能被弹回去，不引起裂变。中子运动的速度越慢，它与铀核撞击时引起分裂的可能性就越大。所以，为了使中子能较容易引起裂变，就要设法将中子的能量在多次撞击中降低。当中子的能量降至不到

1 eV 时,就是我们通常所说的热中子。因为热中子引起核裂变的可能性比快中子大几百倍,所以,为了减少反应堆内裂变物质的装载量,就要设法使刚裂变出来的快中子与反应堆内某些物质相撞击,使其能量逐步降低,容易引发裂变。这种装在反应堆中用于降低中子能量的物质就是慢化剂。

什么物质适合于做慢化剂呢?慢化剂应具备两个条件:一是它的原子核与中子撞击时容易使中子丧失能量,即中子较多被慢化下来;二是它不要把中子“吃”掉,即不要把中子吸收去,使中子损失掉。一般说,轻的原子核容易使中子慢化。可是,轻原子核不“吃”中子或很少“吃”中子的并不多。现在广泛用作慢化剂的物质实际只有四种,即轻水、重水、石墨(碳)、铍。其中,轻水主要是利用其氢,它的慢化性能极好,但吸收中子也较多;重水利用其所含的氘,氘的慢化性质也很好,而且吸收中子很少,是很好的慢化剂;石墨即固体碳;铍或氧化铍也可用作慢化剂,但因为有毒且价贵,故应用并不广泛。

用轻水作慢化剂的反应堆叫轻水堆;用重水作慢化剂的反应堆叫重水堆;用石墨做慢化剂的叫石墨堆。因为它们主要是以热中子来引发裂变的反应堆,所以都属于热中子反应堆。

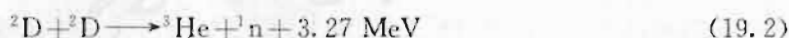
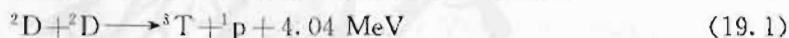
(摘自《核能——无穷的能源》,欧阳予著,清华大学出版社、暨南大学出版社,2002年)

8. 核聚变,聚变能的控制与应用

核子间的相互作用把它们结合成原子核。至少对于轻核,这种作用可近似当作一对对核子间核力作用的结果。在核结合中核力的中程强吸引起主要作用,而短程强排斥则使核结合达到饱和。那么,核子是通过一些什么过程聚合成各种原子核,伴随这些过程会发生什么现象,而这些现象又有哪些应用呢?在轻核方面聚合反应在能量上是有利的,是放能反应,在自然界能自发进行,在人类实践中则可用来作为巨大的核能源。

最简单的聚合反应是中子与质子聚合成氘核并放出结合能 2.22 MeV。由于这能量太小,只能以光子的形式放出,这一过程只能是电磁作用过程,截面^①远小于强作用引起的核反应。况且中子质量比质子质量与电子质量的和高出 0.8 MeV,是不稳定的,会经 β 衰变放出一个电子和一个反中微子而变成质子。这一衰变的半寿期仅 10.80 ± 0.16 min,自然界残存的中子极少。这使中子与质子直接聚合成氘核的反应在自然界中罕见。另一简单的聚合反应为两个质子放出一个正电子和一个中微子后聚合成氘。这是一个弱作用过程,截面比中子—质子直接聚合的过程还小。但自然界,特别是在一些恒星的内部存在大量质子,这就使在宇观尺度的时间(例如 10^5 年)内能发生可观的这类过程。它们在自然界元素合成和提供恒星能源方面起着重要的作用。每一次这种反应放出能量 0.4 MeV。

在过了形成氘核这一关后,接着是一系列截面较大的聚合反应。它们是



其中 ${}^1\text{p}$ 表示质子,有时也记作 ${}^1\text{H}$; ${}^1\text{n}$ 表示中子,它被当作电荷数为 0、质量数为 1 的核; ${}^2\text{D}$ 表示氘核,有时也记作 ${}^2\text{H}$; ${}^3\text{T}$ 表示氚核,有时也记作 ${}^3\text{H}$,这些反应也是利用聚变能的反应。(19.1)和(19.2)称为 D—D 反应。其中的燃料—氘核可从海水中提取。海水中重水约占七千分之一,每升海水可提重氢,即氘 0.03 g。由于氘核质量为普通氢核即质子的两倍,这两种

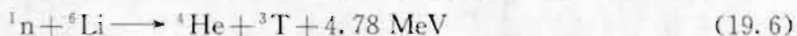
^① 截面为单位面积入射一个粒子的条件下这个粒子与靶粒子实现相应过程的几率。

同位素的分离比较容易。以相同质量的燃料完全燃烧比,核能为化学能的千万倍。可见当海水中氘核充分聚变时,一升海水能释放的聚变能相当于数百升石油完全燃烧释放的化学能。

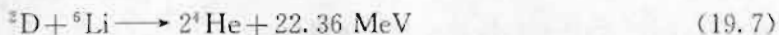
在(19.1)和(19.2)产生的 ${}^3\text{T}$ 和 ${}^3\text{He}$ 可在反应(19.3)和(19.4)中使用。如果 ${}^3\text{T}$ 和 ${}^3\text{He}$ 得到充分利用,这四个反应的总效果可表示为



每核子平均释放能量达 3.6 MeV。(19.3)称为 D-T 反应,是获取聚变能的主要反应。这不仅因它放能多而且因它截面大,因而在同样温度和密度下它的反应率高。核物理中截面的单位取作 10^{-24} cm^2 ,称为 1 巴恩(barn),简记为 b,意为谷仓,表示这个单位很大。一般核反应的截面不及 1 巴恩。然而 D-T 反应在氘核能量为 110 KeV 处达到一极大约 5 b,这使它成为获取聚变核能时的首选反应。这一反应的缺点是氚为不稳定核,会经 β 衰变转化为 ${}^3\text{He}$,且半衰期仅 12 年。这使自然界残存的氚微乎其微。在用它时需从其他核素制取。一般采用反应



这个反应还同时放出自身的一份聚变能。 ${}^6\text{Li}$ 做成氦化锂固体置于容器内壁。反应时分解出来的氚还可用于反应(19.1)~(19.4)。(19.5)的中子来源可以是(19.2)和(19.3),也可来自外源。有时将(19.3)与(19.6)合并写作



到现在为止,聚变能的大规模人工释放还只在氢弹爆炸中实现。氢弹内部有一颗小型原子弹。氢弹由它起爆,原子弹爆炸时由重核裂变提供的能量造成轻核聚变燃料的高温高压环境,而它产生的大量裂变中子则成为引发(19.6)反应的外部中子源。一旦引发(19.6)后,它所产生的氚与氘发生反应(19.3),一方面维持高温高压,另一方面补充中子维持高中子流环境,直到氢弹爆炸结束。

实现受控聚变反应,和平利用聚变能是人类的一个梦想。它将使人们从几乎取之不尽的海水中得到充足的能源。达到这一目标的障碍是参与聚变的核之间的静电排斥作用。只当两个核有足够能量克服它们之间的库仑势垒,彼此靠近到核力力程之内,聚变才能发生。由于微观粒子可以穿透势垒,参与聚变的核的能量并不一定要达到库仑势垒的高度,但要有可观的聚变发生则需有可观数量的核能量达到与库仑势垒高度同数量级的程度。前面估计氘核尺度达 4.3 fm,如果两个氘核的正电荷相距 12 fm 时应有可观的机会发生聚变。这时两氘核间的库仑势能达 120 keV,由 $\frac{3}{2}kT=120 \text{ keV}$ 可估算出所需温度为 10^8 K ,在这种温度下所有的分子和原子都已离解,物质处于原子核和电子几乎自由运动的等离子体状态。依赖高温来实现聚变的方法称为热核聚变或热核反应。当然具体需要多高的温度才能实现可资利用的聚变则和其他条件有关,如等离子体的密度和能维持高温高密状态的时间等。一般说来密度越高或维持时间越长对高温的要求就可放得越松。而这一切又和具体的技术指标相关联。这里附带说一下,高温等离子体的密度一般是极低的,这里所说的高密状态是对等离子体而言的,它实际上比普通物质的密度低得多。例如, 10^{15} cm^{-3} 对等离子体中的氘核数密度而言已是高密度了,但在通常标准看来这几乎是真空。

数亿度高温的等离子体显然不能放在普通容器中。这主要不是怕它损坏容器,因为它的密度很低,对容器的损害不像初看上去那么可怕。主要是怕它的温度因与容器壁接触而骤然下降。20 世纪 50 年代发明了磁约束方法。即利用带电粒子在磁场中做圆运动的规律用磁场把等离子体约束在一定范围内。这种用磁约束方法产生高温高密等离子体以实现受控热核聚变的



研究至今仍是和平利用聚变能研究的主流。与之根本不同的方法包括各种惯性约束法。这类方法将聚变核燃料制成小球，用激光、高能电子束或重离子束从四方八面射向小球，以极大的压力挤压它，在它内部造成高温高密状态，以实现核聚变。由于高温高密发生在小球内部，自然与周围隔离，直到小球爆炸。

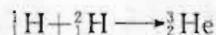
现已有报道，在磁约束和激光惯性约束下均发生了聚变反应，测到了聚变反应中放出的中子。但要使聚变输出的能量大过为了产生反应而输入的能量则还需作不懈的努力。

(摘自《原子核物理——它的成就、问题和发展》，张启仁著，山西教育出版社，1995年)

9. 太阳里的热核反应

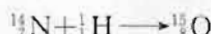
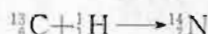
热核反应在宇宙中是普遍的现象。在太阳和许多行星内部，温度都高达1 000万度以上，在那里热核反应剧烈地进行着。太阳内部，氢是最丰富的元素。太阳的热核反应是氢核聚变为氦核的过程，有两种可能发生的反应序列：一种是质子循环，另一种是碳氮循环。

质子循环的反应如下



前两个反应，在生成 ${}_2^4\text{He}$ 核时必须进行两次。

碳氮循环的反应如下



两种循环都是4个质子聚合成一个 ${}_2^4\text{He}$ 核，释放出两个正电子。正电子跟电子相遇，发生湮灭，转变为 γ 光子。每个反应序列都放出约28 MeV的能量。两个序列发生的几率大致相等。

在太阳内部的热核反应中，每秒钟可将约6亿吨的氢变为氦，失去400多万吨的质量，释放的能量达 3.8×10^{26} J。太阳已燃烧了近50亿年。

10. 对原子核结构的认识简史

早在1815年，英国医生兼化学家普劳特(W. Proust, 1785—1850)根据多数元素的原子量是氢原子量的整数倍，提出所有元素都由氢原子组成的假说。因为发现有些元素的原子量不是整数，特别是氯的原子量为35.46个单位，铜的原子量为63.54个单位，这个假说到19世纪末被放弃了。

19世纪末20世纪初，发现了放射性现象和同位素，引起了对原子构造的新探索，也包括对原子核结构的探索。1919年，卢瑟福发现一个 α 粒子能引起氮核的人工衰变，而衰变的产物之一是质子(即氢核)。1921~1924年，卢瑟福和他的学生查德威克对硼、钠、铝等轻元素进行人工核反应，同样有质子分裂出来。以上事实显然说明原子核内存在质子。问题是原子核是否只有质子？当人们从元素周期表看到除氢以外，核的电荷数(原子序数)总是小于质量数时，曾假定原子核内除质子之外，还包含电子，它们的电荷量足以抵消额外质子的电荷，而电子的质量很小，不影响原子核的质量。即一个原子序数为Z，质量数为A的原子核，它就是



由 A 个质子和 $(A-Z)$ 个电子所组成。这就是核结构的质子—电子假说。

质子—电子假说在某些方面能初步说明各种元素的性质，如解释原子核的 α 和 β 衰变现象、核质量近似为质子质量的整数倍等。但是这一假说与许多实验事实不符，理论上也存在困难，例如，随着测量的逐渐精确，核质量愈加偏离质子—电子假说所预言的质量；束缚在核内的电子，要有上百兆电子伏的能量，而 β 衰变的电子能量只有 1 MeV 的量级，靠电子—质子之间的微弱的电磁相互作用力根本不可能使电子保持在核内。另外，例如氮 ^{14}N 核的角动量，按照质子—电子假说应为 14 个质子与 7 个电子，自旋值为 $14 \times \frac{1}{2} + 7 \times \frac{1}{2} = 21 \times \frac{1}{2}$ （奇数个半整数），即为费米子，而通过原子光谱的超精细结构的实验测定却应为偶数个半整数即 ^{14}N 核应为玻色子！最后，实验也测不出核内含有的电子磁矩，而只能成功地测出质子的磁矩，前者应为后者的 1840 倍（与质量成反比）。质子—电子假说所遇到的这些巨大困难，说明了人们对微观世界认识的曲折进程。也从反面说明了质子—中子说的来之不易。

1920 年，卢瑟福提出一种猜想，预言原子核内可能存在一种质量与质子相近的中性粒子。1921 年，美国化学家哈金斯 (W. D. Harkins, 1873—1951) 将它命名为“中子”。卢瑟福一直追寻这种粒子，但经历了 12 年后，才由他的学生查德威克找到。

中子的发现证实了卢瑟福预言的正确性，使得建立一种没有电子参与的核模型成为可能。1932 年，海森伯和苏联物理学家伊万年科各自独立地提出了原子核由质子和中子组成的假说，根据这一假说，一个原子序数为 Z 和质量数为 A 的原子核，由 Z 个质子和 $A-Z$ 个中子组成。

核结构的质子—中子假说圆满地说明了元素的质量数和电荷数，解释了同位素以及放射性现象，使“质子—电子”假说面临的许多困难迎刃而解，因而立即被科学界普遍接受，很快成为原子核理论的基础，至今仍然是描述核的特性和结构的基础。这导致了对核作用力的研究，为粒子物理的发展开辟了道路。

人们在认识原子核结构的过程中，主要提出了五种具体的模型：气体模型、液滴模型、 α 粒子模型、壳层模型、综合模型，各种模型分别适用于核现象的一个特定方面，但迄今还没有哪一个模型能恰当地圆满地描述从放射性衰变到核反应和裂变的广阔范围里的一切现象。此外，还须进一步研究质子—质子、质子—中子、中子—中子这三种相互作用，以便说明原子核的主要性质。

有些实验表明，核内除有质子和中子外，还可能存在其他粒子，例如，当核被高能激发时出现 π 介子；1953 年发现了含有 Λ 超子的超核，近些年来又发现了含有超粒子的超核。这些问题还和迅速发展的“基本粒子”物理紧密相关。因此，探索原子核的结构及其内部运动规律，仍然是人类未来向知识深度进军的一个重要目标。

11. 粒子间的相互作用

物质世界运动变化多样性的根源在于自然界存在着四种基本相互作用，即强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和引力相互作用。

强相互作用 存在于重子、介子等强子之间的基本相互作用。核子之间的核力是它的一个典型实例。强相互作用是一种短程力，作用范围为 10^{-15} m 量级，作用强度约为电磁相互作用的 10^2 倍。目前，对强相互作用的机制还不清楚。近年来发展的量子色动力学 (QCD) 能解释强相互作用的一些问题。这个理论认为强相互作用是通过胶子传递的。实验上已观察到胶子存在的迹象，但还没有直接的证据证明胶子的存在。

电磁相互作用 这是目前了解得最清楚的一种相互作用，量子电动力学 (QED) 可以对

它进行精确的计算。电磁相互作用是一种长程力，作用于所有微观或宏观带电或带磁矩的物体之间。大到天体，小到 10^{-18} m 范围内，理论计算都跟实验事实符合得很好。量子电动力学认为，电磁相互作用是由电磁场的量子——光子传递的。

弱相互作用 广泛存在于轻子和轻子间、轻子和强子间、强子与强子间的一种基本相互作用。原子核的 β 衰变是它的一个实例。弱相互作用也是一种短程力，作用范围比强相互作用还要短，作用强度约为强相互作用的 10^{-6} 倍。弱相互作用是通过质量很重的中间玻色子 $W^{\pm}$ 和 Z^0 传递的，它们的质量分别为： $m_W^{\pm} = (80.9 \pm 1.5) \text{ GeV}$ ， $m_Z^0 = (95.6 \pm 1.4) \text{ GeV}$ 。

引力相互作用 支配着宏观物体运动变化，例如，天体运动规律的一种长程力。在微观领域里，引力相互作用远远弱于其他三种相互作用，以致实际上无法检验在微观领域里万有引力定律是否仍然正确。例如，根据万有引力定律考虑两个质子间的引力相互作用与它们间的强相互作用的强度之比仅为 10^{-38} 。理论上，传递引力相互作用的量子是引力子。目前，实验上尚未发现引力子的存在。

现代的量子场论认为，每一种粒子都有一种与之对应的场存在。场没有不可入性，各种不同粒子的场互相重叠，充满整个空间。场能量的最低态称为基态；场的激发态表现为出现相应的粒子，不同的激发态表现为粒子数目和状态的不同。场处于基态时没有粒子出现。所有的场都处于基态时，就是物理真空。所以场是比粒子更基本的物质形态。无论是处于基态或处于激发态的场，都可以与其他的场发生相互作用；粒子间的相互作用和转化，乃是场之间相互作用的结果。以 β^- 衰变 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ 为例：开始时中子场处于激发态，表现为存在一个中子，而质子场、电子场和中微子场则处于基态，表现为没有质子、电子和中微子。经过中子场与质子场、电子场和中微子场的弱相互作用，中子场跃迁到基态，由于能量的传递使质子场、电子场和中微子场受到激发，表现为中子消失而产生了一个质子、一个电子和一个反中微子。这就是通过弱相互作用的 β^- 衰变的量子场论图景。

在粒子世界里，除了强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用外，有迹象表明，可能还有超弱相互作用与超强相互作用存在。某些相互作用间可能有本质的联系，可以统一理解。例如，已由实验证实的弱电统一理论，就把弱相互作用和电磁相互作用做了统一的解释。还有大统一理论和超统一理论，则企图在更广泛的范围内统一理解各种相互作用的本质。这些方面的理论和实验工作都在进行中。

（二）联系生活、科技和社会的资料

1. γ 射线探伤法 (gamma-ray materiology)

用 γ 射线检验金属材料与工件内部缺陷的方法。通常采用射线照相法。让 γ 射线穿过被检查的工件，在工件后面放上底片，并尽量与工件贴紧。穿过缺陷部分到达底片的射线比穿过正常部分到达底片的射线，强度要大，在显像后的底片上会显示出黑色区域，用这种方法可以发现工件内部缺陷，并确定其大概的形状和位置。

为了使拍照的影像清晰，放射源与工件的距离应比工件大。还可以在底片前面放一张重元素屏，例如铅屏（称为增感屏），因为穿过工件的 γ 射线会在屏中产生光电子和康普顿电子，这些次级电子可以增强底片的感光。增感屏的最佳厚度，主要由 γ 射线的能量决定，也跟所用底片的性质有关。



γ 射线探伤经常采用的放射源有 ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{192}Ir 等。不同放射性核素发出的 γ 射线能量不同。低能射线探测的灵敏度高,但探伤厚度不及高能射线。 ^{60}Co 的 γ 射线能量为1.17 MeV和1.33 MeV,可探测5~30 cm的钢铁制品, ^{192}Ir 的 γ 射线能量为0.137 MeV和0.651 MeV,可检验1~6 cm的钢铁制品。

2. 放射性示踪法 (radioactive tracer method)

由于放射性核素不断发出辐射,无论它运动到哪里,都很容易用探测器探知它的下落,因此可以用作示踪物来辨别其他物质的运动情况和变化规律。这种放射性示踪物称为示踪原子或标记原子。

1911年,G. 赫维西(G. Hevesy, 1885—1966)第一次使用了放射性示踪物。为了确定女房东是不是把星期天剩下的馅饼掺到后几天的膳食中,他把一些放射性钼放到新做好的馅饼中,到了星期三,借助于验电器指给女房东看,在蛋奶酥中含有放射性物质。不久,他就把示踪法引入到研究工作中去。

自那以后,放射性示踪技术已有长足进步:放射性核素的数目及其有效性大大增加了,探测方法的灵敏度及其在能量的选择性方面都有很大改进。例如,第101号元素钔(Md),只要有20个原子,就能把它鉴别出来。因此,放射性示踪技术,在工农业生产、医疗卫生和科学研究等方面都有广泛的应用。例如,可以将放射性同位素引入待研究的机械材料中去,在制成的机件运转时,收集磨损下来的碎屑和落下的润滑油,定时测量它们的放射性,就可以确定机件的磨损情况。又如,用放射性杂质代替寻常杂质,扩散到半导体中,然后逐层磨下,测量其放射性强度,就可以了解杂质扩散的情况。在农业上,可以用放射性示踪研究作物对肥料的吸收情况:把放射性颗粒状磷肥放到作物根旁土壤中,15~20 min,叶片上就有放射性磷出现,观察放射性增加的速度,就能估计作物吸收磷肥的速度。在医学和生命科学的研究方面,把用放射性核素标记的物质A引入动物体,经过一段时间,从排出物或组织中分离出另一化合物B,含有相当数量的上述标记核素,即可确定A在动物体内可以转变为B。例如,将 ^{14}C 标记的糖喂给大鼠,发现从其脂肪中分离出来的脂肪酸有很强的放射性,就证明了糖在动物体内可以变成脂肪这一很重要的代谢规律。也可以用放射性标记某种物质,追踪这种物质在动物体内转移和移动的速度,研究其吸收、摄取、浓集、分布、分泌、排泄以及药物作用原理等问题。

放射性示踪的应用,隐含着两个假定:一是放射性核素和它的稳定同位素化学性质相同;二是研究对象的化学特性不受放射性衰变的影响。第一个假定仅当同位素的质量效应很重要时才是不正确的,这种情况只在氘—氕—氚互相取代时才会发生。第二个假定,只要示踪物的浓度很小就是正确的。

3. 核电池 (nuclear battery)

将放射性核素辐射的核能转变成电能的装置,有几种不同的类型:

恒流充电型 β 放射性源放出的电子,给绝缘导体充电后被收集器收集起来。放射性源一端失去电子成为正极,收集器一端得到电子成为负极,在正负极之间形成电势差。这种核电池可产生高达150 kV的电压,但电流很小,最大短路电流只有 10^{-11} A。

温差电偶型 用放射线的能量给温差电偶的一个结点加热升温,得到温差电。实际装置是用一层转换体把放射性源包起来,转换体外面还有一绝缘层。转换体吸收了全部放射性粒子的能量,把核能转变为内能,温差电偶的热结点与转换体接触,其温度 T_h 与转换体温度相同,外端的温度为 T_c ,最大效率为

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_c}$$

接触电势差型 把具有接触电势差的两个电极经由电阻连接起来,用放射性源发出的射线使电极间的气体电离,就可产生电流。

PN 结型 与光电池原理类似,用放射线照射 PN 结,产生电子—空穴对,在自建电场的作用下,空穴移向 P 区,电子移向 N 区,从而在 P 区和 N 区间产生电势差。

可用于核电池的核素有许多种,最常用的有两种:一种是经济易得的 ^{90}Sr ($T_{1/2} = 28.5 \text{ a}$),一种是半衰期长、易于防护的 ^{238}Pu ($T_{1/2} = 87.75 \text{ a}$)。

核电池具有结构紧凑,运行可靠,不受周围环境影响,能长期工作而无须看管等优点,可用于宇宙航行,空间考察,海上灯塔,海底电缆(增音器),沙漠、高山和险滩中的自动气象站、地震观测站等,5~10 年不需更换电源。医用的心脏起搏器也要使用核电池。

4. 放射性测定年代 (radioactive age determination)

应用放射性核素的衰变规律,可以测定矿石、地层的生成年代,也可以测定某些古文物的年代和古生物遗骸的死亡年代。前者可用铀铅法,后者用 ^{14}C 法。

铀铅法 ^{238}U 的半衰期为 4.5×10^9 年,它的最终子体是稳定的 ^{206}Pb 。假定矿石在生成时不含铅,单位质量中 ^{238}U 的原子数为 $N_0(^{238}\text{U})$, λ 为 ^{238}U 的衰变常量,矿石的年龄为 t ,则目前每单位质量中, ^{238}U 的原子数目为

$$N(^{238}\text{U}) = N_0(^{238}\text{U})e^{-\lambda t}$$

^{206}Pb 的原子数为

$$N(^{206}\text{Pb}) = N_0(^{238}\text{U}) - N(^{238}\text{U}) - N'$$

N' 为单位体积中所有 ^{238}U 的放射性子体的原子数目。当 t 很大(超过 10^5 年)时, $N' \ll N(^{206}\text{Pb})$, 则有

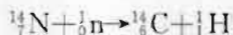
$$\begin{aligned} N(^{206}\text{Pb}) &= N_0(^{238}\text{U}) - N(^{238}\text{U}) \\ &= N(^{238}\text{U})(e^{\lambda t} - 1) \end{aligned}$$

由此可得

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{N(^{206}\text{Pb})}{N(^{238}\text{U})} + 1 \right]$$

所以测出矿石样品单位体积中 ^{206}Pb 原子数与 ^{238}U 原子数的比,就可以知道矿石的年龄。

^{14}C 法 在碳元素中除了含有大量稳定的 ^{12}C 和 ^{13}C 外,还含有微量的放射性同位素 ^{14}C ,半衰期为 5 730 年,它是宇宙射线中的中子穿过大气层时与空气中的 ^{14}N 核碰撞发生核反应生成的



宇宙射线不断地射到地球上, ^{14}C 不断地产生又不断地衰变,结果大气中 ^{14}C 的含量保持不变。大气中的 ^{14}C 与氧化合生成放射性二氧化碳 $^{14}\text{CO}_2$, 通过光合作用进入植物体。动物以植物为食, ^{14}C 又进入动物体。因此,在生物体内 ^{14}C 与非放射性碳的含量比与大气中二氧化碳里两者的比相同。生物体死亡以后停止了与外界的物质交换,体内原有的 ^{14}C 只能不断地衰变而得不到补充。因此,从古代生物遗骸中 ^{14}C 与非放射性碳的含量比,就可以求出它死亡的年代 t 。用 λ 表示 ^{14}C 的衰变常量, $A_0 = \lambda N_0$ 表示处于交换运动中的 ^{14}C 的放射性活度, $A = \lambda N$ 表示所测样品的 ^{14}C 的放射性活度,仿照铀铅法的推理,则有



$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A_0}{A}$$

构成生物体的碳中， ^{14}C 的含量极少， ^{12}C 与 ^{14}C 原子含量的比为 $10^{12} : 1.2$ 。因此，测定 ^{14}C 的放射性相当困难，需用特殊的技术与装置。

5. 辐射防护 (radioprotection)

核辐射的生物效应主要由于电离作用对生物分子的破坏。因此，一切致电离辐射——能直接引起电离的 α 粒子、 β 粒子和质子，能间接引起电离的 γ 射线和中子，都可能成为伤害人体的来源。

致电离辐射在人体某种组织中造成的伤害程度，首先取决于辐射在该组织中沉积的能量。其次，能量沉积的距离（或体积）也是重要的。如果能量在短距离内沉积，它对某种组织的伤害大于沉积距离大的情况。例如， α 粒子在人体组织中的射程非常短，就是说它们在短距离内沉积能量，所以进入体内的放射性源发出的 α 粒子所造成的伤害，比 γ 射线源（不管是体内的还是体外的）沉积同样能量所造成的伤害大。

外部照射的损伤主要由体外辐射源发出的 γ 射线所引起。 α 和 β 粒子几乎不会引起损伤，除非它的源非常接近人体或就在皮肤表面上。而以各种方式进入体内的 α 粒子、 β 粒子、 γ 射线或中子的源，则引起内部照射。这时，人体就将连续不断地遭受辐射照射，放射性物质的量只能靠自然衰变和人体排泄而减少。

某些元素天然倾向于集中在特定的组织或器官中，这些元素的放射性同位素的行为与其稳定的同位素一样。例如，所有碘的同位素都倾向于聚集在甲状腺中，钙的同位素则沉积在钙化的骨组织中。锶、钡和镭与钙的化学性质类似，它们具有置换骨中钙的倾向。钚如果溶入血液中则将部分地沉积在某些骨骼表面或肝脏中，存留相当长的时间。比较难溶解的钚化合物，如二氧化钚，吸入肺之后，可以存留数年之久。

微弱的放射性照射对人体并无损伤。人们是经常处于射线的照射之下的。自然界存在的 ^{14}C 、 ^{40}K 、 ^{226}Ra 等放射性元素，在人体内不断地新陈代谢，并发出射线。但人们对此都能自然地适应，并不影响健康。只有超过一定剂量的照射，才会造成伤害：能引起各种放射病，重者可以致死；远期效应可引起各种恶性肿瘤、不育甚至早亡。

对体外照射的防护应从以下四个方面着手：①在使用放射性物质时（如在实验工作中）用量要尽可能少。②受照射的时间尽可能短，不要在放射性物质的周围做不必要的停留，用放射性物质进行的操作，力求熟练、迅速。③与放射性源的距离尽可能远，如操作时利用各种夹具或进行远距离操纵。④屏蔽，常用的材料有铅、铁、水泥、砖、石、泥土、硼酸、石蜡、铝、铅玻璃、有机玻璃、水和溴化锌水溶液等。

对不同的放射性粒子，可采用不同的措施。 α 粒子射程很短，工作时只要戴上手套，不直接去摸放射性物质就可以了。 β 射线比 α 粒子的贯穿能力强，在空气中的射程可达数米，但它容易被不太厚的铝层、铜片、有机玻璃或玻璃所吸收。不过原子量较大的物质，例如铅，一般不适于做 β 射线的屏蔽物，特别是对于高能量的 β 射线更不适宜，因为它们较易引起贯穿力很强的 X 射线（韧致辐射）。 γ 射线的贯穿能力比 α 、 β 射线大得多，要选用原子序数大、密度大的材料，如铁、铅、铅玻璃等来屏蔽。考虑到经济实用，也可用混凝土、水等廉价材料。中子的防护可归结为快中子的减速和慢中子的吸收。中子的减速用轻元素，最好的是氢，实用上多采用水、石蜡做中子的慢化剂。氢也是比较好的吸收剂，但效果不如锂和硼，一般常用硼酸水溶液做吸收剂。

对内照射的防护,必须避免放射性物质进入体内和污染身体。要禁止在可能存在放射性污染的地区抽烟、进食或饮水。通风系统的设计必须使空气总是从辐射水平较低的区域流向辐射水平较高的区域。尘埃也要加以控制,最好用真空除尘,清扫时应有足够湿度,以防止尘埃飞扬。在空气尘埃难以避免的区域内工作时,应戴适当的面具。对出入可能存在放射性污染区域的人员,应提供一次性使用的工作服、手套和鞋套;这些物品应留在规定的出口,根据情况进行去污或另作处理。对离开现场的工作人员要仔细进行放射性监测。

(三) 实验参考资料

1. 用云室观察 α 粒子的径迹

J2553型威耳逊云室外形如图19-1所示。密闭容器(云室)A装在底座B的支架C上,杠杆D通过拉杆F能使云室的底上下运动,G为限位柱,孔H供装入放射源用。云室A的内部结构如图19-2所示。

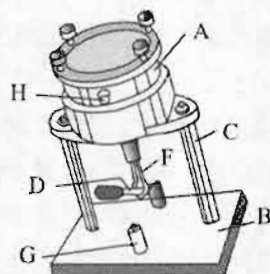


图 19-1

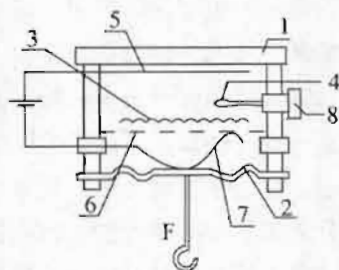


图 19-2

使用方法:

①由孔H用吸管向云室中的呢绒3上均匀地滴洒约1 mL的稀释酒精(60%工业酒精和40%水混合),如外界气温低于15℃则酒精不必稀释。

②将放射源4(含镭或钍)的杆插到螺栓8上,由孔H放入云室内。拧紧螺栓,使之密封,这样,云室中就充满了饱和蒸气。

③将J1205型高压电源的300 V直流电源接到云室的接线柱上,正极通金属丝5,负极经过弹簧片7通金属网6,使5和6间形成电场。放射源放出的粒子会使云室中形成大量离子分布在空间中,这电场的作用就是将这些离子吸引到电极上,就不会影响观察新放出的粒子径迹。

④用强光由侧面射入云室。但光源不可距离云室太近,以免引起云室内气体形成热对流。

⑤用手将杠杆D迅速下压,拉杆F使云室的底2向下运动,云室中气体绝热膨胀而降温,蒸气变为过饱和,这一瞬间通过透明上盖1可看到若干条由放射源向四周呈辐射状的细小液滴串,显示出放射源射出的 α 粒子的径迹。这时弹簧片随云室的底下移而与金属网分离,空间中的电场消失,不致影响 α 粒子的运动。

⑥放开杠杆,经过30~60 s,待云室中蒸气恢复平衡后,可再次向下压杠杆观察径迹。

注意事项:

①如云室密封不严就不出现径迹,应将上盖压圈上的四个螺丝再拧紧些。

②调节限位柱G的高度可改变云室的膨胀比K,一般K值取1.23~1.26为宜。K过小则



不出现径迹， K 过大则会出现一片白雾。

③如上盖玻璃 1 的下表面附着露珠影响观察，应将螺栓 8 拧下，压几次杠杆将过多的蒸气排出一些。操作时要用纱布挡住孔 H，避免尘土吸入云室中。

④用毕将放射源放回铅罐或玻璃管中保藏。放射源不要接触手和其他物体，实验后要用热水肥皂洗手。

⑤J1205 型高压电源关断开关后，其输出端内部的电容器仍充有电荷，人同时触及其两极，会产生触电的感觉。可将两极导线短路几下使之放电。

2. 用计数器探测放射线

使用 J2554 型盖革计数器，它由计数管和仪器箱两部分组成。计数管型号 J305，为圆柱形，适于探测 γ 粒子和 β 粒子。用电缆线将它与仪器箱相连，所需的直流高压（340~420 V）由仪器箱内电源部分供给。当一个粒子射入计数管时会引起一次脉冲放电，这个脉冲由仪器箱内的放大电路放大后使扬声器发出一次声响。有的仪器还装有发光二极管，发出声响的同时发出一次闪光。

使用时先将计数管装到管座上（极性要正确），将电缆与仪器箱连好后再开启电源开关。这时即可听到扬声器发出“咯、咯”声，这是由宇宙线中的粒子引起的，一般不超过 30 次/分，叫做本底计数率。取 J2553 型威尔逊云室的放射源靠近计数管，则计数率明显增加，距离越近计数率越大。这个计数率减去本底计数率就是放射源的实际计数率。计数率反映了空间中某处的放射线强度，它和该处到放射源的距离平方成反比。在固定的条件下，听到的计数声间隔并不均匀，每分钟的计数率也非严格相等而呈现少许的涨落现象，这表明了放射性元素蜕变的随机性。使放射源距计数管约 10 cm，其间挡一块厚 2~3 mm 的铅板，计数率明显减小，再叠放几块铅板则计数率更小，显示出铅板对 γ 粒子的吸收作用。改用同样厚度的铜板对比，计数率减小不明显。仪器箱上还有经过放大后的脉冲输出插口，与 J0201 型数字计时器的输入端连接后能做数字显示计数。操作方法及注意事项见仪器说明书。

汽灯的纱罩内含有钍，钟表的夜光涂料中也含有放射性元素，可以作为放射源使用。

J305 型计数管的阴极是在玻璃管的内壁上涂覆一层导电物形成的。管内充的有机物的蒸气起猝灭作用，可防止由于阴极被打出光电子而形成持续的自激放电，保证一个放射线粒子只引起一次放电、输出一个脉冲。起猝灭作用时有机气体的分子将分解，因此这种计数管有一定的寿命，一般可放电 $(2\sim5)\times 10^8$ 次。

第 3 节中的“做一做”是用传感器测量放射性的实验，可以使用上海市中小学数字化实验系统研发中心和山东远大公司研制的数字化实验系统（DISLab）中的辐射传感器。

以上这些实验有助于破除学生对于射线的神秘感和恐惧感。

五、补充习题

A 组

1. 下列关于 α 、 β 、 γ 射线的叙述中，正确的是（ ）
 - A. α 、 β 、 γ 射线都是电磁波
 - B. α 射线由高速氦原子核组成
 - C. 高速运动的电子流就是 β 射线
 - D. γ 射线射入磁场时会发生偏转

2. 如果某放射性元素经过 x 次 α 衰变和 y 次 β 衰变, 变成一种新原子核, 则这个新原子核的质子数比放射性元素原子核的质子数减少 ()

- A. $2x+y$ B. $x+y$ C. $x-y$ D. $2x-y$

3. 关于放射性元素的半衰期, 下列说法中正确的是 ()

- A. 半衰期是原子核全部衰变所需时间的一半
B. 半衰期是原子核有半数发生衰变所需的时间
C. 半衰期是原子量减少一半所需的时间
D. 半衰期是元素质量减少一半所需的时间

4. 下列应用中, 属于将放射性同位素作为示踪原子的是 ()

- A. γ 射线探伤仪
B. 利用含有放射性碘 131 的油检测地下输油管道的漏油情况
C. 利用钴 60 治疗肿瘤等疾病
D. 把含有放射性元素的肥料施给农作物, 用以检测确定农作物吸收养分的规律

5. 假设氢核、中子、氦核的质量分别为 m_1 、 m_2 、 m_3 , 那么氢核与中子结合成氦核时放出的能量是 ()

- A. m_3c^2 B. $(m_1+m_2)c^2$
C. $(m_3-m_2-m_1)c^2$ D. $(m_1+m_2-m_3)c^2$

6. 一个质子与一个中子结合成一个氦核时释放 2.2 MeV 的能量, 两个中子与两个质子结合成一个氦核时, 释放 28.3 MeV 的能量。现在把两个中子与两个质子先结合成两个氦核, 再把两个氦核结合成一个氦核, 那么在整个过程中释放的能量为 ()

- A. 不知氦结合成氦核时释放的能量, 故无法判断
B. 23.9 MeV
C. 26.1 MeV
D. 28.3 MeV

7. 关于铀核裂变, 下列说法中正确的是 ()

- A. 铀核裂变的产物是多种多样的, 但只能裂变成两块
B. 铀核裂变时还能同时放出两个或三个中子
C. 为了使裂变的链式反应容易发生, 最好用纯铀 235
D. 铀块的体积对于产生链式反应无影响

8. 氦原子核由两个质子与两个中子组成, 两个质子之间存在着万有引力、库仑力和核力, 则这三种力从大到小的排列顺序是 ()

- A. 核力、万有引力、库仑力 B. 万有引力、库仑力、核力
C. 库仑力、核力、万有引力 D. 核力、库仑力、万有引力

9. 重核的裂变和轻核的聚变是人类利用原子能的两种主要方法, 以下关于它们的说法中正确的是 ()

- A. 裂变、聚变过程都有质量亏损
B. 裂变过程有质量亏损, 聚变过程质量有所增加
C. 裂变过程质量有所增加, 聚变过程质量有所亏损
D. 裂变、聚变过程质量都有所增加

10. 下列说法中正确的是 ()

- A. ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_2\text{He}$ 是 α 衰变方程
 B. ${}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$ 是核聚变反应方程
 C. ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$ 是核裂变反应方程
 D. ${}^4_2\text{He} + {}^{27}_{13}\text{Al} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0\text{n}$ 是原子核的人工转变方程

11. 中子与质子结合成氘核, 同时释放出 γ 光子, 核反应方程是 ${}^1_1\text{H} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^2_1\text{H} + \gamma$ 。下列说法中正确的是 ()

- A. 反应后氘核的质量一定小于反应前质子和中子的质量和
 B. 反应前后的质量数不变, 因而质量不变
 C. 核子结合成原子核时, 一定释放出核能
 D. γ 光子具有的能量为 Δmc^2 , Δm 为核反应中的质量亏损

B 组

1. 把铀矿石放在一只玻璃管内, 过几天在管内发现了氦气, 怎样解释这一现象?
 2. 铝箔被 α 粒子轰击后发生核反应 ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow \text{X} + {}^1_0\text{n}$ 。下列判断中正确的是 ()

- A. ${}^1_0\text{n}$ 是质子
 B. ${}^1_0\text{n}$ 是中子
 C. X 是 ${}^{30}_{15}\text{Si}$ 的同位素
 D. X 是 ${}^{31}_{13}\text{P}$ 的同位素

3. 一置于铅盒中的放射源发射的 α 、 β 和 γ 射线, 由铅盒的小孔射出, 在小孔外放一铝箔, 铝箔后的空间有一匀强电场。进入电场后, 射线变为 a、b 两束, 射线 a 沿原来方向行进, 射线 b 发生了偏转, 如图 19-3 所示。则图中的射线 a 为 _____ 射线, 射线 b 为 _____ 射线。

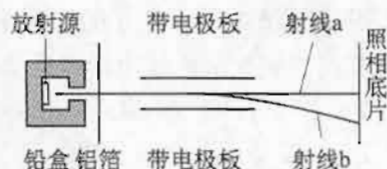


图 19-3

4. 一个氡核 ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ 衰变成钋核 ${}^{218}_{84}\text{Po}$ 并放出一个粒子, 其半衰期为 3.8 天。1 g 氡经过 7.6 天衰变掉氡的质量, 以及 ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ 衰变成 ${}^{218}_{84}\text{Po}$ 的过程放出的粒子是 ()

- A. 0.25 g, α 粒子
 B. 0.75 g, α 粒子
 C. 0.25 g, β 粒子
 D. 0.75 g, β 粒子

5. 中子和质子结合成氘核时, 质量亏损为 Δm , 相应的能量 $\Delta E = \Delta mc^2 = 2.2 \text{ MeV}$ 是氘核的结合能。下列说法中正确的是 ()

- A. 用能量小于 2.2 MeV 的光子照射静止氘核时, 氘核不能分解为一个质子和一个中子
 B. 用能量小于 2.2 MeV 的光子照射静止氘核时, 氘核可能分解为一个质子和一个中子
 C. 用能量小于 2.2 MeV 的光子照射静止氘核时, 氘核可能分解为一个质子和一个中子, 它们的动能之和为 0
 D. 用能量小于 2.2 MeV 的光子照射静止氘核时, 氘核可能分解为一个质子和一个中子, 它们的动能之和不为 0

6. 2006 年美国 and 俄罗斯科学家利用回旋加速器, 通过 ${}^{48}_{20}\text{Ca}$ (钙 48) 轰击 ${}^{249}_{98}\text{Cf}$ (锎 249) 发生核反应, 成功合成了第 118 号元素, 这是迄今为止门捷列夫元素周期表中原子序数最大的



元素。实验表明,该元素的原子核先放出3个相同的粒子x,再连续经过3次 α 衰变后,变成质量数为282的第112号元素的原子核,则上述过程中的粒子x是()

- A. 中子 B. 质子 C. 电子 D. α 粒子

7. 科学家发现在月球上含有丰富的 ${}^3_2\text{He}$ (氦3),它是一种高效、清洁、安全的核聚变燃料,其参与的一种核聚变反应的方程为 ${}^3_2\text{He}+{}^3_2\text{He}\rightarrow 2{}^1_1\text{H}+{}^4_2\text{He}$ 。关于 ${}^3_2\text{He}$ 聚变,下列表述中正确的是()

- A. 聚变反应不会释放能量 B. 聚变反应产生了新的原子核
C. 聚变反应没有质量亏损 D. 目前核电站都采用 ${}^3_2\text{He}$ 聚变反应发电

8. 在 β 衰变中常伴有一种称为中微子的粒子放出。中微子的性质十分特别,在实验中很难探测。1953年,莱尼斯和柯文建造了一个由大水槽和探测器组成的实验系统,利用中微子与水中 ${}^1_1\text{H}$ 的核反应,间接地证实了中微子的存在。

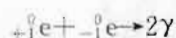
(1) 中微子与水中的 ${}^1_1\text{H}$ 发生核反应,产生中子(${}_0^1\text{n}$)和正电子(${}_{+1}^0\text{e}$),即



可以判定,中微子的质量数和电荷数分别是()

- A. 0和0 B. 0和1 C. 1和0 D. 1和1

(2) 上述核反应产生的正电子与水中的电子相遇形成几乎静止的整体后,可以转变为两个光子(γ),即



已知正电子和电子的质量都为 $9.1\times 10^{-31}\text{ kg}$,反应中产生的每个光子的能量约为_____J。正电子与电子相遇不可能只转变为一个光子,原因是_____。

(3) 试通过分析比较,具有相同动能的中子和电子的物质波波长的大小。

9. 历史上第一次利用加速器实现的核反应,是用加速后动能为0.5 MeV的质子 ${}^1_1\text{H}$ 轰击静止的X,生成两个动能均为8.9 MeV的 ${}^4_2\text{He}$ 。(1 MeV= $1.6\times 10^{-13}\text{ J}$)

(1) 上述核反应方程为_____。

(2) 质量亏损为_____kg。

10. 本题中用大写字母代表原子核。E经 α 衰变成为F,再经 β 衰变成为G,再经 α 衰变成为H。上述系列衰变可记为 $E\overset{\alpha}{\rightarrow}F\overset{\beta}{\rightarrow}G\overset{\alpha}{\rightarrow}H$,另一系列衰变 $P\overset{\beta}{\rightarrow}Q\overset{\beta}{\rightarrow}R\overset{\alpha}{\rightarrow}S$ 。已知P是F的同位素,则()

- A. Q是G的同位素,R是H的同位素
B. R是E的同位素,S是F的同位素
C. R是G的同位素,S是H的同位素
D. Q是E的同位素,R是F的同位素

11. 钚的放射性同位素 ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ 静止时衰变为铀核激发态 ${}^{235}_{92}\text{U}^*$ 和 α 粒子,而铀核激发态 ${}^{235}_{92}\text{U}^*$ 立即衰变为铀核 ${}^{235}_{92}\text{U}$,并放出能量为0.097 MeV的 γ 光子。已知 ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ 、 ${}^{235}_{92}\text{U}$ 和 α 粒子的质量分别为 $m_{\text{Pu}}=239.052\text{ 1 u}$ 、 $m_{\text{U}}=235.043\text{ 9 u}$ 和 $m_{\alpha}=4.002\text{ 6 u}$,1 u相当于931.5 MeV,请你:

(1) 写出衰变方程。

(2) 已知衰变放出的光子的动量可忽略,求 α 粒子的动能。



参考答案

A 组

1. B 2. D 3. B 4. B、D 5. D 6. D 7. B、C 8. D 9. A 10. B、D 11. A、C、D

B 组

1. 铀核发生 α 衰变, 生成氦气。 2. B、D 3. γ ; β 4. B 5. A 6. A 7. B8. (1) A (2) 8.19×10^{-14} 遵循动量守恒(3) $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}}$, 由于 $m_\alpha > m_e$, 所以 $\lambda_\alpha < \lambda_e$ 。9. (1) ${}_1^1\text{H} + {}_3^7\text{X} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_2^4\text{He}$ (或 ${}_1^1\text{H} + {}_3^7\text{Li} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_2^4\text{He}$) (2) $\Delta m = \frac{E}{c^2} = 3.1 \times 10^{-29} \text{ kg}$

10. B

11. (1) 衰变方程为 ${}_{94}^{239}\text{Pu} \rightarrow {}_{92}^{235}\text{U} + {}_2^4\text{He}$, ${}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{92}^{235}\text{U} + \gamma$, 合起来有 ${}_{94}^{239}\text{Pu} \rightarrow {}_{92}^{235}\text{U} + {}_2^4\text{He} + \gamma$ 。(2) 上述衰变过程的质量亏损为 $\Delta m = m_{\text{Pu}} - m_{\text{U}} - m_\alpha$, 放出的能量为 $\Delta E = c^2 \Delta m$ 。这能量是铀核 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 的动能 E_{U} 、 α 粒子的动能 E_α 和 γ 光子的能量 E_γ 之和 $\Delta E = E_{\text{U}} + E_\alpha + E_\gamma$ 。由此得到 $E_{\text{U}} + E_\alpha = (m_{\text{Pu}} - m_{\text{U}} - m_\alpha)c^2 - E_\gamma$ 。设衰变后的铀核和 α 粒子的速度分别为 v_{U} 和 v_α , 则由动量守恒有 $m_{\text{U}}v_{\text{U}} = m_\alpha v_\alpha$ 。又由动能的定义知 $E_{\text{U}} = \frac{1}{2}m_{\text{U}}v_{\text{U}}^2$, $E_\alpha = \frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2$, 可得 $\frac{E_{\text{U}}}{E_\alpha} = \frac{m_\alpha}{m_{\text{U}}}$ 。因此

$$E_\alpha = \frac{m_{\text{U}}}{m_{\text{U}} + m_\alpha} [(m_{\text{Pu}} - m_{\text{U}} - m_\alpha)c^2 - E_\gamma]$$

代入数据得 $E_\alpha = 5.034 \text{ MeV}$ 。

人教版®