

原子和亚原子物理学

高政祥 编著

北京大学出版社

原子和亚原子物理学

高政祥 编著

北京大学出版社
北 京

图书在版编目(CIP)数据

原子和亚原子物理学/高政祥编著. —北京:北京大学出版社,
2001. 9

ISBN 7-301-05229-4

I. 原… II. 高… III. 原子物理学-高等学校-教材 IV. 056

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 064313 号

书 名: 原子和亚原子物理学

著作责任者: 高政祥 编著

责任编辑: 顾卫宇

标准书号: ISBN 7-301-05229-4/O · 0513

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn/cbs.htm>

电 话: 出版部 62752015 发行部 62754140 理科编辑部 62752021

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

排 印 者: 北京大学印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

890 毫米×1240 毫米 A5 开本 10.625 印张 306 千字

2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 17.00 元

作者前言

原子和亚原子物理学包括原子物理、原子核物理和粒子物理三部分内容,是在经典物理的力学、热学、电磁学和光学课程以后,为大学本科生开设的近代物理课程.力学、热学、电磁学和光学是 19 世纪完备起来的,而原子和亚原子物理学是 20 世纪初,随着量子力学的发展而不断深入的.

原子和亚原子物理学的第一个特点是基础性.它属于普通物理课程.必须注重基本的物理实验、物理图象、物理思想和物理模型.它研究的绝大多数微观体系包含三个以上的粒子,解决这些问题只能作近似.在讲授本课程时,大学本科生一般还没有足够的数学物理方法和量子力学基础,不必强调复杂的数学推导.

第二个特点是创新性.包括 2000 年在内的 94 项诺贝尔物理学奖中有 66 项是与原子和亚原子物理学直接相关的.这些工作不仅是原子和亚原子物理学的重大突破,而且是前辈物理学家创造性研究的典范.在教学中应该强调培养学生的创新能力.

第三个特点是它的发展性.这门学科已经研究了一百余年了,但是人们对微观世界的了解仍然在不断深入,新的实验结果不断发现,新的物理模型、物理原理不断提出.教材不必也不应该再遵循 20 世纪 30 年代教科书的体系,即从原子光谱到玻尔轨道量子化的旧量子论,再以玻尔理论为基础讲授原子物理的思路.在教学中应该及时增加这个学科的最新进展.

本书从以上三个基本特点出发,对原子物理和粒子物理部分的教材体系作了彻底改革,对原子核物理部分作了充实提高;从量子力学的基本原理出发,阐明原子和亚原子理论.作者尽可能多地介绍新的发现和新的理论,尽可能多地介绍诺贝尔物理学奖,尽可能多地介绍现代科学技术,尽可能多地介绍相关的参考文献,而力图反映这个学科目前发展的现状和正在研究的前沿.

在本书付印时,我想我只是进行了原子和亚原子物理学教材改革的一种探索,提出了原子和亚原子物理学教学改革的一种新思路.同时也深感学识的浅薄和时间的仓促.本书中肯定有许多不妥或错误之处,诚恳希望读者指正.

高政祥

2001年8月于北京大学畅春园

目 录

第一章 量子理论基础	(1)
1.1 从经典物理到量子物理	(1)
1.1.1 黑体辐射	(1)
1.1.2 量子论的建立	(6)
1.1.3 量子力学的数学描述	(12)
习 题	(13)
1.2 量子力学的基本原理	(14)
1.2.1 波函数的性质	(14)
1.2.2 态叠加原理	(15)
1.2.3 不确定原理(uncertainty principle)	(17)
1.2.4 力学量算符	(20)
1.2.5 全同粒子和泡利不相容原理	(25)
习 题	(27)
1.3 薛定谔方程	(27)
1.3.1 薛定谔方程	(27)
1.3.2 一维无限深势阱	(29)
1.3.3 一维谐振子	(30)
1.3.4 隧道效应	(31)
1.3.5 扫描隧道显微镜	(32)
1.3.6 微扰理论	(33)
习 题	(38)
1.4 氢原子	(38)
1.4.1 电子运动的薛定谔方程	(38)
1.4.2 分离变量	(40)
1.4.3 角量子数和磁量子数	(41)
1.4.4 主量子数和径向波函数	(42)

1.4.5	氢原子中电子的几率分布	(44)
1.4.6	简并波函数的实数解	(46)
	习 题	(47)
第二章	原子物理	(48)
2.1	原子结构模型	(48)
2.1.1	汤姆孙原子结构模型	(48)
2.1.2	卢瑟福核原子结构模型	(49)
2.1.3	卢瑟福散射理论	(51)
2.1.4	原子的组成和大小	(57)
	习 题	(57)
2.2	原子的电子壳层结构	(58)
2.2.1	氢原子的轨道磁矩	(58)
2.2.2	电子自旋	(60)
2.2.3	电子壳层结构	(63)
2.2.4	元素周期表	(68)
	习 题	(69)
2.3	原子的能级结构	(69)
2.3.1	角动量的矢量模型	(69)
2.3.2	氢原子能级的精细结构	(70)
2.3.3	多电子原子能级的精细结构	(73)
2.3.4	LS 耦合	(75)
2.3.5	jj 耦合	(79)
2.3.6	原子能级的超精细结构	(80)
2.3.7	守恒量和好量子数	(82)
	习 题	(84)
2.4	能级跃迁	(84)
2.4.1	辐射跃迁	(84)
2.4.2	电偶极跃迁选择定则	(85)
2.4.3	磁偶极跃迁选择定则	(88)
2.4.4	发射和吸收	(89)
2.4.5	激光原理	(91)

习 题	(94)
2.5 原子光谱.....	(94)
2.5.1 光谱的产生和分类	(94)
2.5.2 碱金属原子光谱	(98)
2.5.3 氢原子光谱	(102)
2.5.4 兰姆移位	(104)
2.5.5 原子光谱的超精细结构	(106)
2.5.6 多电子原子光谱	(107)
习 题	(110)
2.6 内层电子激发和 X 射线谱	(110)
2.6.1 X 射线的发现	(110)
2.6.2 X 射线发射谱	(111)
2.6.3 莫塞莱定律和原子序数的测定	(114)
2.6.4 X 光电子谱	(116)
2.6.5 内光电效应 俄歇谱	(116)
2.6.6 X 射线的吸收	(117)
2.6.7 康普顿效应	(118)
2.6.8 激光冷却和捕获中性原子	(120)
习 题	(123)
2.7 外场中的原子	(124)
2.7.1 原子的磁矩	(124)
2.7.2 塞曼效应	(126)
2.7.3 斯塔克效应	(134)
2.7.4 磁共振(magnetic resonance)	(136)
习 题	(140)
2.8 分子结构	(140)
2.8.1 氢分子离子	(141)
2.8.2 共价键分子	(143)
2.8.3 其他化学键	(145)
2.9 分子内部运动的能级和光谱	(147)
2.9.1 双原子分子的能级和光谱	(147)

2.9.2	拉曼散射	(155)
第三章	原子核物理	(158)
3.1	原子核的基本性质	(158)
3.1.1	原子核的组成和稳定性	(158)
3.1.2	原子核的大小和密度	(162)
3.1.3	原子核的自旋和宇称	(165)
	习 题	(170)
3.2	原子核的核力和结合能	(170)
3.2.1	核力	(170)
3.2.2	结合能	(174)
3.2.3	液滴模型(liquid-drop model)	(178)
	习 题	(179)
3.3	原子核结构模型	(180)
3.3.1	费米气体模型	(180)
3.3.2	壳层模型(shell model)	(181)
3.3.3	集体模型 (collective model)	(192)
	习 题	(194)
3.4	原子核的放射性衰变	(195)
3.4.1	放射性衰变规律	(195)
3.4.2	衰变能和衰变的能量条件	(198)
3.4.3	核衰变和核能级	(205)
3.4.4	穆斯堡尔效应	(208)
	习 题	(212)
3.5	原子核反应	(212)
3.5.1	几个著名的核反应	(213)
3.5.2	反应道和反应截面	(214)
3.5.3	Q 方程	(215)
3.5.4	核反应过程和机制	(218)
	习 题	(220)
3.6	原子能的利用	(221)
3.6.1	核裂变的发现	(221)

3.6.2	裂变机制和能量	(222)
3.6.3	轻核聚变及其基本条件	(224)
3.6.4	引力约束、惯性约束和磁约束	(226)
3.6.5	核聚变研究	(231)
	习题	(233)
第四章	粒子物理	(234)
4.1	粒子加速器	(235)
4.1.1	高压倍加器	(235)
4.1.2	静电加速器	(236)
4.1.3	直线加速器	(237)
4.1.4	回旋加速器	(239)
4.1.5	同步加速器	(240)
4.1.6	对撞机	(241)
	习题	(243)
4.2	粒子探测器	(243)
4.2.1	径迹探测器	(244)
4.2.2	电子学探测器	(247)
4.3	粒子的碰撞和散射	(251)
4.3.1	洛伦兹变换	(251)
4.3.2	实验室坐标系和质心坐标系	(252)
4.3.3	高能电子散射	(258)
4.4	粒子及其基本性质	(261)
4.4.1	粒子按相互作用分类	(261)
4.4.2	场玻色子	(263)
4.4.3	轻子	(264)
4.4.4	强子	(268)
4.4.5	粒子的基本性质	(274)
	习题	(277)
4.5	对称性和守恒定律	(278)
4.5.1	内特尔定理	(278)
4.5.2	正反粒子变换	(279)

4.5.3	P 变换	(282)
4.5.4	CPT 定理	(285)
4.5.5	粒子物理中的守恒量	(287)
	习 题	(291)
4.6	强子的结构	(291)
4.6.1	强子的对称性和超多重态	(291)
4.6.2	夸克模型	(297)
4.6.3	重子和介子的夸克构成	(300)
	习 题	(303)
4.7	相互作用的统一和标准模型	(304)
4.7.1	杨振宁-米尔斯规范场	(304)
4.7.2	电弱统一理论	(306)
4.7.3	标准模型中的相互作用	(307)
4.7.4	标准模型中粒子的分类	(308)
4.7.5	大统一理论和超弦	(310)
4.8	粒子和宇宙	(313)
4.8.1	哈勃定律	(313)
4.8.2	宇宙方程	(316)
4.8.3	宇宙背景辐射	(318)
4.8.4	标准大爆炸模型	(319)
	习 题	(328)
	物理学常数	(329)

第一章 量子理论基础

1.1 从经典物理到量子物理

1900年4月27日,开尔文(Lord Kelvin)^①在《十九世纪热和光的动力理论上空的乌云》的长篇讲话中,认为经典物理学是万里晴空,但在上世纪末出现了两朵“乌云”,其中第一朵“乌云”是“以太漂移”的“零结果”;第二朵“乌云”是能量均分定理应用于固体比热的失败.而后来这恰恰引起了物理学一场深刻的变革,前者推动了相对论的研究,后者孕育了量子物理学.

1.1.1 黑体辐射

基尔霍夫定律

同一物体的辐射本领和吸收本领之间有着内在的联系.基尔霍夫(G. R. Kirchhoff)1859年提出:任何物体在同一温度 T 下的辐射本领 $r(\nu, T)$ 与吸收本领 $\alpha(\nu, T)$ 成正比,其比值只与 ν 和 T 有关:

$$\frac{r(\nu, T)}{\alpha(\nu, T)} = \frac{c}{4} \rho(\nu, T). \quad (1.1.1)$$

在热平衡下的辐射场,应是均匀、稳恒和各向同性的,其能量谱密度 $\rho(\nu, T)$ 必定为 ν 和 T 惟一地确定. $\rho(\nu, T)$ 是与物质无关的普适函数,称为热辐射的标准能谱.在实验和理论上探求普适函数 $\rho(\nu, T)$ 成为当时物理学家解决热辐射问题的关键.对吸收本领 $\alpha(\nu, T)=1$ 的绝对黑体,只要测出其发射本领 $r(\nu, T)$,就得到热辐射能量谱 $\rho(\nu, T)$.有时将热辐射能量谱表示成波长和温度的函数 $\rho(\lambda, T)$.

^① Lord Kelvin, "19th Century Clouds Over the Dynamical Theory of Heat and Light", *Phil. Mag.* 2(1901)1.

斯特藩定律

1879年斯特藩(J. Stefan)总结实验数据提出黑体辐射(blackbody radiation)的总辐射本领与它的绝对温度的四次方成正比:

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\nu, T) d\nu = \int_0^{\infty} \frac{c}{4} \rho(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4, \quad (1.1.2)$$

其中 $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. 1884年玻尔兹曼从热力学理论导出这一公式,故也称为斯特藩-玻尔兹曼公式.

例题 1.1.1 太阳半径为 $R_S = 7.0 \times 10^8 \text{ m}$, 太阳表面到地球表面的距离为 $r = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$, 太阳表面的温度为 5750 K , 求太阳辐射到地球表面单位面积的辐射通量, 即太阳常数.

解 太阳辐射的总功率为 $\sigma T^4 \cdot 4\pi R_S^2$, 因为太阳表面到地球表面的距离为 r , 因此太阳辐射到地球表面单位面积的辐射通量为:

$$\frac{\sigma T^4 \cdot 4\pi R_S^2}{4\pi r^2} = \frac{\sigma T^4 R_S^2}{r^2} = 1.35 \text{ kW/m}^2.$$

维恩定律

1893年维恩(W. Wien)提出辐射能量分布定律:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\alpha}{c^3} \nu^3 e^{-\beta\nu/T}, \quad (1.1.3)$$

其中 α, β 为两个常数. 这个公式只在波长较短、温度较低时才与实验结果相符, 而在长波区域则系统地低于实验值. 见图 1.1.1.

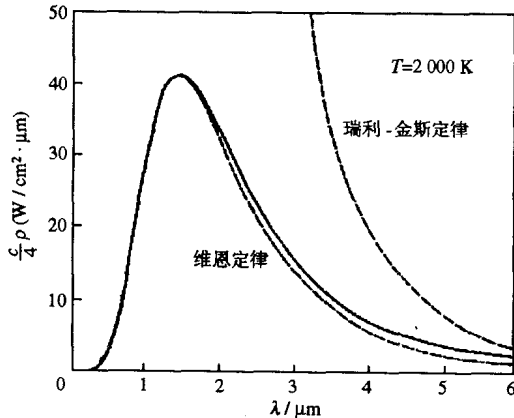


图 1.1.1 实线为一个温度为 2000 K 空腔的辐射通量谱的实验值. 虚线为维恩分布定律和瑞利-金斯定律的预言值.

维恩由(1.1.3)式推导出维恩位移定律:黑体辐射通量谱 $\rho(\lambda, T)$ 的峰值对应的波长 λ_{\max} 与温度 T 成反比.

$$\lambda_{\max} T = b, \quad (1.1.4)$$

其中常数 $b = 2897.756(24) \mu\text{m} \cdot \text{K}$. 维恩因此获 1911 年诺贝尔物理学奖.

例题 1.1.2 太阳光谱连续部分极大值位于 $\lambda_{\min} = 5100 \text{ \AA}$, 求太阳表面的温度.

解 应用维恩位移定律易得太阳表面的温度为 5700 K.

瑞利-金斯定律和“紫外灾难”

1900 年瑞利 (L. Rayleigh) 根据能量均分定理, 推导了辐射定律, 他导得的公式错了一个因子 8, 后被金斯 (J. H. Jeans) 所纠正. 他们认为空腔内的电磁辐射形成一切可能形成的驻波, 其节点在空腔壁处, 由此得到辐射场中单位体积内频率 ν 附近单位频率间隔内电磁辐射的振动模数^①:

$$N(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}, \quad (1.1.5)$$

这也就是辐射场的自由度数目. 根据经典的能量均分定理, 当系统处于热平衡时, 每个自由度的平衡能量为:

$$\bar{\varepsilon} = kT. \quad (1.1.6)$$

由此可得瑞利-金斯公式:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT. \quad (1.1.7)$$

当频率较低时, 瑞利-金斯定律的理论值与实验结果符合较好. 但当频率较高时, 就与实验结果有很大差异. 在紫外端发散. 曾被埃伦菲斯特 (P. Ehrenfest) 称为“紫外灾难”. 如图 1.1.1 所示.

普朗克的量子假设

基尔霍夫的学生普朗克利用有电磁阻尼情况下的受迫振子模型, 根据经典力学和经典电磁规律, 在 1899 年导出了在达到平衡时辐射场的能量密度 (单位体积内在 ν 附近单位频率间隔中的辐射能

^① 赵凯华、罗蔚茵, 量子物理学, 高等教育出版社, 2000, 第 10 页.

量) $\rho(\nu)$ 与振子平均能量 $\bar{\epsilon}$ 的关系式:

$$\rho(\nu) = 8\pi\nu^2\bar{\epsilon}/c^3. \quad (1.1.8)$$

普朗克将式(1.1.8)与维恩公式(1.1.3)比较,并考虑到低频区的实验结果,采用内差法得出辐射的能量密度为:

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi\alpha}{c^3}\nu^3[e^{\nu/T} - 1]^{-1}, \quad (1.1.9)$$

与式(1.1.8)相比,可得振子的平均能量

$$\bar{\epsilon} = \alpha\nu(e^{\nu/T} - 1)^{-1}. \quad (1.1.10)$$

1900年10月19日,普朗克在德国物理学会的会议上发表了上述结果^①.在提出公式的当天,鲁本斯(H. Rubens)立刻将这个公式与卢默(O. Lummer)和普林斯海默(E. Pringsheim)测得的当时最精确的实验结果进行核对,发现“在任何情况下都完全令人满意地相符”.第二天清晨,鲁本斯立即将这一结果告诉了普朗克,并深信在普朗克公式中包含着极其重要的涵义,绝不可能是一个偶然的巧合.普朗克很清楚“即使这个新的公式能证明是绝对精确的,但是如果仅仅是一个侥幸猜测出来的内插公式,那么它的价值也是有限的.”因此必须进一步找出它的理论依据,关键是要在理论上找出振子的平均能量.普朗克经过八个星期的紧张工作后,在1900年12月24日德国物理学会的圣诞会上宣读了题为《关于正常光谱的能量分布定律》的论文.提出了能量量子化的假设:(1)黑体的腔壁是由无数个带电的谐振子组成的,这些谐振子不断地吸收和辐射电磁波,与腔内的辐射场交换能量;(2)这些谐振子所具有的能量是分立的,它的能量与其振动频率 ν 成正比:

$$\epsilon_0 = h\nu, \quad (1.1.11)$$

式中的 h 即为普朗克常数.振子与辐射场交换的能量 ϵ 是一个离散的变量,只能取基本单元能量子(quantum of energy) ϵ_0 的整数倍:

$$\epsilon_n = n\epsilon_0, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.1.12)$$

由于能量取离散值,因此利用统计理论求平均值时采用求和得:

^① M. Plank, *Ann. der Physik*, 4(1901)553.

$$\begin{aligned}\bar{\epsilon} &= \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n\epsilon_0 e^{-n\epsilon_0/kT}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\epsilon_0/kT}} = \frac{\partial}{\partial \beta} \ln \left(\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\epsilon_0 \beta} \right) = \frac{\partial}{\partial \beta} \ln (1 - e^{-\beta\epsilon_0}) \\ &= \frac{\epsilon_0 e^{-\beta\epsilon_0}}{1 - e^{-\beta\epsilon_0}} = \frac{\epsilon_0}{e^{\beta\epsilon_0} - 1} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}.\end{aligned}\quad (1.1.13)$$

从而定出常数 $\alpha = h, \gamma = h/k$. 代入 (1.1.8) 式可得能量密度:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}.\quad (1.1.14)$$

这就是普朗克公式, 用波长表示:

$$\begin{aligned}\rho(\nu, T) d\nu &= \rho(\nu, T) \frac{d\nu}{d\lambda} d\lambda = -\rho(\lambda, T) d\lambda, \\ \frac{d\nu}{d\lambda} &= -\frac{c}{\lambda^2}, \quad \rho(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}, \\ \rho(\lambda, T) &= \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}.\end{aligned}\quad (1.1.15)$$

1900年12月24日被认为是量子论的诞生之日. 有趣的是在普朗克公式正式提出后的五年之中, 没有人对其加以理会, 很多物理学家觉得太离谱. 直到1905年爱因斯坦才提出光量子, 支持普朗克的量子论. 由于量子化的概念同经典物理严重背离, 因此在以后的十余年内, 普朗克很后悔当时提出“量子论”, 并想尽办法试图将它纳入经典范畴. 在各种经典解释都碰壁后, 才深刻理解到量子论的真正的深刻的含义^①. 普朗克因此获1918年诺贝尔物理学奖.

例题 1.1.3 天狼星 (Sirius)、太阳 (Sun) 和猎户座 α (Betelgeuse) 辐射强度最大的波长 λ_{\max} 分别为: 240 nm, 500 nm 和 850 nm. 将天体辐射看成是黑体辐射, 不会引起很大的误差. 求: (1) 这些天体表面的温度. (2) 辐射强度 R . (3) 太阳 (半径为 7.0×10^8 m) 和猎户座 α (半径为 4.0×10^{11} m) 的辐射总功率 N .

解 (1) $T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} / \lambda_{\max}$, 代入, 得天狼星、太阳和猎户座 α 的表面温度分别为: 12000 K; 5800 K; 3400 K.

^① M. J. Klein, *Physics Today*, 19(1966)23.

(2) $R = \sigma T^4$, 代入, 得天狼星、太阳和猎户座 α 的辐射强度分别为: $1.2 \times 10^9 \text{ W/m}^2$; $6.4 \times 10^7 \text{ W/m}^2$; $7.7 \times 10^6 \text{ W/m}^2$.

(3) $N = RS = R(4\pi r^2)$, 代入, 得太阳和猎户座 α 的辐射总功率分别为: $3.9 \times 10^{26} \text{ W}$; $1.5 \times 10^{31} \text{ W}$.

例题 1.1.4 试由普朗克公式推导出维恩公式、瑞利-金斯公式、斯特藩定律.

解 $h\nu \gg k_B T$ 时, $e^{h\nu/kT} \gg 1$,

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} e^{-h\nu/kT};$$

$$h\nu \ll k_B T \text{ 时, } e^{h\nu/kT} \sim 1 + h\nu/k_B T, \rho(\nu, T) = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} kT;$$

$$\begin{aligned} R(T) &= \int_0^\infty r(\nu, T) d\nu = \frac{c}{4} \int_0^\infty \rho(\nu, T) d\nu \\ &= \frac{2\pi h}{c^2} \left(\frac{kT}{h} \right)^4 \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} \\ &= \frac{2\pi h}{c^2} \left(\frac{kT}{h} \right)^4 \frac{\pi^4}{15} \\ &= \frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 h^3} T^4. \end{aligned}$$

1.1.2 量子论的建立

爱因斯坦关于光电效应的量子理论

1905年3月, 爱因斯坦在德国《物理学纪事》上发表题为《关于光的产生和转化的一个启发性的观点》^①, 提出用光量子(light quantum)或光子(photon)的概念处理光电效应中碰到的疑难. 他认为辐射场就是由光量子组成的, 每一个光量子的能量 E 与辐射频率 ν 的关系为:

$$E = h\nu, \quad (1.1.16)$$

当光照射到金属表面时, 一个光子的能量可以立刻被金属中的自由电子吸收, 但是, 只有当每个光量子的频率足够大时, 电子才能克服

^① A. Einstein, *Ann. der Physik*, 17(1905)132.