# 第十一单元 波粒二象性

本单元主要由光电效应现象、光电效应方程、光子说、光的波粒二象性、电子的衍射现象、原子结构的量子力学模型、物质波的本质等内容组成.学生在必修 3 中初步学习了光是一种电磁波，光的能量是不连续的，初步了解了微观世界的量子化特征，在此基础上，通过本单元进一步学习光的粒子性以及实物粒子的波动性，形成物质具有波粒二象性的物质观念。

本单元课程内容学习建议安排 3.5 课时。

## 一、教学要点

### 1．单元内容结构

微观粒子的波粒二象性

光子说

物质波假说

电子的衍射现象

光电效应

光的波粒二象性

实物粒子的波粒二象性

量子力学

### 2．单元学习要求

本单元对应《2017 年版高中物理课标》选择性必修 3 的“波粒二象性”主题，下表中的“标引”与《2017 年版高中物理课标》【内容要求】下的序号一致，“内容”是根据【内容要求】提炼出的单元主要内容，“具体要求举例”是针对主要内容给出的表现性要求的示例。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 标引 | 内容 | 具体要求举例 |
| 3.4.1 | 光电效应现象 | **了解光电效应现象**。能阐述光电效应现象及其规律；能简述光电效应实验规律与经典理论之间的矛盾。 |
| 光电效应方程 | **知道光电效应方程**。能简述光子说的内容；能简述光电效应方程及其内涵；能运用光电效应方程解释光电效应的实验规律。 |
| 光的波粒二象性 | **光的波粒二象性**。能根据光电效应、康普顿效应的实验结论说明光的波粒二象性。 |
| 3.4.2 | 实物粒子的波动性 | **知道实物粒子具有波动性**。能列举电子的衍射现象等证据，说明实物粒子具有波动性。 |
| 量子化特征 | **了解微观世界的量子化特征**。能说出微观世界中光子能量量子化、原子核外运动电子的量子化能级等量子化特征。 |
| 量子论的影响 | **体会量子论的建立对人们认识物质世界的影响**。能列举量子论的建立对物理学研究的贡献；体会人类对认识自然的热情与追求，提升探索精神和社会责任感。 |

### 3．单元内容与核心素养

在本单元学习中，学生将对光电效应现象、光电效应方程、光子说、电子的衍射现象、物质波的本质等有所了解，形成与波粒二象性相关的物质观念、运动与相互作用观念和能量观念；通过分析光电效应实验规律与经典理论之间的矛盾，解释康普顿效应和电子的衍射现象，经历建立光子说和物质波假说的过程，感受科学推理、质疑创新、科学论证的研究过程和研究方法；通过经历光电效应现象的探究过程，培养提出问题、寻找证据、解释现象等科学探究能力；通过学习科学家探索光及微观粒子的历史，体会量子概念和量子论的建立对人类认识物质世界的影响，感受科学家实事求是的科学态度和追求真理的科学精神。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 核心内容 | 物理观念 | 科学思维 | 科学探究 | 科学态度与责任 |
| 11.1 | 光电效应现象 | ● | ● | ● | ◎ |
| 11.2 | 光电效应方程 | ◎ | ● | 〇 | 〇 |
| 11.3 | 光的波粒二象性 | ● | ◎ | 〇 | ◎ |
| 11.4 | 实物粒子的波动性 | ● | ◎ | 〇 | 〇 |
| 11.5 | 量子化特征 | ● | ◎ | 〇 | 〇 |
| 11.6 | 量子论的影响 | ◎ | 〇 | 〇 | ● |

## 二、单元实施

### 1．单元任务设计

本单元的任务设计思考路径是：在研读《2017 年版高中物理课标》的基础上，发掘出一个能引领整个单元学习的核心任务。本单元学习内容围绕微观粒子的性质展开，在光的波动性的基础上，通过光电效应实验引入对光的粒子性的研究，运用对称的思想引入实物粒子具有波动性的假说，并通过电子的衍射实验证实假说，得出一切微观粒子都具有波粒二象性的结论，体会微观世界的量子化特征。本单元的核心任务“探索微观粒子的本性”旨在让学生通过本单元学习认识到从光子到实物粒子都具有波粒二象性，它们在运动过程中表现出波动性，在与其他物体发生作用时表现出粒子性，使学生能够全面了解微观粒子的行为特点，形成与波粒二象性相关的物质观念、运动与相互作用观念和能量观念，了解科学家在探索自然过程中遇到的局限和突破，感受科学探索的价值和意义，激发责任感和使命感。在教学中核心任务还需要进一步分解，以利于逐步落实，具体的分解任务、相关的教学内容及课时安排详见下表。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 核心任务（问题）及其分解 | 教学内容 | 课时安排 |
| 探索微观粒子的本性 | 认识光的粒子性 | 光电效应现象及其规律、光子说、光电效应方程 | 1.5 |
| 认识微观粒子的波粒二象性 | 康普顿效应、电子的衍射现象，实物粒子的波动性 | 1 |
| 了解微观世界的量子化特征 | 量子化特征 | 1 |

### 2．重点活动设计

#### （1）单元活动

##### 活动名称 探索微观粒子的本性

**活动资源** 光电效应实验装置，与实验相关的文字、图片和视频资料。

**活动系列**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 对应课时 | 活动过程 | 活动说明 |
| 第一课时 | **实验探究**。利用光电效应实验装置研究光电效应所遵循的规律。**理论分析**。用光的电磁理论来解释光电效应，理解经典理论与实验规律之间的矛盾。 | 通过观察实验现象，培养学生的科学归纳能力。引导学生开展科学推理和论证，从矛盾之中体会光子说的重大意义。 |
| 第二课时 | **分析讨论**。利用光子逐个通过双缝后的干涉图样，进一步研究光子的运动。**观察分析**。观察电子被晶体衍射的图样，理解电子运动的波动性。 | 引导学生从实验现象中理解运动的光子和电子的波粒二象性，体会科学论证的方法。 |
| 第三课时 | **学习交流**。用量子力学的观点解释光子与电子的行为。 | 体会用量子力学解释微观粒子运动的普适性。 |

**设计意图** 本活动系列引导学生观察、分析、比较光子和电子这两种不同属性的粒子的运动特征，从光子易被观察到的波动性拓展到不易被观察到的粒子性，再从电子作为实物粒子易被观察到的粒子性联想到可能具有的波动性。跟随科学家探索微观粒子本性的脚步，学习从可靠的实验事实中获得证据，运用科学思维进行推理和论证，悟出规律，提出科学假说。通过比较和联想寻找光子与电子的共同点，调用以往所学的相关知识理解光子和电子共同的本质——波粒二象性，促进学生形成统一的物质观念、运动与相互作用观念和能量观念。

#### （2）课时活动

##### 活动 1 探究光电效应规律

**活动资源** 光电效应实验装置、光电管、电源、开关、滑动变阻器、电流传感器、电压传感器等。

**活动过程**

实验演示 开展演示实验，引导学生观察、思考。

① 用紫外光照射带负电的锌板，如图所示，请学生观察验电器指针偏转角度的变化。

② 换用白炽灯光、红外光照射带负电的锌板，请学生观察验电器指针偏转角度的变化。

分析交流 学生对现象进行分析并交流。

① 用紫外光照射锌板，验电器指针的偏转角度变小，说明有电子从锌板射出。

② 用可见光、红外光照射锌板，验电器指针的偏转角度不变，说明没有电子从锌板射出。

归纳总结 学生归纳、总结，得出结论，只有当入射光的频率高于一定频率时，锌板受到光照后才会射出电子。

光

K

A

V

μA

P

提出问题 按图连接电路，可以观察到光电管受到光照时会产生光电流，提出问题：光电流的大小与哪些因素有关？

猜想讨论 学生提出猜想并进行讨论，光电流大小肯定与入射光的频率有关，还可能与光电管两极之间的电压、入射光的强度有关。

实验探究 指导学生开展探究性实验。

① 通过移动滑动变阻器的滑片位置，来改变光电管两极之间的电压大小，记录光电流大小随电压变化的图线。

② 通过改变紫外线灯到光电管的距离来改变入射光的强度，记录光电流大小的变化情况。

③ 将电源的正负极对调，移动滑动变阻器的滑片位置，记录光电流大小随电压大小变化的图线。

得出结论 学生根据实验现象得出结论。

① 光电流随光电管两极之间电压的增大而增大，当光电流达到某一值后不再变化，此值称为饱和电流。

② 光电流随入射光强度的增大而增大。

③ 光电流随光电管两极之间反向电压的增大而减小，当反向电压增大到某一值时，光电流减小到 0，此时的反向电压值称为遏止电压。

**活动说明** 光电效应实验对实验器材和环境的要求较高，在课堂上直接做实验有难度，且可视性不强，教师可预先录制好（或在网上下载）相关的实验视频，确保学生能清晰地观察到实验现象，在“分析交流”环节教师可播放相应的画面来配合讲解和讨论。

**设计意图** 光电效应实验是学生认识光的粒子性的重要依据，虽然不是必做的学生实验，但是不失为培养学生科学探究能力的好案例。本课时活动设计可以让学生经历基于观察和实验提出物理问题、形成猜想和假设、基于证据得出结论等探究过程，可以说是一个内涵非常丰富的探究活动，教师可以从一系列实验中引导学生进行观察、分析、推理、论证，得出恰当的结论，使学生的科学思维能力得到锻炼和提升。通过活动，学生在感性体验的基础上对光电效应的实验规律建立了理性理解，虽然不能归纳出全部规律，但会对自己思维活动的成果留下深刻的印象，避免死记硬背实验结论。

##### 活动 2 探讨量子概念的建构对人类认识自然的影响

**活动资源** 与量子理论相关的文字、图片、视频等资料。

**活动过程**

收集资料 请学生收集有关量子理论的初步认识和量子力学的应用的资料。

合作学习 小组学习，分享收集的资料，交流各自关于量子理论对人类认识自然的影响的看法；分工协作将小组学习成果制作成 PPT。

交流展示 以小组为单位展示学习成果，主要包括：量子力学在解释原子结构方面取得的成功；量子力学在推动物理学发展和科学技术发展方面产生的影响。

**活动说明** 本课时活动需要学生在课外查阅一些与量子理论相关的资料，因量子概念所涉及的微观世界与学生的日常生活相关度较低，教师应提前布置相关任务，让学生有充裕的时间查找和阅读相关资料，开展小组合作学习，共同完成交流 PPT 的设计与制作。

**评价要点**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 评价内容 | 评价标准 | 表现水平 |
| 优秀 | 良好 | 一般 |
| 自主学习 | 各成员都收集了相关资料，完成了梳理归纳。 |  |  |  |
| 小组合作 | 成员间分享资料成果，共同准备展示材料。 |  |  |  |
| PPT制作 | 结构完整，内容详实，排版合理。 |  |  |  |
| 展示发言 | 发言者表达清晰，听众感觉有收获。 |  |  |  |
| 互动交流 | 能对本组同学发言进行适当补充，或对其他小组的交流展示提出问题和建议。 |  |  |  |
| 操作说明 | 前两项由本小组成员对照评价标准，根据符合程度进行自我评价；后三项由其他小组对照评价标准，根据符合程度进行互相评价，“优秀”表示完全符合，“良好”表示基本符合，“一般”表示不太符合。 |

**设计意图** 本课时活动通过小组间学习成果的交流展示，在促进学生围绕教学内容进行自主拓展和阅读学习的同时，培养学生之间合作分享、交流沟通、共同完成任务的精神和能力。在交流展示过程中教师应关注学生认识微观世界的态度，关注学生对探索自然的兴趣，引导学生客观地看待人类在认识自然过程中所作出的努力和取得的成绩，形成正确的物质观念和价值观念。

### 3．评价示例

本单元评价包括三个部分：一是日常课堂活动评价，可以选择本单元的重点活动进行评价，例如在“探讨量子概念的建构对人类认识自然的影响”活动中对学生课前查阅资料的情况、参与小组分工协作的情况、与同学进行互动交流的情况进行评价。二是日常作业评价，在学完本单元后，学生或教师根据作业的正确率、订正率等情况，完成本单元的日常作业评价。三是单元检测，教师根据学生在规定的时间内完成本单元检测的情况给出测试的成绩。“重点活动设计”已给出课堂活动评价的示例，以下给出部分课堂例题、课后作业及单元检测的示例，供教师参考使用。

*I*

*U*

*−* *U*c1

甲

乙

丙

*−* *U*c2

**示例 1** 在光电效应实验中，小明用甲、乙、丙三种不同的单色光照射同一光电管，得到了三条光电流与电压之间的关系曲线，如图所示。根据图线回答下面的问题，并说明理由。

（1）乙、丙两种光所对应的截止频率，哪个大？

（2）甲、丙两种光所产生光电子的最大初动能，哪个大？

（3）乙、丙两种光的波长，哪个长？

（4）甲、丙两种光入射到光电管的强度，哪个大？

**分析** 截止频率和逸出功由金属自身的性质决定，本示例采用同一个光电管，即光电管金属材料是确定的。遏止电压反映了电子逸出时的最大初动能，其关系为 *eU*c = *E*km。由上述结论并结合爱因斯坦光电效应方程 *E*km = *hν* − *W*。可分析入射光的波长大小。入射光强度越大，单位时间内产生的光电子越多。

**解答**

（1）乙、丙两种光所对应的截止频率相同，因为两种光照射的是同一光电管，金属材料相同。

（2）甲、丙两种光所产生光电子的最大初动能相同，因为它们的遏止电压相同。

（3）丙光的波长较长，因为乙光的遏止电压大于丙光，所以乙光的最大初动能、频率大于丙光，乙光的波长短于丙光。

（4）甲光入射到光电管的强度较大，因为甲、丙的遏止电压相同，所以它们的最大初动能相同，频率也相同，单个光子的能量也相同；又因为甲光的饱和电流值较大，所以单位时间内甲光射到光电管的光子数较多，即甲光的强度较大。

**属性表**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 内容 | 涉及的主要素养 | 质量水平分析 |
| 光电效应现象及其规律 | 科学思维中“科学推理” | 能对常见的物理问题进行分析，通过推理获得结论并作出解释。对应水平三。 |

**说明** 本示例建议在学习“光电效应现象及其规律”后作为课堂例题使用。本示例要求学生在理解遏止电压、截止频率、逸出功、最大初动能等物理概念的基础上，能从光电流与电压关系图像中获取相关信息，对光电效应现象作出解释，旨在考查学生运用图像解决问题的能力。

**示例 2** 如图所示，阴极材料由铝制成，已知铝的逸出功为 *W*0，现用波长为 *λ* 的光照射铝的表面，使之发生光电效应。已知电子电量的大小为 *e*，普朗克常量为 h，真空中光速为 *c*。

V

A

光束

窗口

A

直流电源

（1）求光电子的最大初动能。

（2）为了测定遏止电压，直流电源的哪端为正极？电压表示数至少为多大时电流表示数才为零？

（3）求铝的截止频率。

**分析** 根据爱因斯坦光电效应方程 *E*km = *hν* − *W*。可知光电子的最大初动能；遏止电压即反向电压，对光电子的运动起阻碍的作用，即电场方向应水平向左，使光电子受到水平向右的电场力，电场力对光电子做负功使光电子无法到达左侧极板，电流表示数为零；铝的截止频率是能使铝发射光电子的入射光的最低频率，对应的光子能量在数值上就等于铝的逸出功 *W*0，根据 *W*0 = *hν*。即可求得。

**解答**

（1）运用爱因斯坦光电效应方程 *E*km = *hν* − *W*。及波速公式 *c* = *λν* 可得光电子的最大初动能：

*E*km = *h* − *W*0

（2）为了测定遏止电压 *U*c，直流电源的右端应为正极；当电流表示数为零时，电场力做负功恰好使光电子无法到达对面极板，根据动能定理得：

*W*电 = Δ*E*k，即 – *eU*c = 0 – *E*km

综合可得：*U*c = *h* −

（3）根据关系式 *hν*0 = *W*0 可得：

*ν*0 =

**属性表**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 内容 | 涉及的主要素养 | 质量水平分析 |
| 光电效应方程 | 物理观念中“运动与相互作用观念”“能量观念” | 了解光电效应的规律和电荷在电场中运动的规律，能解决简单的实际问题。对应水平二。 |
| 科学思维中“科学推理” | 能运用光电效应方程和动能定理对简单的物理问题进行分析和推理，获得结论。对应水平二。 |

**说明** 本示例建议在学习“光电效应方程”后作为课后作业使用。本示例涉及光电效应实验情境的分析，使学生加深对遏止电压、截止频率、逸出功、光电子的最大初动能等概念的理解，进一步熟悉爱因斯坦光电效应方程、波速公式、动能定理等规律的运用。

**示例 3** 在日常生活中，我们不会注意到光是由光子构成的，这是因为普朗克常量很小，每个光子的能量很小，而我们所观察到的光学现象中涉及大量的光子。如果白炽灯消耗的电功率中有 15% 产生可见光，试估算 60 W 的白炽灯 1 s 内发出可见光光子的数量级。已知可见光波长的范围是 400 ~ 760 nm。

**分析** 白炽灯可以将电能转化为光能，光能是大量光子能量的总和，每个光子的能量是 *E* = *hν*，于是用光能除以每个光子的能量即可求得光子数。

**解答** 根据已知条件可知，60 W 的白炽灯在 1 s 内产生的可见光总能量为 *E* = *W* = *Pt* = 15%×60×1 J = 9 J，光子数 *N* = = = = 1.81×1019（光的波长也可以代入 7.6×10−7 m 进行计算，所得结果的数量级相同），所以 60 W 的白炽灯 1 s 内发出可见光光子的数量级是 1019。

**属性表**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 内容 | 涉及的主要素养 | 质量水平分析 |
| 光子说 | 物理观念中“物质观念”“能量观念” | 了解光子说的内容，能解决简单的实际问题。对应水平二。 |

**说明** 本示例建议在学习“光子说”后作为课后作业使用。本示例引导学生从日常所见的白炽灯发光的现象中，体会组成可见光的光子数的巨大，增强对光的粒子性的认识。

**示例 4** 有些荧光物质在紫外线照射下会发出可见光，例如大额钞票的荧光防伪标志就是这种情况。有同学据此推断出，荧光物质都不可能在红外线照射下发出可见光，你同意吗？说说你的理由。

**分析** 荧光的产生过程是：物质吸收光子后能量跃迁到较高能级，较高能级不稳定，向低能级跃迁，放出新的光子。这一过程中，向低能级跃迁时放出的能量不可能大于向高能级跃迁时吸收的能量，故所发出的荧光的频率要低于所吸收的光的频率。

**解答** 同意这个说法。因为可见光的频率高于红外线的频率，所以荧光物质不可能吸收低能量的红外线而释放出更高能量的可见光，这不符合能量守恒定律。

**属性表**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 内容 | 涉及的主要素养 | 质量水平分析 |
| 量子化特征 | 物理观念中“运动与相互作用观念”“能量观念” | 了解光与其他物质发生作用时的规律，能解释简单的生活现象。对应水平二。 |

**说明** 本示例建议在学习“量子化特征”后作为课堂例题使用。本示例来源于生活，学生虽然比较熟悉本示例所涉及的情境，但是不容易想到解答问题的角度，需要经过教师的引导才能正确运用相关知识进行分析和解释。

**示例 5** 一个质子的动能是 10 eV，如果有一个电子的德布罗意波长和这个质子的德布罗意波长相等，这个电子的动能是多少？（已知质子的质量 *m*μ = 1.67×10−27 kg，电子的质量是 *m*e = 0.91×10−30 kg）

**分析** 根据德布罗意关系式 *p* = 可知，电子和质子的波长相等，则动量相等；再根据动能 *E*k = *mv*2，动量 *p* = *mv*，代入相关数据即可求得电子的动能。

**解答** 根据 *p* = 、*p* = *mv* 和 *E*k = *mv*2 可得：

*E*k =

*E*ke = *E*kH = ×10 eV = 1.84×104 eV

**属性表**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 内容 | 涉及的主要素养 | 质量水平分析 |
| 实物粒子的波动性 | 物理观念中“物质观念”“能量观念” | 了解物质波、动量和动能关系，能解释简单的自然现象。对应水平二。 |

**说明** 本示例建议在学习“物质波”后作为课堂例题使用。本示例可使学生加深对德布罗意关系式的了解，同时让学生感受到，要使质量小的微观粒子获得一定的动量必须赋予其非常大的能量，因而质量小的微观粒子一般不会被用作轰击其他原子核的“炮弹”。

**示例 6** 做中子衍射实验应该采用快中子还是慢中子？请说明理由。

**分析** 我们做中子衍射实验时，一般是用一定速度的中子入射到晶体上使之产生衍射。为发生明显的衍射现象，中子的波长应和晶体中原子间距相近，一般晶体的原子间距为 10−10 m 的数量级，教科书给出的快中子能量为 MeV 数量级，对应的波长为 10−12 m 数量级。根据德布罗意关系式 *p* = 和 *p* = *mv*，粒子速度越小对应的波长越长。

**解答** 根据 *p* = 和 *p* = *mv* 可得 *λ* = ，所以做中子衍射实验应该采用速度较小的慢中子，其对应的物质波波长较长，衍射现象比较明显。

**属性表**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 内容 | 涉及的主要素养 | 质量水平分析 |
| 实物粒子的波动性 | 物理观念中“物质观念” | 了解物质波和动量关系，能解释简单的自然现象。对应水平二。 |

**说明** 本示例建议在学习“物质波”后作为课后作业使用。

**示例 7** 在某次光电效应实验中，得到的遏止电压 *U*c 与入射光的频率 *ν* 的关系如图所示。若该图线的斜率和纵轴截距分别为 *k* 和 *b*，电子电荷量的绝对值为 *e*，试用上述物理量表示普朗克常量和所用材料的逸出功大小。

*ν*

*U*c

*O*

**分析** 从图像的物理意义入手，找到遏止电压 *U*c 与入射光的频率 *ν* 之间的定量关系是解决问题的关键。根据爱因斯坦光电效应方程 *E*km = *hν* – *W*0，再由动能定理得到的关系式 *eU*c = *E*km，可推导得出上述物理量之间的关系，与图像信息进行比对即可得到答案。

**解答** 根据爱因斯坦光电效应方程 *E*km = *hν* – *W*0，动能定理 − *eU*c = 0 − *E*km，可得 *U*c = ，于是有 *k* = ，*b* = − ，则 *h* = *ek*，*W*0 = − *be*。

**属性表**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 内容 | 涉及的主要素养 | 质量水平分析 |
| 光电效应方程 | 科学思维中“科学推理” | 能对图像表达的物理规律进行分析和推理，获得结论。对应水平二。 |

**说明** 本示例建议在学习“光电效应方程”后作为单元检测使用，完成时间约 2 分钟。