**波粒二象性**

**一、光的电磁理论**

**1．光是一种电磁波**

⑴ 光具有波的特性，在同一介质中光速、波长和频率之间满足：。（请注意分清和这两个易混的字母）

⑵ 在可见光中，各色光频率的大小关系是：。

**2．介质对光速的影响**

⑴ 光在真空中的速度：。

⑵ 光在不同的介质中的速度

由可知，介质的折射率越大，光速越小。

⑶ 不同色光在同一介质中的速度

由三棱镜光的色散实验可知，同一介质对紫光的折射率最大，红光的最小。

再由得到，在同一介质中有：。

**二、光的粒子**

**1．光电效应**

如图所示，把一块锌板连接在验电器上，手触锌板使验电器指示归零。用紫外线照射锌板，发现验电器的指针张开。



物理学家赫兹（德国）、勒纳德（德国）、汤姆孙（英国）等相继进行了实验研究，证实了这样一个现象：照射到金属表面的光，能使金属表面的电子从表面逸出。这个现象称为光电效应，这种电子常被称为光电子。

⑴ 光电效应实验规律

① 任何一种金属，都有一个截止频率，也称极限频率。入射光的频率低于截止频率时不发生光电效应。

② 逸出光电子的动能只与入射光的频率有关，而与入射光的强弱无关。入射光的频率越大，逸出光电子的动能就越大。

③ 对于一定颜色的光（），入射光越强，单位时间内发射的光电子数越多。

④ 无论入射光（）怎样微弱，光电效应几乎是瞬时发生的。

⑵ 光电效应与经典电磁理论的冲突

① 按照光的电磁理论，光是电磁波，是变化的电场与变化的磁场的传播。入射光照射到金属上时，金属中的自由电子受变化电场的驱动力作用而做受迫振动，增大入射光的强度，光波的振幅增大，当电子做受迫振动的振幅足够大时，总可以挣脱金属束缚而逸出，成为光电子，不应存在极限频率。

② 按照光的电磁理论，光越强，光子的初动能应该越大。

③ 按照光的电磁理论，光电子的产生需要较长的时间而不是瞬间。

⑶ 光子说

① 在空间传播的光不是连续的，而是一份一份的，每一份叫做一个光子，光子的能量与光的频率成正比，即，其中普朗克常量。

② 光子说对光电效应的解释：

(a) 光子的能量只与光的频率有关，电子吸收到光子的频率越大，获得的能量也就越多。当能量足以使电子摆脱金属的束缚时，它就从金属表面逸出，成为光电子，因而存在一个截止频率。

(b) 根据能量守恒定律，逸出光电子的最大初动能：。

这就是著名的爱因斯坦光电效应方程，为金属的逸出功。

(c) 入射光越强，单位体积内的光子数就越多。光子数越多，单位时间内从金属表面逸出的光电子数也就越多。

(d) 电子一次性吸收光子的全部能量，不需要积累能量的时间，因此光电效应几乎是瞬时发生的。

**典例精讲**

**【例1.1】**（锦州期末）关于近代物理，下列叙述正确的是（　　）

A．卢瑟福通过对α粒子散射实验结果的分析，提出了原子核内有中子存在

B．光电效应揭示了光的粒子性，而康普顿效应从动量方面进一步揭示了光的粒子性

C．镭226变为氡222的半衰期是1620年，随着地球环境的不断变化，半衰期可能变短

D．结合能越大表示原子核中的核子结合得越牢固

**【例1.2】**（潮州期末）某单色光照射金属表面时，没有发生光电效应，欲使该金属发生光电效应，应该选择（　　）

A．增加照射时间

B．改用波长更长单色光照射

C．增大该单色光的强度

D．改用频率更高的单色光照射

**【例1.3】**（沈河区校级四模）下列说法正确的是（　　）

A．电子的发现使人们认识到原子核是可分的

B．天然放射现象使人们认识到原子是可分的

C．卢瑟福猜想原子核内存在中子，他的学生查德威克通过实验证实了这个猜想

D．光电效应中从金属表面逸出的光电子是从原子核中出射的

**2．康普顿效应**

⑴ 光的散射

光在介质中与物质微粒相互作用，因而传播方向发生改变，这种现象叫做光的散射。

⑵ 康普顿效应

1918~1922年，美国物理学家康普顿在研究石墨对X射线的散射时，发现在散射的X射线中，除了与入射波长相同的成分外，还有波长大于的成分，这个现象叫做康普顿效应。

康普顿的学生，中国留学生吴有训测试了多种物质对X射线的散射，证实了康普顿效应的普遍性。

⑶ 康普顿效应与经典电磁理论的冲突

按照经典电磁理论，由于光是电磁振动的传播，入射光引起物质内部带电微粒的受迫振动，振动着的带电微粒从入射光吸收能量，并向四周辐射，这就是散射光。散射光的频率应该等于带电粒子受迫振动的频率，也就是入射光的频率，因而散射光的波长与入射光的波长应该相同，不会出现的散射光。经典理论与实验事实又一次出现矛盾。

⑷ 光子模型对康普顿效应的解释

康普顿用光子的模型成功地解释了这种效应。基本思想是：X射线的光子不仅具有能量，也像其他粒子那样具有动量，X射线的光子与晶体中的电子碰撞时要遵守能量守恒和动量守恒定律，求解这些方程，可以得出散射光波长的变化值。理论结果与实验符合得很好。

⑸ 光子的动量：

**典例精讲**

**【例2.1】**（桥东区校级月考）美国物理学家康普顿在研究石墨对X射线的散射时，用X光对静止的电子进行照射，照射后电子获得速度的同时，X光的运动方向也会发生相应的改变。下图是X射线的散射示意图，下列说法中正确的是（　　）



A．在康普顿效应中，当入射光子与晶体中的电子碰撞时，把部分动量转移给电子，因此光子散射后频率变大

B．康普顿效应揭示了光的粒子性，表明光子除了具有能量之外还具有动量

C．X光散射后与散射前相比，速度将会变小

D．散射后的光子虽然改变原来的运动方向，但频率保持不变

**【例2.2】**（广南县校级月考）1922年，美国物理学家康普顿在研究石墨中的电子对X射线的散射时发现，有些散射波的波长比入射波的波长略大。下列说法中正确的是（　　）

A．有些X射线的能量传给了电子，因此X射线的能量减小了

B．有些X射线吸收了电子的能量，因此X射线的能量增大了

C．X射线的光子与电子碰撞时，动量守恒，能量也守恒

D．X射线的光子与电子碰撞时，动量不守恒，能量守恒

**【例2.3】**（海淀区模拟）康普顿效应证实了光子不仅具有能量，也有动量，如图给出了光子与静止电子碰撞后，电子的运动方向，则碰后光子可能沿方向　　运动，并且波长　　（填“不变”“变小”或“变长”）。



**三、波粒二象**

**1．光的波粒二象性**

光的干涉、衍射、偏振现象和光的电磁理论，证明光具有波动性；光电效应现象和光子说证明光具有粒子性。无法用其中的一种性质解释所有光现象，所以认定光既有粒子性，又有波动性，即具有波粒二象性。

当研究个别光子的行为时，呈现的是粒子性；当研究大量光子的连续行为时，呈现的是波动性。光的波长越长，其波动性越显著，光的波长越短，其粒子性越显著。

**典例精讲**

**【例1.1】**（台州模拟）居室装修中常用的大理石等天然石材，若含有铀、钍等元素就会释放出放射性气体氡。氡会经呼吸进入人体并停留于在体内发生衰变，放射出α、β、γ射线。这些射线会导致细胞发生变异，引起疾病。下列相关说法正确的是（　　）

A．放射性元素发生衰变时放出的α射线具有波粒二象性

B．铀$\_{92}^{238}$U衰变为氧$\_{86}^{222}$Rn要经过4次α衰变和2次β衰变

C．放射性元素发生β衰变时所释放的电子是原子核内的质子转变为中子时产生的

D．处于激发态的氧原子发出的某一单色光照射到某金属表面能发生光电效应，若这束光通过玻璃砖折射后，再射到此金属表面将不会再产生光电效应

**【例1.2】**（沙坪坝区校级月考）2018年8月23日报道，国家大科学工程﹣﹣中国散裂中子源（CSNS）项目通过国家验收，投入正式运行，并将对国内外各领域的用户开放。有关中子的研究，下面说法正确的是（　　）

A．中子和其他微观粒子，都具有波粒二象性

B．卢瑟福发现中子的核反应方程$\_{4}^{9}Be+\_{2}^{4}He\rightarrow \_{6}^{12}C+\_{0}^{1}n$

C．$\_{92}^{235}U$在中子轰击下生成$\_{38}^{94}St和\_{54}^{140}Xe$的过程中，原子核中平均核子质量变小

D．β衰变所释放的电子是原子核内部的中子转变为质子时所产生的

**【例1.3】**（应县校级期中）通过学习波粒二象性的内容，你认为下列说法正确的是（　　）

A．能量较大的光子其波动性越显著

B．速度相同的质子和电子相比，质子的波动性更为明显

C．波粒二象性指光有时表现为波动性，有时表现为粒子性

D．康普顿效应中光子与静止的电子发生相互作用后，光子的波长变小了

**2．粒子的波动性**

德布罗意考虑到普朗克量子理论和爱因斯坦光子理论的成功，大胆把光的波粒二象性推广到实物粒子，如电子、质子等。他提出假设：实物粒子也具有波动性。

这种与实物粒子相联系的波后来称为德布罗意波，也叫做物质波。

1927年戴维孙和汤姆孙分别利用晶体做了电子束衍射的实验，证实了电子的波动性。

说明：这部分内容深入讲解的话涉及量子力学的知识，高考也极少考察，因此老师根据课堂实际情况简单说明即可。

**随堂练习**

**一．选择题（共10小题）**

1．（明光市校级月考）研究光电效应实验电路图如图所示，其光电流与电压的关如图所示。则下列说法中正确的是（　　）



A．若把滑动变阻器的滑动触头向右滑动，光电流一定减小

B．图线甲与乙是同一种入射光，且甲的入射光强度等于乙光的

C．由图可知，乙光的频率小于丙光频率

D．若将甲光换成丙光来照射锌板，其逸出功将变大

2．（甘井子区校级模拟）下列说法正确的是（　　）

A．一束光照射到某种金属上不能发生光电效应，可能是因为这束光的光强太小

B．按照玻尔理论，氢原子核外电子从半径较小的轨道跃迁到半径较大的轨道时，电子的动能减小，但原子的能量增大

C．原子核发生一次β衰变，该原子外层就失去一个电子

D．天然放射现象中发出的三种射线是从原子核外放出的射线

3．（辽宁模拟）下列各种关于近代物理学的现象中，与原子核内部变化有关的是（　　）

A．紫外线照射锌板时，锌板向外发射光电子的现象

B．a粒子轰击金箔时，少数发生大角度偏转的现象

C．氢原子发光时，形成不连续的线状光谱的现象

D．含铀的矿物质自发向外放出β射线（高速电子流）的现象

4．（海淀区二模）如图所示，把一块不带电的锌板用导线连接在验电器上，当用某频率的紫外线照射锌板时，发现验电器指针偏转一定角度，下列说法正确的是（　　）



A．验电器带正电，锌板带负电

B．验电器带负电，锌板也带负电

C．若改用红光照射锌板，验电器的指针一定也会偏转

D．若改用同等强度频率更高的紫外线照射锌板，验电器的指针也会偏转

5．（茶陵县校级月考）关于近代物理发展的成果，下列说法正确的是（　　）

A．只要增加人射光的强度，光电效应就可以发生

B．若使放射性物质的温度升高，则其半衰期将减小

C．氢原子从激发态向基态跃迁时会辐射特定频率的光子

D．α射线、β射线、γ射线都是高速电子流

6．（思明区校级月考）用一束紫外线照射某金属时不能产生光电效应，可能使该金属发生光电效应的措施是（　　）

A．改用频率更小的紫外线照射

B．改用X射线照射

C．改用强度更大的原紫外线照射

D．延长原紫外线的照射时间

7．（周口期中）关于光电效应，下列说法正确的是（　　）

A．金属的逸出功与入射光的频率有关

B．金属的截止频率与金属的逸出功无关

C．入射光的波长越长，光电子的最大初动能越大

D．红光照到某金属上能发生光电效应，则绿光照到这种金属一定能发生光电效应

8．（上饶期中）物理学是一门以实验为基础的科学，任何学说和理论的建立都离不开实验，下列说法错误的是（　　）

A．𝛼粒子散射实验是原子核式结构理论的实验基础

B．康普顿效应进一步证实了光的波动特性

C．光电效应实验表明光具有粒子性

D．电子的发现揭示了原子不是构成物质的最小微粒

9．（四川模拟）下列说法正确的是（　　）

A．光电效应现象揭示了光具有波动性

B．$\_{1}^{2}$H$+\_{1}^{3}$H→$\_{2}^{4}$He$+\_{0}^{1}$n是核聚变反应方程

C．$\_{92}^{235}$U$+\_{0}^{1}$n→$\_{56}^{144}$Ba$+\_{36}^{89}$Kr+3$\_{0}^{1}$n是β衰变方程

D．一群氢原子从n＝5的激发态跃迁时，最多能辐射出4种不同频率的光子

10．（湖北模拟）2018年11月29日，国家重大科研装备研制项目“超分辨光刻装备研制”通过验收，该光刻机光刻分辨力达到22nm。关于光的认识，下列说法正确的是（　　）

A．光子除了具有能量之外还具有动量

B．波长越长的光，光子动量越大

C．光电效应显示了光的波动性

D．爱因斯坦测量了光电效应中几个重要的物理量，由此算出了普朗克常量h

**二．多选题（共3小题）**

11．（邯郸二模）下列说法中正确的是（　　）

A．α射线、β射线、γ射线三种射线中，γ射线穿透能力最强

B．随着温度的升高，黑体辐射强度的极大值向波长较短方向移动

C．实验表明，只要照射光的强度足够大，就一定能产生光电效应

D．汤姆孙对阴极射线的研究，认为阴极射线的本质是电子流

E．玻尔理论认为，原子核外电子从半径较小的轨道跃迁到半径较大的轨道时，电子的动能增大，电势能减小

12．（甘井子区模拟）下列说法正确的是（　　）（填序号）

A．卢瑟福通过对α粒子散射实验现象的研究，提出了原子的核式结构学说

B．同一元素的两种同位素具有相同的中子数

C．放射性元素的半衰期是指大量该元素的原子核中有半数发生衰变需要的时间

D．为解释光电效应现象，爱因斯坦提出了光子说

E．根据玻尔理论可知，氢原子放出一个光子后，氢原子的核外电子运动速度减小

F．氘核（$\_{1}^{2}H$）和氚核（$\_{1}^{3}H$）聚合成氦核（$\_{2}^{4}He$），同时会放出一个正电子和核能

13．（中原区校级月考）下列说法正确的是（　　）

A．在光的单缝衍射现象中，单缝越窄，中央条纹的宽度越窄

B．在光导纤维内传送图象和海市蜃楼现象都是光的全反射

C．光的干涉和衍射现象说明光具有波动性，光的偏振现象说明光是横波

D．光电效应既显示了光的粒子性，又显示了光的波动性，所以光具有波粒二象性

E．光学镜头上的增透膜是利用了光的干涉现象

**三．计算题（共2小题）**

14．（大名县校级月考）如图所示，阴极K用极限波长λ0＝0.66μm的金属铯制成，用波长λ＝0.50μm的绿光照射阴极K，调整两极板电压，当A板电压比阴极高处2.5V时，光电流达到饱和，电流表示数为0.64μA．

（1）求每秒阴极发射的电子数和电子飞出阴极时的最大初动能；

（2）如果把照射到阴极的绿光光照强度增大为原来的2倍，求每秒钟阴极发射的电子数和电子飞出阴极时的最大初动能．



15．（大兴区一模）我们知道，根据光的粒子性，光的能量是不连续的，而是一份一份的，每一份叫一个光子，光子具有动量（ hv/c ） 和能量（hv ），当光子撞击到光滑的平面上时，可以像从墙上反弹回来的乒乓球一样改变运动方向，并给撞击物体以相应的作用力。光对被照射物体单位面积上所施加的压力叫光压。联想到人类很早就会制造并广泛使用的风帆，能否做出利用太阳光光压的“太阳帆”进行宇宙航行呢？

1924年，俄国航天事业的先驱齐奥尔科夫斯基和其同事灿德尔明确提出“用照射到很薄的巨大反射镜上的太阳光所产生的推力获得宇宙速度”，首次提出了太阳帆的设想。但太阳光压很小，太阳光在地球附近的光压大约为10﹣6N/m2，但在微重力的太空，通过增大太阳帆面积，长达数月的持续加速，使得太阳帆可以达到甚至超过宇宙速度。IKAROS 是世界第一个成功在行星际空间运行的太阳帆。2010年5月21日发射，2010年12月8日，IKAROS 在距离金星 80，800 公里处飞行掠过，并进入延伸任务阶段。

设太阳单位时间内向各个方向辐射的总能量为E，太空中某太阳帆面积为S，某时刻距太阳距离为r（r很大，故太阳光可视为平行光，太阳帆位置的变化可以忽略），且帆面和太阳光传播方向垂直，太阳光频率为v，真空中光速为c，普朗克常量为h。

（1）当一个太阳光子被帆面完全反射时，求光子动量的变化△P，判断光子对太阳帆面作用力的方向。

（2）计算单位时间内到达该航天器太阳帆面的光子数。

（3）事实上，到达太阳帆表面的光子一部分被反射，其余部分被吸收。被反射的光子数与入射光子总数的比，称为反射系数。若太阳帆的反射系数为ρ，求该时刻太阳光对太阳帆的作用力。

**四．解答题（共2小题）**

16．（海淀区二模）光电效应现象逸出的光电子的最大初动能不容易直接测量，也可以利用类似的转换的方法．

（1）如图1是研究某光电管发生光电效应的电路图，当用频率为ν的光照射金属K时，通过调节光电管两端电压U，测量对应的光电流强度I，绘制了如图2的I﹣U图象．求当用频率为2ν的光照射金属K时，光电子的最大初动能Ek的大小．已知电子所带电荷量为e，图象中Uc、Im及普朗克常量h均为已知量．

（2）有研究者设计了如下的测量光电子最大初动能的方式．研究装置如图3，真空中放置的平行正对金属板可以作为光电转换装置．用一定频率的激光照射A板中心O点，O点附近将有大量的电子吸收光子的能量而逸出．B板上涂有特殊材料，当电子打在B板上时会在落点处留有可观察的痕迹．可以认为所有逸出的电子都从O点以相同大小的速度逸出，其初速度沿各个方向均匀分布，金属板的正对面积足够大（保证所有的光电子都不会射出两极板所围的区域），光照条件保持不变．已知A、B两极板间的距离为d，电子所带电荷量为e，质量为m，其所受重力及它们之间的相互作用力均可忽略不计．

①通过外接可调稳压电源使A、B两极板有一定的电势差，A板接电源的负极，由O点逸出的电子打在B板上的最大区域范围为一个圆形，且圆形的面积随A、B两极板间的电压变化而改变．已知电子逸出时的速度大小为v0，试通过计算，推导电子打在B板上的最大范围圆形半径r与两极板间电压U的关系式．

②通过外接电源给A、B两极板间加上一定的电压U0，若第一次A板接电源的负极，电子打在B板上的最大区域为一个圆形；第二次A板接电源的正极，保持极板间所加电压U0不变，电子打在B板上的最大区域范围仍为一个圆形，只是这个圆形半径恰好是第一次的一半．为使B板上没有电子落点的痕迹，则两金属板间的电压满足什么条件？



17．（江西一模）已知每秒从太阳射到地球的垂直于太阳光的每平方米截面上的辐射能为1.4×103J，其中可见光部分约占45%，假如认为可见光的波长均为5.5×10﹣7m，太阳向各方向的辐射是均匀的，日地间距离为1.5×1011m，普朗克恒量h＝6.6×10﹣34J•s，估算出太阳每秒钟辐射出的可见光子数是多少？