

第九章
光的量子性 激光
Chap.9 Quantization of Light & Laser

李玲

College of Electronic Science & Technology

Chap.9 Quantization of Light & Laser

教学要求

- ◆ 熟悉光子的概念，掌握物质的本性
- ◆ 熟悉光电效应和康普顿效应
- ◆ 了解波尔氢原子模型，原子的发光机理
- ◆ 了解受激发射光激励、粒子数反转及光振荡等基本概念
- ◆ 掌握激光基本特点和基本工作原理

Chap.9 Quantization of Light & Laser

第一讲

1 量子说

- 1) 热辐射
- 2) 黑体辐射 黑体辐射定律
- 3) 普朗克辐射公式和能量子假说

2 光的粒子性和波粒二象性

- 1) 光电效应
- 2) 康普顿散射

Chap.9 Quantization of Light & Laser

1 量子说

1.1 热辐射

任何温度（只要不是绝对零度）的物体都能发出一定的热辐射，辐射是能量转移的一种形式。

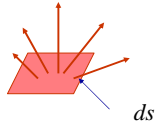
描述辐射场的物理量

(1) 辐射场能量密度U（单位体积内各种频率的总辐射能）与谱密度u（v）

$$U = \int u_{(v)} dv$$

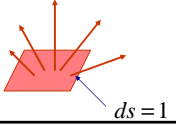
Chap.9 Quantization of Light & Laser

(2) 辐射通量Φ(单位时间通过某一截面的辐射能，即通过某一截面的辐射功率)及其谱密度φ(v)



$$\Phi = \int \varphi_{(v)} dv$$

(3) 辐射源的辐射本领R（物体单位表面积发出的辐射通量）及其谱密度r(v)



$$R = \int r_{(v)} dv$$

Chap.9 Quantization of Light & Laser

(4) 吸收本领 a(v)

入射到物体上的辐射通量，一部分被物体散射或反射(对透明物体,还会有一部分透射),其余的为物体所吸收。

吸收本领定义为:

$$a(v) = \frac{\varphi'(v)}{\varphi(v)}$$

吸收的辐射通量密度

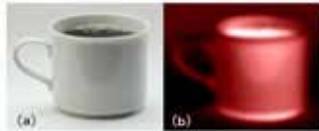
入射的辐射通量密度

(5)基尔霍夫定律:

任何物体在同一温度T下的辐射本领和吸收本领成正比, 这个比值是频率和温度的函数, 与物体性质无关. 用数学式子表示:

$$\frac{r(\nu, T)}{a(\nu, T)} = F(\nu, T).$$

$F(\nu, T)$ 是与物体性质无关的普适函数.



1.2 黑体辐射 黑体辐射定律

(1) 黑体

能够在任何温度下全部吸收所有波长辐射的物体称**绝对黑体**, 简称**黑体**.

$$a(\nu, T) \equiv 1.$$

由基尔霍夫定律, 对黑体也应有

$$\frac{r_0(\nu, T)}{1} = F(\nu, T).$$



所以有 $F(\nu, T) = r_0(\nu, T)$.

黑体辐射的辐射本领与物体热辐射普适函数有相同的形式.

人们研究热辐射, 需要找出这个普适函数的数学形式, 研究黑体辐射, 是寻找普适函数的有效途径.



(2)黑体辐射实验

(a)黑体模型



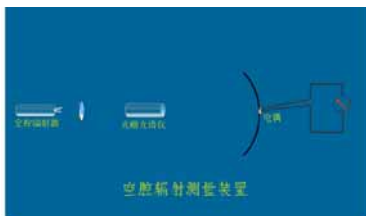
(a)吸收



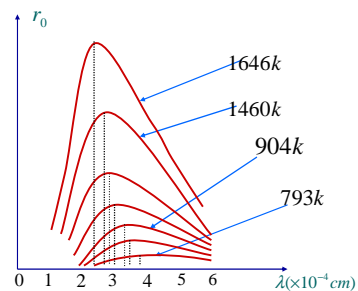
(b)发射



(b)黑体辐射测量



(c) 黑体在不同温度下光谱能量分布曲线



(d)黑体辐射实验定律

斯特藩—玻耳兹曼定律：黑体辐射的辐射本领R与绝对温度的四次方成正比，即

$$R = \int_0^{\infty} r_0(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4.$$

式中 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ k}^4$,

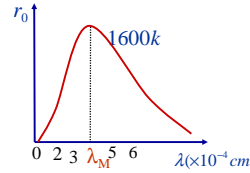
称为斯特藩—玻耳兹曼常数.



维恩定律: 任何温度下, 黑体辐射曲线都有一个极大值, 这极大值对应的波长与温度成反比, 即

$$\lambda_M T = b.$$

色温



上式中温度T称为色温.

且式中 $b = 2.88 \times 10^{-3} \text{ mk}$.

由维恩定律, 可以根据物体的颜色确定其温度, 天体的温度就是这样确定的.



1.3普朗克辐射公式和能量子假说

黑体辐射本领 $r_0(\lambda, T)$ 等于普适函数, 因此要解释实验得出的黑体辐射能量曲线, 归根结底就是确定普适函数的形式.

(1) 维恩公式和瑞利-金斯公式

维恩假设分子辐射频率与分子热运动速度有关(这一假设无严格依据), 得到与麦克斯韦速度分布规律类似的解析式:

$$r_0(\lambda, T) = C_1 \frac{V^3}{c^2} e^{-\frac{C_2 V}{T}}.$$

曲线



瑞利-金斯把电磁辐射看成许多个驻波. 其中每一种驻波是辐射场中的一种模式, 每一种模式都看成一个谐振子, 平均能量为KT, 从而可以算出辐射场的光谱能量密度.

腔内在 $\nu \sim \nu + d\nu$ 频率范围内, 本征模数为

$$\frac{8\pi\nu^2}{c^3} d\nu,$$

因此在 $\nu \sim \nu + d\nu$ 频率范围内的能量为

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



式中 $\rho(\nu, T)$ 为黑体腔内的能量密度, K为玻耳兹曼常数. 可以证明

$$\rho(\nu, T) = \frac{4}{c} r_0(\nu, T).$$

因此有

$$r_0(\nu, T) = \frac{2\pi}{c^2} \nu^2 kT.$$

曲线

随着波长的减小辐射能量无限大. 这就是物理学发展史上所谓的紫外灾难.



(2) 普朗克能量子假说

黑体是由带电的线性谐振子所组成, 这些谐振子能量不能连续变化, 只能取一些分立的值, 这些分立值的是最小能量 ϵ_0 的整数倍, 即 $0, \epsilon_0, 2\epsilon_0, 3\epsilon_0, \dots, n\epsilon_0, \dots$, 称为谐振子的能级. 最小能量

$$\epsilon_0 = h\nu$$

式中 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, 称为普朗克常数.

上面这个假说, 叫做普朗克能量子假说, 它与经典理论能量是连续的理论相矛盾.



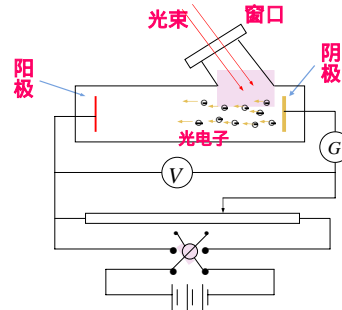
以这个假说为前提,根据热力学定律,普朗克得出黑体辐射公式(普朗克公式):

$$r_0(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

这个公式与实验曲线符合得很好,在短波和长波两种极限的情况下能过度到维恩公式和瑞利-金斯公式.并且由普朗克公式可以导出维恩位移定律和斯特潘-玻耳兹曼定律.

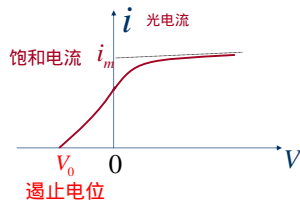


2.1 光电效应



光电效应实验规律

(1)电压为零时电流不为零,说明阴极被光照射后释放出的光电子有一定的动能.

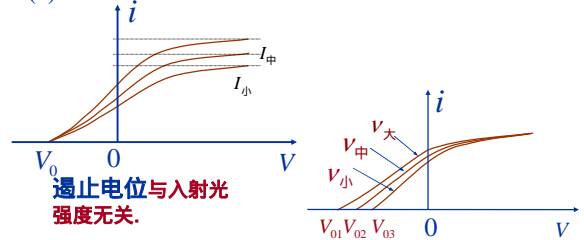


反向电压值达到遏止电位时,光电流为零,说明光电子初动能满足

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = eV_0, \quad \text{遏止电位大,光电子初动能大.}$$



(2)

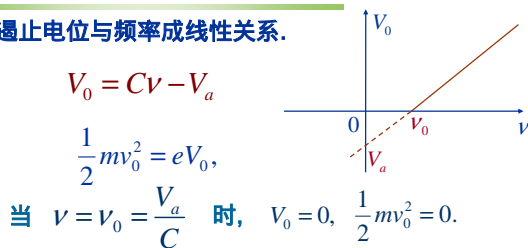


遏止电位与入射光强度无关.

实验证明遏止电位(或光电子初动能)与入射光的频率有关.



(3)遏止电位与频率成线性关系.



$$V_0 = C\nu - V_a$$

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = eV_0,$$

当 $\nu = \nu_0 = \frac{V_a}{C}$ 时, $V_0 = 0, \frac{1}{2}mv_0^2 = 0.$

ν_0 称作截止频率(红限).当入射光频率小于红限时,光电子动能为零

(4) 光电子释放和光照几乎是同时的,弛豫时间约为 10^{-9} 秒,即使光照很弱也是这样.



经典理论与光电效应实验规律的矛盾

经典理论	实验规律
光电效应与光频率无关,只要光强足够大,使电子吸收的能量大于阴极金属的脱出功.	入射光频率必须大于红限频率.
光强大时电子能量积累时间短,光强小时电子能量积累时间长.	弛豫时间与光强无关.
光强越大,电子吸收的能量越大,光电子初动能也越大.	光电子初动能与光强无关,与频率成正比.



爱因斯坦的光子假说

光场由分立的粒子(光子)组成, 对这种粒子仍保持着频率(及波长)的概念. 光子的能量为

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

光子打在金属表面上, 每个电子一次要么吸收一个光子. 要么不吸收. 由能量守恒得

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_0^2 + A = eV_0 + A.$$

上式叫做爱因斯坦方程.



爱因斯坦方程推论:

电子吸收到的光子的能量, 一部分用于脱出金属表面的脱出功, 剩余部分作为光子的初始动能.

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = h\nu - A,$$

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = 0, \Rightarrow h\nu_0 = A,$$

(1) $\nu < \nu_0$ 时, 没有光电子产生, 因而没有光电流产生



爱因斯坦方程可表示为

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = h\nu - h\nu_0,$$

因 $eV_0 = \frac{1}{2}mv_0^2,$

所以有 $V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{A}{e},$



(2) 遏止电位 $V_0 = C\nu - V_a$ 与频率有关.

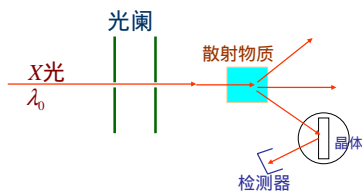
爱因斯坦方程解释了红限, 遏止电位与光频率的正比关系.

(3) 电子接受光子是瞬时的, 不需要时间的积累.

(4) 入射光强大意味着光子流密度大, 饱和电流 $i_m = ne$, 因而饱和电流与光强成正比.



2.2 康普顿散射

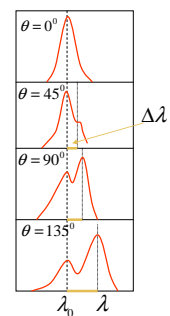


实验规律

散射物质—石墨
钼谱线
 $\lambda_0 = 0.712605 \text{ \AA}$

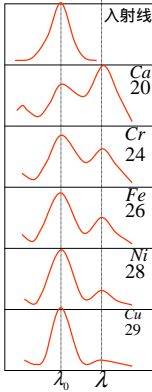
(1) 散射光中除有原波长成分外, 还出现了 $\lambda > \lambda_0$ 的谱线.

(2) $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ 随 θ 增加而增加; λ 的强度随 θ 增加而增加.



Chap.9 Quantization of Light & Laser

入射线(银谱线): $\lambda_0 = 0.56267 \text{ \AA}$



(3) $\Delta\lambda$ 与散射物质无关; λ 的谱线的强度随散射物质原子序数的增加而减小;

λ_0 的谱线强度随散射物质原子序数的增加而增加.

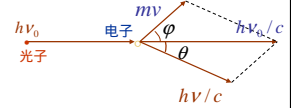
按照经典理论,散射是一种共振吸收再发射的过程,散射波的频率(波长)应与入射波相同.上面的实验结果,经典理论难以解释.

Chap.9 Quantization of Light & Laser

康普顿假设:入射x光是光子流,这些光子不但有能量 $h\nu_0$,而且有动量 $h\nu_0/c$, 光的散射过程是光子与原子中自由电子的完全弹性碰撞过程.

电子的质量

$$m = m_0 / \sqrt{1 - (v/c)^2}$$



碰撞过程能量守恒

$$h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2,$$

碰撞过程动量守恒

$$\frac{h\nu_0}{c} = mv \cos \varphi + \frac{h\nu}{c} \cos \theta,$$

$$0 = mv \sin \varphi - \frac{h\nu}{c} \sin \theta.$$

Chap.9 Quantization of Light & Laser

解上面3个方程得:
$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

或
$$\Delta\lambda = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}. \quad (\text{其中 } \lambda_c = 0.024 \text{ \AA})$$

上式说明了 $\Delta\lambda$ 随散射角变化,而与散射物质无关.

当光子与原子内层电子相碰,由于内层电子束缚的较紧,形成光子与整个原子相碰.原子质量比电子质量大得多,光子传给原子而使其运动的能量很小,散射波长的变化观察不到.这就是散射光中总有入射光成分的原因.

原子序数越大,被束缚紧的电子越多,因此散射光中波长为 λ_0 的成分强度越大.

Chap.9 Quantization of Light & Laser

波粒二象性

在讨论与光的传播有关的一系列现象(光的干涉、衍射、偏振、双折射)中,光表现出波动本性.当光与物质相互作用并产生能量或动量的交换过程中,光又表现出分立的量子化特征.这就是所谓的光的“波粒二象性”.

光子的能量:
$$\varepsilon = h\nu$$

由相对论
$$\varepsilon = mc^2 = h\nu,$$

光子的质量:
$$m = \frac{h\nu}{c^2}$$

Chap.9 Quantization of Light & Laser

光子的速度:
$$V = c,$$

光子的静止质量:
$$m_0 = 0,$$

光子的动量:
$$P = mc = \frac{h\nu}{c} \quad \text{或} \quad P = \frac{h}{\lambda}.$$

ε 、 P 是用来描述粒子的特征, λ 、 ν 是用来描述波动特性的物理量,普朗克常数 h 将这两种特征量联系起来.

Chap.9 Quantization of Light & Laser

德布罗意波:

实物粒子,如质子,中子,电子等,具有波动性.粒子的能量可表示为

$$E = h\nu,$$

动量可表示为
$$P = \frac{h}{\lambda}.$$

具有速度 v 的实物粒子的波长为

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

叫做**德布罗意波长**.这种波称为**德布罗意波**.

由于 h 很小,所以对宏观物体来说,其波动性很弱,如一块1克质量的石子,以一米/秒的速度运动,波长仅 6.6×10^{-31} 米,根本测不出.而对于微观粒子,由静止而被150伏高压加速的电子,其动能

$$eV = \frac{1}{2}mv^2, \Rightarrow v = \sqrt{2eV/m},$$
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meV}} = 1 \text{ \AA}$$

德布罗意因为提出物质波的假说,荣获1929年的诺贝尔物理学奖.



❖ Homework 9.1

Page 275 3 4
Page 290 1

