

光多普勒效应及应用

金永君

(黑龙江科技学院基础部 鸡西 158105)

一、光多普勒效应的物理原理

当光源和接收器之间有相对运动的时候,接收器受到的光波频率不等于光源的频率,这就是光学的多普勒效应或电磁波的多普勒效应。因为光是一种高速运动的物质,并且其传播不需要介质,因此光多普勒效应与声多普勒效应有本质的区别。下面按相对论的观点对光多普勒效应进行分析。

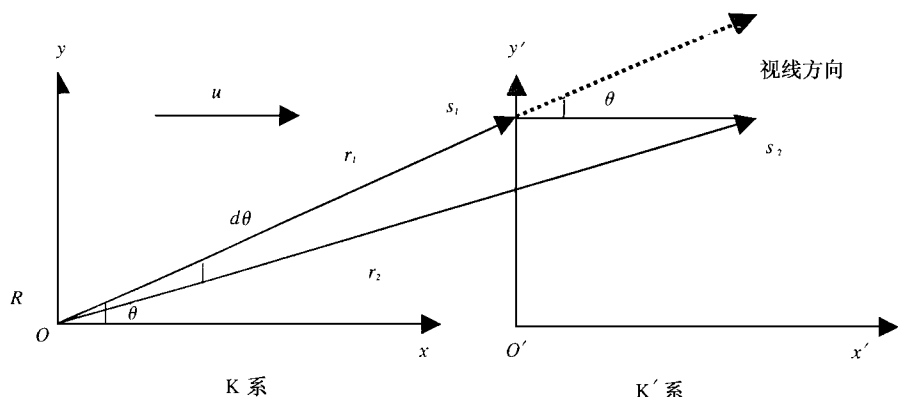


图1 光多普勒效应

参照图1,设接收器R固定在惯性坐标系K中的O点,单色光源S固定在另一惯性坐标系K'中,

其质量 $M = 10^5 / g \cdot 10^4 \text{ (kg/m}^2\text{)}$

地球表面总面积 $S = 4 R^2 = 5.101 \times 10^8 \text{ (km}^2\text{)}$ $5 \times 10^{14} \text{ (m}^2\text{)}$

$M = 10^4 \times 5 \times 10^{14} = 5 \times 10^{18} \text{ (kg)}$ $1/10^6 M_{\text{地}}$

例2 假设水分子之间是紧密排列的,试估算水分子的间距

解:1 mol 水的质量 $m = 18 \times 10^{-3} \text{ kg}$,又水的密度 $= 10^3 \text{ kg/m}^3$

1 mol 水的体积 $V = m / \rho = 1.80 \times 10^{-5} \text{ (m}^3\text{)}$

又1 mol 水的分子数 $n_0 = 6.023 \times 10^{23}$

每个水分子的体积 $V = v / n_0 = 1.80 \times 10^{-5} / 6.023 \times 10^{23} = 3 \times 10^{-29} \text{ (m}^3\text{)}$

若把水分子视为立方体,故水分子间距

$$d = \sqrt[3]{V} = \sqrt[3]{3 \times 10^{-29}} = 3.10 \times 10^{-10} \text{ (m)}$$

赵凯华先生在《定性半定量物理学》一书中,曾举了一个更加有趣的例子,即怎样用物理学的方

K系相对于K'系沿x轴以速度u运动,光源s位于y轴上某点,速度u和接收器R到光源s的连线夹角为θ,而θ角会随时间的改变而变化。相对K系静止的光源从K系的t1时刻开始发出一列光波,这个波列发射的截止时刻为t2,于是在K系中此波列发射时间为(t2 - t1),在这段时间内发射的波长个数为N,即光源的频率为:

$$\nu_s = N / (t_2 - t_1)$$

在接收器坐标系K'系中来看,此波列发射始于t1时刻,相应这一时刻光源位于S1处,此扰动以光速c向接收器传过来,传到接收器要用一段时间r1/c,所以接收到这个扰动的时刻是:

$$t_1' = t_1 + r_1 / c$$

在K系中来看,该波列发射截止于t2时刻,相应这一时刻光源位于图中S2处,从t1到t2这段时间内光源沿x轴方向移动了u(t2 - t1)距离。设(t2 - t1)很小,即(t2 - t1)很小,以致这段时间内角θ基本上不变。因此: ν_2

$$= \nu_1 + u(t_2 - t_1) \cos \theta$$

t2时刻光源发出的扰动传到接收器R的时刻为:

法来估算一个人一天需吃多少食物?他在此书中作了这样的估算:设人的体重为60kg,由于人体的大部分物质是水,若人体比热值取作1kcal/kg·K。设室温是300K,人体体温310K,则人体死亡后其尸体释放的热量为

$$Q = Cm(T_2 - T_1) = 60 \times 1(310 - 300) = 600 \text{ (kcal)}$$

,尸体降温按指数规律估算,上述数值相当活人半天内散热量的60%,也即活人半天内散热1000kcal,一天内散热2000kcal。由于葡萄糖的含热值为3.81kcal/g,则一个60kg体重的人一天食物量应为2000/3.81=520(g),相当一斤多一点。

这样的有趣估算实例告诉我们,物理学确实紧密联系着人类生活的方方面面。引导学生沿着素质教育的教学方向去学物理、教物理,主动沿着这条思路去开发、研制、编写物理问题和习题,那么物理教学的潜在领域真是大有可为。

$$t_2 = t_2 + \frac{r_1}{c} + \frac{u}{c} (t_2 - t_1) \cos \alpha_1$$

接收器 R 收到这 N 个波共用的时间为：

$$t_2 - t_1 = (t_2 - t_1) \left(1 + \frac{u \cos \alpha_1}{c} \right)$$

根据时间的相对性：

$$t_2 - t_1 = (t_2 - t_1) / \sqrt{1 - u^2/c^2}$$

根据接收器测得的频率可得：

$$r = \nu_s \sqrt{1 - u^2/c^2} / (1 + u \cos \alpha_1 / c), \quad \nu_r = \frac{N}{t_2 - t_1}$$

这就是光学多普勒效应的公式,式中的 u 是光源和接收器之间相对速度的绝对值, $u \cos \alpha$ 是光源速度 u 在视线方向上的投影。

如果相对运动发生在接收器和光源的连线上,这种情况下上面的光多普勒效应公式化简为：

$$\nu_r = \nu_s (c - u) / (c + u)。$$

这种特殊情况下的多普勒效应称为纵向多普勒效应。注意纵向多普勒效应公式中的相对速度 u 可正可负,光源与接收器相互离开时 u 为正 ($\nu_r < \nu_s$),互相接近时 u 为负 ($\nu_r > \nu_s$)。容易观察和被应用的也是光纵向多普勒效应。

在近代技术中光纵向多普勒效应有着广泛的应用。常用于测量运动物体视线速度,例如雷达向飞机发射已知频率的电磁波并接收回波,由回波与发射波频率之差可测定出飞机以多大的速度接近雷达。同理,观测人造卫星发射的电磁波的频率变化,可以判断卫星的运动情况,测量来自星体的光的多普勒频移可确定星体自转和运动的速度等等。

二、激光流速仪的原理和应用

利用多普勒效应原理研制的“激光流速仪”可以测量气体、液体的流速,可以测量人体中的血液速度,该仪器的基本原理如图 2 所示。从激光器 L 发出的单色光束,经分光板 A,一部分反射到流体的 O 处,另一部分透过分光板后再有反射板 B 反射到 O 处。这两束光都在流经 O 处的杂质微粒上发生散射(有时需在流体中人为掺入某种细小杂质)。散射时运动的微粒 O 先作为“接收器”感受到入射光,由于随流体一起运动,所以,它接收的频率不等于激光器频率 ν_s 。然后粒子以“接收”频率发出散射光。第一路入射光 AO 和流体速度分量 $u \cos \alpha_1$ 方向相同,而第二路光 BO 和流体速度分量 $u \cos \alpha_2$ 方向相反(如图 2(b)、(c) 所示),所以两种散射光的多普勒频移是不同的,其频率分别为 ν_1 和 ν_2 。应用纵向多普勒效应公式,由于 u/c 非常小,只取级数展开式的

二项,即得：

$$\nu_r = (1 - u/c) \nu_s$$

再把上式中光速 c 换成流体中光速 c/n ,式中 u 换成纵向分量 $u \cos \alpha_1$ 和 $-u \cos \alpha_2$,即可得到

$$\nu_1 = \nu_s \left(1 - \frac{u \cos \alpha_1}{c/n} \right), \quad \nu_2 = \nu_s \left(1 + \frac{u \cos \alpha_2}{c/n} \right)$$

用光电探测器 D 接收 OD 方向的散射光,由于 OD 垂直于流速,微粒散射的频率为 ν_1 、 ν_2 的光对探测器 D 不再发生多普勒频移(不考虑横向效应)。探测器接收到的两束散射光频率之差为：

$$\nu_2 - \nu_1 = \nu_s (u \cos \alpha_1 + u \cos \alpha_2)$$

因 $c/n = c/n$,而 $c = \nu_s \lambda$ (λ 是该激光在真空中的波长),若 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ 则得

$$\nu_2 - \nu_1 = 2 \nu_s u \cos \alpha$$

流速

$$u = \frac{\nu_2 - \nu_1}{2 \nu_s \cos \alpha}$$

频率相近的两散射光在探测器上相互作用而产生拍现象。光电探测器测出每秒钟光强变化频率,即拍频 ν_b 。已知 ν_s 、 n 、 α ,于是就可测出流速,这一测量方法是非接触式的,不影响流体流动的情况。激光流速仪的精度高,测量范围大,而且可以逐点测出瞬时流量。

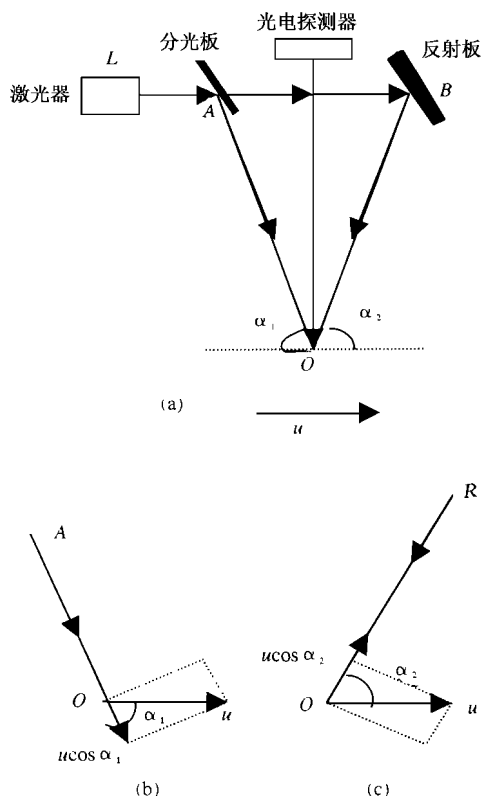


图 2 激光流速仪的原理示意图