

# 光电效应

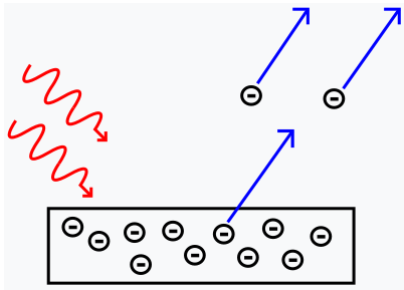
维基百科，自由的百科全书

**光电效应**（英语：**Photoelectric Effect**）是指**光束**照射物体时会使其发射出**电子**的物理效应。发射出来的电子称为“**光电子**”。<sup>[1]:1060-1063</sup><sup>[2]:1240-1246</sup>

1887年， 德国物理学者**海因里希·赫兹**发现， 紫外线照射到金属电极上，可以帮助产生**电火花**。<sup>[3]</sup>1905年， 阿尔伯特·爱因斯坦发表论文《关于光产生和转变的一个启发性观点》，给出了光电效应实验数据的理论解释。爱因斯坦主张，光的能量并非均匀分布，而是负载于离散的光量子（光子），而这光子的能量和其所组成的光的频率有关。这个突破性的理论不但能够解释光电效应，也推动了量子力学的诞生。由于“他对理论物理学的成就，特别是光电效应定律的发现”，爱因斯坦获颁1921年 诺贝尔物理学奖。<sup>[4]</sup>

在研究光电效应的过程中，物理学者对光子的量子性质有了更加深入的了解，这对波粒二象性概念的提出有重大影响。<sup>[2]:1240-1246</sup>除了光电效应以外，在其它现象里，光子束也会影响电子的运动，包括光电导效应、光伏效应、光电化学效应（photoelectrochemical effect）。

根据波粒二象性，光电效应也可以用波动概念来分析，完全不需用到光子概念。 威利斯·兰姆与 马兰·斯考立（Marlan Scully）于1969年使用半经典方法证明光电效应，这方法将电子的行为量子化，又将光视为纯粹经典电磁波，完全不考虑光是由光子组成的概念。<sup>[5]</sup><sup>[6]:27-28</sup>



光电效应示意图：来自左上方的光子冲击到金属板，将电子逐出金属板，并且向右上方移去。

目录
理论概述
历史
十九世纪
二十世纪
实验结果分析
截止电压
最大动能
极限频率
几乎瞬时发射
偏振方向
实际应用
光电倍增管
金箔验电器
光电子能谱学
航天器
月球尘
夜视仪
截面
参见
注释
参考文献
外部链接

理论概述

光束里的光子所拥有的能量与光的频率成正比。假若金属里的电子吸收了一个光子的能量，而这能量大于或等于某个与金属相关的能量阈值（称为这种金属的逸出功），则此电子因为拥有了足够的能量，会从金属中逃逸出来，成为光电子；<sup>[注 1]</sup>若能量不足，则电子会释出能量，能量重新成为光子离开，电子能量恢复到吸收之前，无法逃逸离开金属。增加光束的辐照度（光束的强度）会增加光束里光子的密度，在同一段时间内激发更多的电子，但不会使得每一个受激发的电子因吸收更多的光子而获得更多的能量。换言之，光电子的能量与辐照度无关，只与光子的能量、频率有关。

被光束照射到的电子会吸收光子的能量，但是其中机制遵照的是一种非全有即全无的判据，光子所有能量都必须被吸收，用来克服逸出功，否则这能量会被释出。假若电子所吸收的能量能够克服逸出功，并且还有剩余能量，则这剩余能量会成为电子在被发射后的动能。<sup>[1]:1060-1063</sup>

逸出功 ***W*** 是从金属表面发射出一个光电子所需要的最小能量。如果转换到频率的角度来看，光子的频率必须大于金属特征的极限频率，才能给予电子足够的能量克服逸出功。逸出功与极限频率 ***ν*<sub>0</sub>** 之间的关系为

$$W = h\nu_0 \text{ ；}$$

其中，***h*** 是普朗克常数，***hν*<sub>0</sub>** 是光频率为 ***ν*<sub>0</sub>** 的光子的能量。

克服逸出功之后，光电子的最大动能 ***K*<sub>max</sub>** 为

$$K_{\max} = h\nu - W = h(\nu - \nu_0) \text{ ；}$$

其中，***hν*** 是光频率为 ***ν*** 的光子所带有并且被电子吸收的能量。

实际物理要求动能必须是正值，因此，光频率必须大于或等于极限频率，光电效应才能发生。<sup>[7]:18-21</sup><sup>[8]</sup>

## 历史

光电效应首先由德国物理学家海因里希·赫兹于1887年发现，对发展量子理论及提出波粒二象性的设想起到了根本性的作用。菲利普·莱纳德用实验发现了光电效应的重要规律。阿尔伯特·爱因斯坦则提出了正确的理论机制。

## 十九世纪

1839年，年仅19岁的亚历山大·贝克勒尔（Alexandre Becquerel），在协助父亲研究将光波照射到电解池所产生的效应时，发现了光生伏打效应。<sup>[9]</sup>虽然这不是光学效应，但对于揭示物质的电性质与光波之间的密切关系有很大的作用。威勒毕·史密斯（Willoughby Smith）于1873年在进行与水下电缆相关的一项任务，测试硒圆柱高电阻性质时，发现其具有光电导性，即照射光束于硒圆柱会促使其电导增加。<sup>[10]</sup>

1887年，德国物理学者海因里希·赫兹做实验观察到光电效应、电磁波的发射与接收。在赫兹的发射器里有一个火花间隙（spark gap），可以借着制造火花来生成与发射电磁波。在接收器里有一个线圈与一个火花间隙，每当线圈侦测到电磁波，火花间隙就会出现火花。由于火花不很明亮，为了更容易观察到火花，他将整个接收器置入一个不透明的盒子内。他注意到最大火花长度因此减小。为了厘清原因，他将盒子一部分一部分拆掉，发现位于接收器火花与发射器火花之间的不透明板造成了这屏蔽现象。假若改用玻璃来分隔，也会造成这屏蔽现象，而石英则不会。经过用石英棱镜按照波长将光波分解，仔细

分析每个波长的光波所表现出的屏蔽行为，他发现是紫外线造成了光电效应。赫兹将这些实验结果发表于《物理年鉴》，他没有对该效应做进一步的研究。<sup>[11]</sup>



海因里希·赫兹

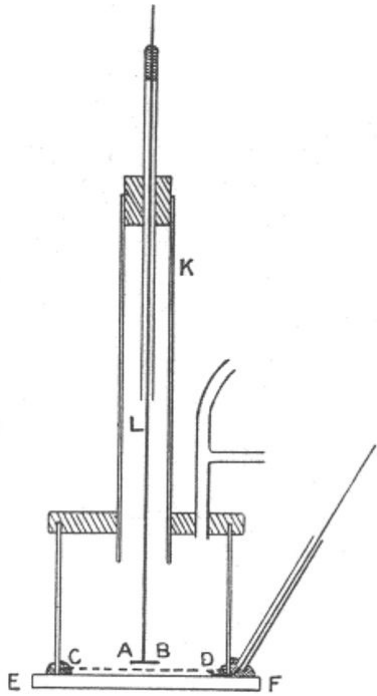
紫外线入射于火花间隙会帮助产生火花，这个发现立刻引起了物理学者们的好奇心，其中包括威廉·霍尔伐克士（Wilhelm Hallwachs）、<sup>[12]</sup>奥古斯图·里吉（Augusto Righi）、<sup>[13]</sup>亚历山大·史托勒托夫（Aleksandr Stoletov）等等。<sup>[14]</sup>他们进行了一系列关于光波对于带电物体所产生效应的研究调查，特别是紫外线。这些研究调查证实，刚刚清洁干净的锌金属表面，假若带有负电荷，不论数量有多少，当被紫外线照射时，会快速地失去这负电荷；假若电中性的锌金属被紫外线照射，则会很快地变为带有正电荷，而电子会逃逸到金属周围的气体中，假若吹拂强风于金属，则可以大幅度增加带有的正电荷数量。<sup>[15]:61ff</sup>

约翰·艾斯特（Johann elster）和汉斯·盖特尔（Hans Geitel），首先发展出第一个实用的光电真空管，能够用来量度辐照度。<sup>[16]:458</sup><sup>[17]</sup>艾斯特和盖特尔将其用于研究光波照射到带电物体产生的效应，获得了巨大成果。他们将各种金属依光电效应放电能力从大到小顺序排列：铷、钾、钠钾合金、钠、锂、镁、铊、铟。对于铜、铂、铅、铁、镉、碳、汞，普通光波造成的光电效应很小，无法测量到任何效应。上述金属排列顺序与亚历山德罗·伏打的电化学排列相同，越具正电性的金属给出的光电效应越大。<sup>[15]:63</sup>

当时研究“赫兹效应”的各种实验还伴随着“光电疲劳”的现象，让研究变得更加复杂。光电疲劳指的是从干净金属表面观察到的光电效应逐渐衰微的现象。根据霍尔伐克士的研究结果，在这现象里，臭氧扮演了很重要的角色。可是，其它因素，例如氧化、湿度、抛光模式等等，都必须纳入考量。<sup>[18]:239</sup>

1888至1891年间，史托勒托夫完成了很多关于光电效应的实验与分析。他设计出一套实验装置，特别适合于定量分析光电效应。借助此实验装置，他发现了辐照度与感应光电流的直接比例。另外，史托勒托夫和里吉还共同研究了光电流与气压之间的关系，他们发现气压越低，光电流变越大，直到最优气压为止；低于这最优气压，则气压越低，光电流变越小。<sup>[15]:68, 70</sup>

约瑟夫·汤姆孙于1897年4月30日在大不列颠皇家研究院（Royal Institution of Great Britain）的演讲中表示，通过观察在克鲁克斯管里的阴极射线所造成的萤光辐照度，他发现阴极射线在空气中透射的能力远超一般原子尺寸的粒子。<sup>[注 3]</sup>，因此，他主张阴极射线是由



汤姆孙量度粒子荷质比的光电效应实验装置。<sup>[注 2]</sup>

带负电荷的粒子组成，后来称为电子。<sup>[19]:404-405</sup>此后不久，通过观察阴极射线因电场与磁场作用而产生的偏转，他测得了阴极射线粒子的荷质比。1899年，他用紫外线照射锌金属，又测得发射粒子的荷质比 ***e*/*m*** 为 $7.3\times 10^6\text{emu/g}$ ，与先前实验中测得的阴极射线粒子的数值 $7.8\times 10^6\text{emu/g}$ 大致符合。他因此正确推断这两种粒子是同一种粒子，即电子。<sup>[20][21]:184-185[22]:28</sup>他还测出这粒子所载有的负电荷 ***e***。从这两个数据，他成功计算出了电子的质量：大约是氢离子质量的千分之一。电子是当时所知质量最小的粒子。<sup>[21]:189</sup>

## 二十世纪

菲利普·莱纳德于1900年发现紫外线会促使气体发生电离作用。由于这效应广泛发生于好几公分宽区域的空气，并且制造出很多大颗的正离子与小颗的负离子，这现象很自然地被诠释为光电效应发生于在气体中的固体粒子或液体粒子，汤姆孙就是如此诠释这现象。<sup>[18]</sup>1902年，莱纳德又发布了几个关于光电效应的重要实验结果。第一，借着变化紫外光源与阴极之间的距离，他发现，从阴极发射的光电子数量每单位时间与入射的辐照度成正比。第二，使用不同的物质为阴极材料，可以显示出，每一种物质所发射出的光电子都有其特定的最大动能（最大速度），换句话说，光电子的最大动能与光波的光谱组成有关。<sup>[注 4]</sup>第三，借着调整阴极与阳极之间的电压差，他观察到，光电子的最大动能与截止电压成正比，与辐照度无关。<sup>[21]:212-220</sup>



匈牙利物理学家菲利普·莱纳德

由于光电子的最大速度与辐照度无关，莱纳德认为，光波并没有给予这些电子任何能量，这些电子本来就已拥有这能量，光波扮演的角色好似触发器，一触即发地选择与释出束缚于原子里的电子，这就是莱纳德著名的“触发假说”（triggering hypothesis）。<sup>[23]:74-75</sup>在那时期，学术界广泛接受触发假说为光电效应的机制。可是，这假说遭遇到一些严峻问题，例如，假若电子本来在原子里就已拥有了逃逸束缚与发射之后的动能，那么，将阴极加热应该会给予更大的动能，但是物理学者做实验并没有测量到任何不同结果。<sup>[24]</sup>

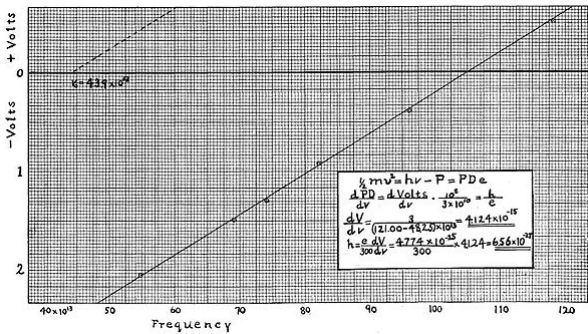
1905年，爱因斯坦在论文《关于光的产生和转变的一个启发性观点》里，重新解释光电效应，他提出光量子假设，光束是由一群离散的能量粒子组成，称为光量子，而不是连续性波动。这光量子后来简称为光子。对于马克斯·普朗克先前在研究黑体辐射中所发现的普朗克关系式，爱因斯坦给出另一种诠释：频率为 ***ν*** 的光量子拥有的能量为 ***hν***；其中，***h*** 因子是普朗克常数。<sup>[注 5][25]</sup>爱因斯坦认为，组成光束的每一个光量子所拥有的能量等于频率乘以普朗克常数。假若光量子的频率大于某极限频率，则这光子拥有足够能量来使得一个电子逃逸（称为光电子），造成光电效应。爱因斯坦的论述解释了为什么光电子的能量只与频率有关，而与辐照度无关。虽然光束的辐照度很微弱，只要频率足够高，必会产生一些高能量的光量子来促使束缚电子逃逸。尽管光束的辐照度很强劲，假若频率低于极限频率，则仍旧无法给出任何高能量的光量子来促使束缚电子逃逸。



爱因斯坦在1905年（爱因斯坦奇迹年）发表了六篇划时代的论文。

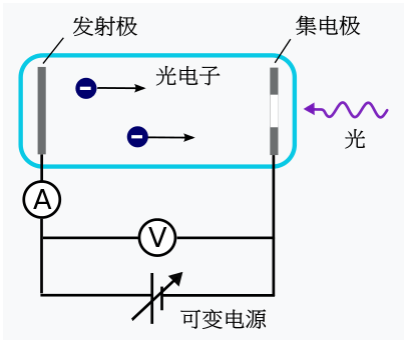
爱因斯坦的论述极具想像力与说服力，但却遭遇到学术界强烈的抗拒，这是因为它与詹姆斯·麦克斯韦所表述，而且经过严格理论检验、通过精密实验证明的光的波动理论相互矛盾，它无法解释光波的折射性与相干性，更一般而言，它与物理系统的能量“无穷可分性假说”相互矛盾。甚至在实验证实爱因斯坦的光电效应方程正确无误之后，强烈抗拒仍旧延续多年。爱因斯坦的发现开启了量子物理的大门，爱因斯坦因为“对理论物理学的成就，特别是光电效应定律的发现”荣获1921年诺贝尔物理学奖。<sup>[26]</sup>

爱因斯坦的论文很快地引起美国物理学者罗伯特·密立根的注意，但他也不赞同爱因斯坦的理论。之后十年，他花费很多时间做实验研究光电效应。他发现，增加阴极的温度，光电子最大能量不会跟着增加。他又证实光电疲劳现象是因氧化作用所产生的杂质造成，假若能够将清洁干净的阴极保存于高真空内，就不会出现这种现象了。<sup>[23]:238</sup>1916年，他证实了爱因斯坦的理论正确无误，并且应用光电效应直接计算出普朗克常数。<sup>[25]</sup>密立根因为“关于基本电荷以及光电效应的工作”获颁1923年诺贝尔物理学奖。



图为密立根做光电效应实验得到的最大能量与频率关系线。竖轴是能够阻止最大能量光电子抵达阳极的截止电压，P是逸出功，PD是电势差（potential difference）。

实验结果分析



光电效应电路图。

如左图所示，在一个真空的玻璃或石英封闭容器内，装置了金属发射极与集电极，将两个电极连结至可变电源两端，用可变电源调整发射极与集电极之间的电压 **V**，用电流表测量两个电极之间的电流。假设没有照射任何光束于发射极，则由于发射极与集电极之间呈断路状况，电流表量度到的电流为零。假设照射光束于发射极，给予适当光频率、电压条件，则电流表会量度到电流。<sup>[2]:1240-1246</sup>

截止电压

从电压表与电流表读取的数值，可以绘得右边所示的曲线图。按照这曲线图做分析推论，给定适当光频率，给定辐照度，正电压 **V** 越大，使得发射极的电势越低于集电极的电势，则越多从发射极发射出的光电子会因电场力被吸引至集电极，因此电流 **I** 跟着增大，直到所有发射出来的光电子都被聚集于集电极为止，这时，电流会达到饱和值，称为“饱和电流” **I<sub>s</sub>**，再增加正电压也不会增加电流。<sup>[1]:1060</sup>

如右图所示，给定适当光频率与适当电压，调整辐照度，则辐照度越大，电流越大，饱和电流也越大。

现在假设电压  $V$  是负值，负电压  $V$  越负，使得发射极的电势越高于集电极的电势，则越多从发射极发射出的光电子会因电场力被集电极排斥，无法抵达集电极，因此电流会跟着减小，直到变为零为止，没有任何光电子会抵达集电极，这使得电流变为零的负电压，其绝对值  $V_{stop}$  称为“截止电压”。

如右图所示，给定光频率，截止电压  $V_{stop}$  与辐照度无关。理论而言，截止电压  $V_{stop}$  与光电子的最大动能有关。这论点可以很容易推导出来。最大动能以方程表示为

$$K_{\max} = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 \text{ ;}$$

其中， $m$  是电子质量， $v_{\max}$  是光电子的最大速度。

由于负电压作用，光电子的速度从  $v_{\max}$  变为零，负电压阻止光电子抵达集电极所做的功为

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = q_e V_{stop} \text{ ;}$$

其中， $q_e$  是基本电荷。

所以，最大动能与截止电压之间的关系为

$$K_{\max} = q_e V_{stop} \text{ 。}$$

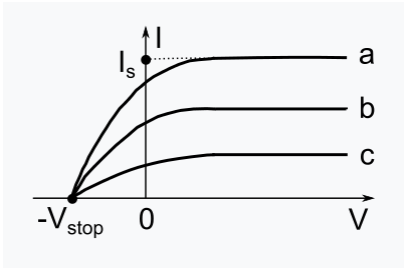
当电流等于零时，量度截止电压，就可以得到光电子的最大动能。

最大动能

前段内容推论出一个结果，给定光频率，截止电压  $V_{stop}$  与辐照度无关。从这结果，可以更进一步推论，给定光频率，光电子的最大动能与辐照度无关。不论光束是多么的明亮，或是多么的黯淡，光电子的最大动能不会改变。

应用经典物理学，无法对此一结果给出恰当的解释。根据经典物理学，入射光束是一种电磁波，在金属表面的电子感受到电磁波的电场力，会跟着电磁波振动。假若电磁波的振幅越大，则电子也会越激烈、更具能量地振动，因此，发射出的光电子也会拥有更大的动能。<sup>[7]:18-21</sup>

量子物理学引用光子的概念来解释这现象， $h\nu$  是光频率为  $\nu$  的光子所带有的能量。在金属表面的任意一个电子所能从光束得到的能量是一个光子的能量。增加辐照度会增多在光束里的光子数量，这会增多光电子数量，但不会使得每一个光电子因吸收光子而获得的能量增加。所以，光电子的最大动能与辐照度无关，只与光频率有关。



不同辐照度的光束照射于金属表面，电流  $I$  随电压  $V$  的关系曲线图。三条曲线按照辐照度从大至小顺序排列为a、b、c。

极限频率

对于某金属（例如锌金属）做实验，将测得的最大动能与光频率之间的关系数据绘成曲线图，如右图所示，则可察觉，不论入射光束的辐照度为何，光频率必须高过某最低频率，否则不会出现光电效应，这最低频率是这金属的特征频率，称为“极限频率”，对应的波长称为“极限波长”。<sup>[1]:1060-1061</sup>

根据经典物理学，不应该存在极限频率，入射光束的辐照度越大，传输给电子的能量更大，电子应该更容易逃逸出金属表面，这完全与光频率无关。

根据量子物理学，每一种金属都有其特征的逸出功 ***W***。电子从光子得到的能量必须大于逸出功，否则无法逃逸出金属表面，因此，光频率必须大于极限频率 ***ν*<sub>0</sub>**，而逸出功与极限频率的关系为

$$W = h\nu_0。$$

光频率必须大于或等于极限频率，光电效应才能发生。

几乎瞬时发射

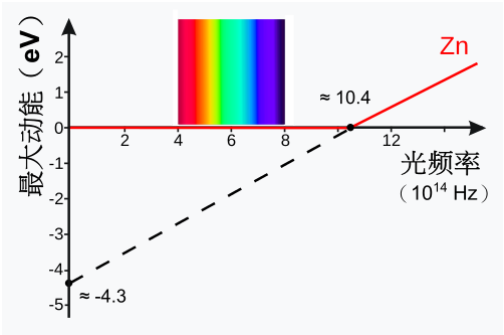
经典电磁学预测从开启入射光束到光电子发射应该需要一段有限时间间隔，这是因为电子必须吸收累积入射光束的能量，直到获得足够能量才能逃逸离开金属表面，假若辐照度很微弱，这可能需要几个小时的时间间隔。但是，实际实验结果并非这样，所需的时间间隔小于3×10<sup>−9</sup>秒，这是非常微小的时间间隔，几乎可以用瞬时发射来形容。<sup>[2]:1240-1246</sup><sup>[7]:18-21</sup>

应用量子物理学，不论辐照度的大小，只要入射光子的能量大于或等于逸出功，一旦这能量被金属表面的电子吸收，就可以逃逸出金属表面，成为光电子，所以，开启入射光束后，在非常微小的时间间隔内，就有可能观察到光电效应。

偏振方向

假设照射平面偏振光束于金属表面，则光电子的发射方向分布的高峰是入射光束的偏振方向（电场方向）。<sup>[27]</sup>

实际应用

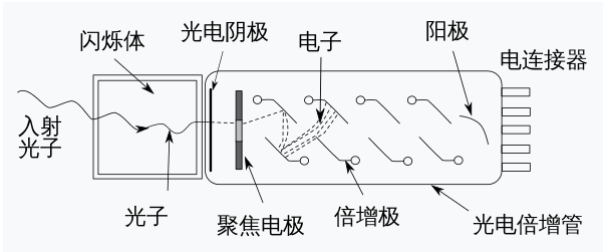


照射光束于锌金属表面，光电子最大动能与光频率之间的关系曲线。注意到当光频率低于极限频率10.4×10<sup>14</sup>Hz时，最大动能为零，电子无法逃逸出金属表面。锌金属的逸出功为4.3 eV。

光电倍增管



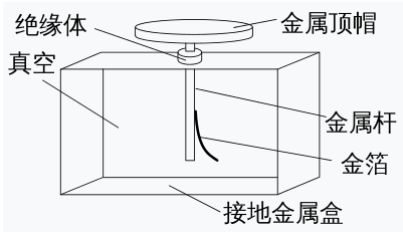
光电倍增管是一种极为灵敏的感光真空管，内部装置了一个 光电阴极（photocathode）、几个 倍增极（dynode）与一个 阳极。位于真空管一端窗口的光电阴极是具有特别低逸出功性质的沉积薄膜，每当光子穿过窗口入射于光电阴极时，会因光电效应很容易地发射出光电子。借着一系列电势越来越高的倍增极，光电子会被加速，并且通过二次发射，电子数量会急速增多，在阳极形成可侦测的电流。光电倍增管常用于侦测辐照度非常微弱的光束，是功能优良的测量仪器。<sup>[28]:177-185</sup>



光电倍增管与闪烁体（scintillator）耦合工作示意图。

金箔验电器

金箔验电器可以用来侦测静电。置放于金属顶帽的电荷会移动至金属杆与金箔。由于同性相斥，金属杆与金箔会互相排斥，因此，金箔的下端会与金属杆分开，从两者分开的程度，可以估量电性大小。



金箔验电器示意图。

金箔验电器是一种演示光电效应的教育工具。例如，假设验电器带有负电，有很多额外电子，金箔的下端与金属杆分开。假若照射高频率光束于金属顶帽，超过其极限频率，造成光电效应，光电子会被发射出去，因此，验电器会放电，金箔的下端会渐渐掉落，与金属杆闭合，呈电中性。持续照射动作，会使得验电器变为带有正电，由于同性相斥，金箔的下端与金属杆又会分开。假若，光束频率低于金属顶帽的极限频率，则不会发生光电效应，不论照射光束多久时间，金属顶帽永远不会放电。<sup>[29]:389-390</sup>

光电子能谱学

光电子能谱学（photoelectron spectroscopy）量度固体、气体、液体样品因被光束照射而发射出的光电子的动能。<sup>[30]</sup>从光子能量  $h\nu$ 、光电子动能  $K$ 、样品逸出功  $W$ ，可以得到电子在样品里的结合能  $E_B$ ：<sup>[31]:4-5</sup>

$$E_B = h\nu - K - W。$$

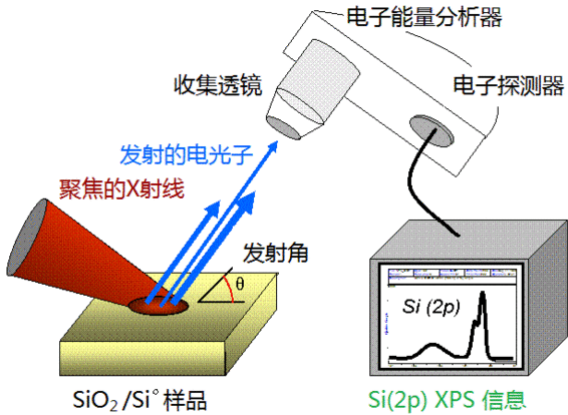
在光电子能谱学发展成功之前，关于这类的数据很少，尤其是内层电子的结合能。<sup>[32]</sup>

光电子能谱学实验通常需要在高真空内完成，否则，光电子很容易会被气体分子散射。光束源可以是X射线管、气体放电灯、同步辐射源等等。<sup>[31]:14-20</sup>依据照射光束的频率，光电子能谱学又分为X射线光电子能谱学、紫外光电子能谱学等等。不论照射光束频率为何，每一种光电子能谱学的中心论题都是量度光电子能量做表面分析。<sup>[33]</sup>

航天器

由于光电效应，暴露于太阳辐射的航天器会累积正电荷，这现象称为空间电荷累积（space charging）。电性不平衡偶而会因为放电而损坏易毁的电子仪器，但时常会影响某些测量结果的准确性，例如，等离子密度、等离子分布函数、电场等等。但是，这些静电问题都具有自我限制性质，因为电压高的物体比较不容易发射出光电子。<sup>[34]</sup>

有时候，暴露于太阳辐射的航天器会累积正电荷。主要原因是面对太阳部分与背对太阳部分之间的“差异电荷累积”（differential charging）。背对太阳部分会从周围的等离子体获得负电荷，所产生的电场会包抄到面对太阳部分，形成一个电势垒，抑遏光电子发射机制。另外一个原因是具有高反光率（reflectance）的表面物质会强烈反射太阳辐射，因此降低光电效应。<sup>[35]</sup>



单色X射线光电子能谱系统的基本组件：

- \*样品通常为固体，因为整个系统处于超高真空（ $<10^{-8}$  torr）。
- \*聚焦的X射线能量约为1.5keV。
- \*光电子只能从样品离表面70-110Å的最上层区域逃逸，能量小于1.5keV。
- \*电子能量分析器专门测量电子的能量，操作值为0~1.5keV。
- \*电子探测器计算电子数量。

月球尘

阳光照射到月球表面与月球尘，会因为光电效应，促使它们带有正电荷，因此月球尘会被月球表面排斥，静电悬浮（electrostatic levitation）于月球表面上方几米高区域，悬浮在月球空中好似“大尘层”，从远处观察，可以看到一层薄薄的灰霾，迢迢的月球轮廓因此变得模糊不清，落日后，依旧可以在地平面上方看到暗淡的曙暮光。这现象最先被1960年代测量员计划拍摄存证。根据“动力学喷泉模型”（dynamic fountain model），在获得电荷与释出电荷的循环过程中，月球尘粒子像喷泉般地移动<sup>[36][37]</sup>。

夜视仪

夜视仪的最核心组件是影像管（image intensifier tube），这是一种电光装置（electro-optic device），能够将各种不同波长的微弱光波变换为可视的不同辐照度单色光波。在影像管里，假设光子撞击到光阳极（photocathode）的碱金属薄膜或像砷化镓一类的半导体物质，则因光电效应，光电子被发射出来，这些光电子会被静电场加速，然后撞击到萤光屏，又产生光子。信号加强的达成是靠着电子加速或使用微通道板一类装置通过二次发射促使增加电子数量。有时候，两种方法都会一起并用。

为了产生光电效应，当光子被电子吸收后，必须有足够能量将电子从物质的导带移至真空能级（vacuum level），这动作需要用到额外能量来克服光阳极的电子亲合势，除了禁带以外，这是另外一种阻碍光电子发射的势垒，这在能带间隙模型（band gap model）里有详细说明。有些像砷化镓一类

的物质，其有效电子亲合势低于导带的能级。对于这种物质，移动到导带的电子有足够能量被发射出来，成为光电子。这种物质可以制成很厚的薄膜来吸收光子。这种物质称为“负电子亲合势”物质。<sup>[38]</sup>

## 截面

光电效应是光子与原子之间的一种相互作用，是十二种可能的理论相互作用中的一种。<sup>[39]:672-673</sup>假设光子能量大约为电子静止能511 keV，则康普顿散射可能会发生。大约两倍能量1.022 MeV，则成对产生可能会发生。<sup>[39]:712</sup>康普顿散射、成对产生是另外两种竞争机制案例。

对于某单独光子与束缚电子相互作用，即使光电效应是常见反应，虽然光子已被吸收，束缚电子已被激发，仍旧无法肯定预测最终结果为何，这是因为需要通过统计性过程，才能得到最终结果。光电效应发生的概率是由相互作用的截面来量度。截面的参数是靶原子的原子序 ***Z*** 与光子能量。对于光子能量 ***E*** 大于最高原子结合能，K电子截面 ***σ*** 可以如下大概估计：<sup>[40][41]</sup>

$$E \text{ 小于K吸收边限: } \sigma \approx Z^5/E^{7/2} \text{ 、}$$
$$E \approx 511\text{keV: } \sigma \approx Z^5/E^2 \text{ 、}$$
$$E \gg mc^2 \text{ : } \sigma \approx Z^5/E \text{ 。}$$

从这些公式可以观察到，原子序越大，光电效应截面越快速变大。因此推论，高-Z物质是优良的伽马辐射屏蔽。这就是为什么铅金属（Z=82）是良好的伽马辐射屏蔽。<sup>[42]</sup>

## 参见

电子学：

- 光电倍增管
- 太阳能电池
- 太阳能

物理学：

- 反常光电效应
- 内光电效应
- 普朗克黑体辐射定律
- 量子力学

## 注释

- 在真空里的自由电子无法吸收光子成为光电子，必须借助原子，才能维持动量守恒。

2. 在石英窗户EF下方设置紫外线源，向上方照射，紫外线会穿透石英窗户、通过金属丝网CD，照射于锌金属片AB，促使其发射光电子，调整金属丝网的电势高于锌金属片，则光电子会被金属丝网吸引，形成光电流。但是，现在施加均匀磁场平行于锌金属片，则光电子会被偏转。给定金属丝网与锌金属片之间的电压差  $V$ ，调整均匀磁场  $B$ ，使得金属丝网与锌金属片之间的间隔距离  $l$  大于  $\sqrt{2Vm/eB^2}$ ，则光电子不再会抵达金属丝网，光电流会急速降低，甚至变为零，这样就可以得到光电子的荷质比  $e/m$ 。
3. 阴极射线在空气中透射前进，萤光辐照度减半的距离为0.5cm。空气粒子的平均自由程为 $10^{-5}$ cm
4. 莱纳德必没有特别指出最大动能与光波频率的关系。1907年，艾利克·赖登柏（Erich Ladenburg）发现，入射光的频率越高，光电子的最大动能越大。
5. 1901年，马克斯·普朗克在研究黑体辐射中作出将电磁辐射能量量子化的假设，发现了普朗克关系式  $E = h\nu$ ，将能量  $E$  与频率  $\nu$  关联在一起。

## 参考文献

1. Halliday, David; Resnick, Robert; Walker, Jerl, Fundamental of Physics 7th, USA: John Wiley and Sons, Inc., 2005, ISBN 0-471-23231-9
2. Serway, Raymond; Jewett, John. Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 9th. Cengage Learning. 2013. ISBN 978-1133954057.
3. Hertz, Heinrich. *Ueber den Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die electrische Entladung*. Annalen der Physik. 1887, **267** (8): S. 983–1000. Bibcode:1887AnP...267..983H. doi:10.1002/andp.18872670827.(On an effect of ultra-violet light upon the electric discharge)
4. The Nobel Prize in Physics 1921. Nobel Foundation. [2013-03-16].
5. Lamb, Willis E.; Scully, Marlan O. Photoelectric effect without photons, discussing classical field falling on quantized atomic electron. 1969.
6. George Greenstein; Arthur Zajonc. The Quantum Challenge: Modern Research on the Foundations of Quantum Mechanics. Jones & Bartlett Learning. 2006. ISBN 978-0-7637-2470-2.
7. French, Anthony, An Introduction to Quantum Physics, W. W. Norton, Inc., 1978
8. Mee, Chris; Crundell, Mike; Arnold, Brian; Brown, Wendy. International A/AS Level Physics. Hodder Education. 2011: 241. ISBN 978 0 340 94564 3. "is called the work function energy  $\Phi$ "
9. Vesselinka Petrova-Koch; Rudolf Hezel; Adolf Goetzberger. High-Efficient Low-Cost Photovoltaics: Recent Developments. Springer. 2009: 1-. ISBN 978-3-540-79358-8.

10. Smith, W., (1873) "Effect of Light on Selenium during the passage of an Electric Current" (<http://histv2.free.fr/selenium/smith.htm>) [页面存档备份](https://web.archive.org/web/20091004015727/http://histv2.free.fr/selenium/smith.htm) (<https://web.archive.org/web/20091004015727/http://histv2.free.fr/selenium/smith.htm>), 存于[互联网档案馆](#). *Nature*, 1873-02-20, p.303.
11. Fowler, Michael. [photoelectric effect](#). Modern Physics. [2013-08-27].
12. Hallwachs, Wied. Ann. xxxiii. p. 301, 1888.
13. Righi, C. R. cvi. p. 1349; cvii. p. 559, 1888
14. Stoletow. C. R. cvi. pp. 1149, 1593; cvii. p. 91; cviii. p. 1241; *Physikalische Revue*, Bd. i., 1892.
15. J. J. Thomson. [Conduction of Electricity Through Gases](#). Watchmaker Publishing. March 2005. ISBN 978-1-929148-49-3.
16. Robert Bud; Deborah Jean Warner. Instruments of Science: An Historical Encyclopedia. Science Museum, London, and National Museum of American History, Smithsonian Institution. 1998. ISBN 978-0-8153-1561-2.
17. Asimov, *Asimov's Biographical Encyclopedia of Science and Technology* 2nd Revised edition
18. Smithsonian Institution. Board of Regents. [Report of the Board of Regents](#) . The Institution. 1914 [22 August 2013].
19. Whittaker, E. T., [A history of the theories of aether and electricity](#). Vol 1, Nelson, London, 1951
20. Thomson, J. J. [On the Masses of the Ions in Gases at Low Pressures](#). Philosophical Magazine, Series 5. December 1899, **48** (295): pp. 547–567.
21. Per F. Dahl. Flash of the Cathode Rays: A History of J.J. Thomson's Electron. CRC Press. 1 January 1997. ISBN 978-0-7503-0453-5.
22. Herbert Stanley Allen. [Photo-electricity: The Liberation of Electrons by Light, with Chapters on Fluorescence & Phosphorescence, and Photo-chemical Actions & Photography](#). Longmans, Green and Company. 1913 [2 September 2013].
23. Bruce R. Wheaton. The Tiger and the Shark: Empirical Roots of Wave-Particle Dualism. Cambridge University Press. 26 July 1991. ISBN 978-0-521-35892-7.
24. Wheaton, Bruce. [Philipp Lenard and the Photoelectric Effect, 1889-1911](#). Historical Studies in the Physical Sciences. 1978, **9**: pp. 299–301, 320–321.
25. Millikan, R. [A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h"](#) (PDF). Physical Review. 1916, **7** (3): 355–388 [2013-08-10]. Bibcode:1916PhRv....7..355M. doi:10.1103/PhysRev.7.355. [（原始内容](#) (PDF) [存档于2014-11-21](#))  .
26. [The Nobel Prize in Physics 1921](#). Nobel Foundation. [2008-10-09].
27. Bubb, Frank. Direction of Ejection of Photo-Electrons by Polarized X-rays. Physical Review. 1924, **23** (2): 137–143. Bibcode:1924PhRv...23..137B. doi:10.1103/PhysRev.23.137.
28. Tavernier, Stefaan. Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics illustrated. Springer. 2010. ISBN 9783642008290.

29. Tsokos, K. A. Cambridge Physics for the IB Diploma revised. Cambridge University Press. 2010. ISBN 9780521138215.
30. （英文）  国际纯粹与应用化学联合会. "photoelectron spectroscopy (PES) (<http://goldbook.iupac.org/P04609.html>)". 《化学术语总目录》在线版.
31. Hüfner, Stefan. Photoelectron Spectroscopy: Principles and Applications illustrated. Springer. 2003. ISBN 9783540418023.
32. Hollas, J. Michael. Modern Spectroscopy 4th. Wiley. 2003: pp. 289ff. ISBN 978-0470844168.
33. Hercules, D. M.; Hercules, S.H. Al. Analytical chemistry of surfaces. Part I. General aspects. Journal of Chemical Education. 1984, **61** (5): 402. Bibcode:1984JChEd..61..402H. doi:10.1021/ed061p402.
34. Lai, Shu T. Fundamentals of Spacecraft Charging: Spacecraft Interactions with Space Plasmas illustrated. Princeton University Press. 2011: pp. 1–6. ISBN 9780691129471.
35. Lai, Shu T.; Tautz, Maurice.  Aspects of Spacecraft Charging in Sunlight (PDF). IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE. Oct 2006, **34** (5): pp. 2053.
36. Sickafoose; 等.  Experimental investigations on photoelectric and triboelectric charging of dust (PDF). JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH. May 2001, **106** (A5): 8343.
37. Bell, Trudy E., "Moon fountains" ([http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2005/30mar\\_moonfountains/](http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2005/30mar_moonfountains/)), NASA.gov, 2005-03-30.
38. Kingslake, Rudolf (编). Applied Optics and Optical Engineering, Volume 6. Elsevier. 2012: pp. 393ff. ISBN 9780323147026.
39. Evans, R. D.  The Atomic Nucleus. Malabar, Fla.: Krieger. 1955. ISBN 0-89874-414-8.
40. Davisson, C. M.  Interaction of  $\gamma$ -RADIATION with Matter. 1965: 49.
41. Nikjoo, Hooshang; Uehara, Shuzo; Emfietzoglou, Dimitris. Interaction of Radiation with Matter. Taylor & Francis. 2012: pp. 157. ISBN 978-1439853573.
42. Knoll, Glenn F.  Radiation Detection and Measurement. New York: Wiley. 1999: pp.47-49 [2013-08-21]. ISBN 0-471-49545-X. （原始内容存档于2013-07-28） .

## 外部链接

- Nave, R., "Wave-Particle Duality (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod1.html>)". HyperPhysics.
- Haberkern, Thomas, and N Deepak "Grains of Mystique: Quantum Physics for the Layman (<http://www.faqs.org/docs/qp/>)". Einstein Demystifies Photoelectric Effect (<http://www.faqs.org/docs/qp/chap03.html>), Chapter 3.
- Department of Physics, "The Photoelectric effect (<http://www.phy.davidson.edu/ModernPhysicsLabs/hovere.html>)". Physics 320 Laboratory, Davidson College, Davidson.

- Fowler, Michael, "The Photoelectric Effect ([http://www.phys.virginia.edu/classes/252/photoelectric\\_effect.html](http://www.phys.virginia.edu/classes/252/photoelectric_effect.html))". Physics 252, University of Virginia.

### Java Applet小程序

- **（英文）** "[光电效应\(Photoelectric Effect\) \(https://web.archive.org/web/20080611220909/http://phet.colorado.edu/new/simulations/sims.php?sim=Photoelectric\\_Effect\)](https://web.archive.org/web/20080611220909/http://phet.colorado.edu/new/simulations/sims.php?sim=Photoelectric_Effect)". The Physics Education Technology (PhET) project. (Java)
- **（英文）** Fendt, Walter, "[光电效应\(The Photoelectric Effect\) \(https://web.archive.org/web/20051102014650/http://www.walter-fendt.de/ph14e/photoeffect.htm\)](https://web.archive.org/web/20051102014650/http://www.walter-fendt.de/ph14e/photoeffect.htm)". (Java)
- **（英文）** "[Applet: Photo Effect \(http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap28/PhotoEffect/photo.htm\)](http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap28/PhotoEffect/photo.htm)". Open Source Distributed Learning Content Management and Assessment System. (Java)

---

取自“<https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=光电效应&oldid=59599180>”

---

本页面最后修订于2020年5月11日（星期一）04:29。

本站的全部文字在[知识共享 署名-相同方式共享 3.0协议](#)之条款下提供，附加条款亦可能应用。（请参阅[使用条款](#)）

Wikipedia®和维基百科标志是[维基媒体基金会](#)的注册商标；维基™是维基媒体基金会的商标。

维基媒体基金会是按美国国内税收法501(c)(3)登记的[非营利慈善机构](#)。