

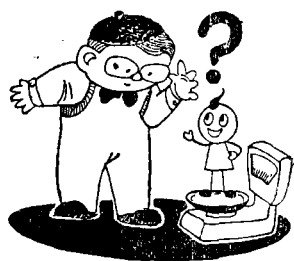
四百年前,伽利略曾利用实验深入地研究了落体和抛体的运动。后来,从盛传的比萨斜塔实验中,人们发现任何物体的惯性质量  $m_I$  都等于引力质量  $m_G$ 。

大约 80 年前,上述发现又成了广义相对论的基本出发点——等效原理。爱因斯坦还告诉我们,光子在引力场中也遵循这一原理。

能否在高塔上把光子下“抛”,来验证一下爱因斯坦的理论呢?第三届全国中学生物理竞赛(1986年)就有一道试题叙述了这个实验,该题<sup>[1]</sup>内容如下:

“有人从高度  $H = 22.5$  米的大楼上向地面发射频率为  $\nu_0$  的  $\gamma$  光子,并在地面测量接收到的  $\gamma$  光子的频率  $\nu$ ,测得的  $\nu$  与  $\nu_0$  不同,与理论预计一致。试从理论上求出  $(\nu - \nu_0)/\nu_0$  的值。”

实际上,该实验是由美国哈佛大学的 R. V. Pound 和 G. A. Rebka 在 1960 年做的<sup>[1]</sup>。他们以半衰期为 270 天的  $^{60}\text{Co}$  核为光源,发射 14.4keV 的  $\gamma$  光子,以  $^{57}\text{Fe}$  核为靶,光源高于靶子 22.6 米,在后者下方记录共振吸收的情况。为了消除核在发射或吸收  $\gamma$  光子时的反冲对光子频率的影响,他们利用了 Mössbauer 的方法,将  $^{60}\text{Co}$  和  $^{57}\text{Fe}$  分别嵌入两块铁板(一上一下)表面的晶格中,同时把温度降得很低。这就象把大炮埋在地里,反冲由整个地球担负一样,放射性原子核与铁板晶格联系牢固,极低温又把晶格振动减弱到最低限度,从而



杨 大 卫  
「光」有「重量」吗?  
· 现代物理知识中的典型习题 ·

### 五、农作物农学参数和生理参数的光谱提取方法

为了更好地监测农作物的生长情况,有必要了解农作物的一些农学参数(例如叶面指数等)和生理参数(例如吸收光合作用有效辐射系数、叶绿素含量等)。这些参数与农作物产量直接相关,它们也与土壤、水、肥料各类逆境(例如病虫害)及气象等因素有紧密关系。因此,在农学中测出这些参数就可为采取某种田间措施,达到增产的目的提供了依据。

农作物群体叶面积一般以叶面积指数,即单位土地面积中绿叶面积与土地面积之比来表示。在农学中,传统的测定叶面积指数有多种方法,它们的共同特点是从农田中拔取有代表性的若干数量的植株(例如 20 株),然后在室内测量叶片的面积或重量或厚度等。总之,传统的测量既是破坏性的测量,又手续很烦杂、费时。如果用光谱方法测定叶面积指数,则可克服上述缺点。在光谱方法测定中,经常使用近红外波段(例如  $0.76-0.90\mu\text{m}$ ) 反射率  $\rho_n$  和红色波段(例如  $0.63-0.69\mu\text{m}$ ) 反射率  $\rho_r$ 。笔者曾在麦田里测定冬小麦各个生长期下的  $\rho_n$  和  $\rho_r$ ,得出用以下二式估计小麦的叶面积指数具有最佳的效果

$$\text{LAI} = 0.592 \exp[3.64(\text{ND} - 0.3)],$$

当  $\text{ND} < 0.91$ ,

$$\text{LAI} = 9.52 \times 10^{-7} \exp[17.98(\text{ND} - 0.3)],$$

当  $\text{ND} \geq 0.91$ ,

其中 LAI 为叶面积指数,  $\text{ND} = (\rho_n - \rho_r)/(\rho_n + \rho_r)$ 。

光合作用有效辐射数量系数指的是能发生光合作用波段的入射光有多少比例被农作物截取(或吸收)。在农作物整个生长期内,它所吸收的光合作用有效辐射数量的总和直接与作物产量相关的,所以这个系数对于监测农作物生长情况和预报作物产量模型是很重

要的。我们可以测量农作物的光谱反射率  $\rho_n$  和  $\rho_r$ ,根据一定的光谱模型推算出这个系数。笔者测量了冬小麦的  $\rho_n$  和  $\rho_r$ ,得出利用下式估算小麦的光合作用有效辐射数量系数 PAR 是最可靠的。

$$\text{PAR} = 78.6\text{PVI} + 55.2,$$

其中  $\text{PVI} = 0.939\rho_n - 0.344\rho_r + 0.09$ 。

绿色植物内含有叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素等色素。这些色素尤其是叶绿素对植物光合作用起着极其重要的作用,直接影响光能的吸收和各类有机物(如淀粉、脂肪、蛋白质等)的制造。土壤中的水份、肥料、环境条件(例如气温、大气中  $\text{CO}_2$  含量、各种灾害)都对植物中色素的含量有影响。所以测定作物叶绿素含量对作物生长情况的监测是很重要的。

通常测量色素浓度有分光光度和目视比色法,它们的共同特点是首先采用破坏性的化学技术,用有机溶剂从叶片中提取色素,然后用光度计或有关方法进行测量。从 60 年代起有人采用非破坏性技术,测量新鲜叶片的光谱反射率,得出叶片总叶绿素含量。近年来有人用一种反射光谱比例分析方法,可以非破坏性测量新鲜叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量。所谓反射光谱的比例谱是待测物的反射光谱除以一个参考物的反射光谱所得的比例谱。这个比例谱将加大某些波长处的光谱差异。例如对于叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素可选定 675、650 和 500nm,它们分别为叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的吸收波长。他们研究了大豆叶片色素含量和叶片光谱反射率之间的关系,用以下式子计算色素含量是很准确的。

$$\text{叶绿素 a}(\mu\text{g/mL}) = 22.735x - 10.407,$$

其中  $x = (S_{675}/S_{500})/(R_{675}/R_{500})$ ;

$$\text{叶绿素 b}(\mu\text{g/mL}) = 2.94y + 0.378,$$

(下转第 11 页)

使该装置的频率稳定性高达  $10^{-12}$ 。实验测得,

$$\Delta\nu/\nu = (\nu - \nu_0)/\nu = (2.57 \pm 0.26) \times 10^{-12}.$$

这说明,光子在地球重力场的作用下能量有了变化。由能量守恒可知,光子动能 ( $\varepsilon = m_I c^2$ ) 的增加等于引力势能 ( $U = -GMm_G/r$ ) 的减少。如果等效原理对光子成立 ( $m_G = m_I = h\nu/c^2$ ),那么

$$h\nu - h\nu_0 = \frac{GM(h\nu/c^2)}{R} - \frac{GM(h\nu_0/c^2)}{R+H}. \quad (1)$$

因为在地面附近  $\frac{GM}{R(R+H)} \approx \frac{GM}{R^2} = g$  (重力加速度),所以可把(1)化为

$$\Delta\nu/\nu = gH/(c^2 - gR) \approx gH/c^2 \approx 2.46 \times 10^{-12}. \quad (2)$$

此值与实验结果相符。

1964年,Pound又与J. L. Snider合作<sup>[2]</sup>,使实

验值与理论值之比达到了  $0.9990 \pm 0.0076$ ,在很高的精度上验证了爱因斯坦的理论。

另外,若将光子改作竖直上“抛”,其频率会变小,我们称此现象为“引力红移”。红移量  $Z \equiv [1 - GM/(c^2 R)]^{-1} - 1 \approx (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0 = (\nu_0 - \nu)/\nu = -\Delta\nu/\nu$ ,从地面到“无穷”远,重力场产生的红移  $Z = GM/c^2 R$ 。如果说“重量”是物体受重力场作用大小的量度,那么现在可以回答说,“光”在重力场中确实是有“重量”的!

### 参 考 文 献

- [1] R. V. Pound & G. A. Rebka: Phys. Rev. Letters, 4, 337(1960).
- [2] R. V. Pound & J. L. Snider: Phys. Rev. Letters, 13, 539(1964).
- [3] 全国中学生物理竞赛参考资料(竞赛委员会办公室主编),1987.

## 中国物理学会第三届胡刚复、饶毓泰、叶企孙、吴有训物理奖获奖项目、获奖者和主要贡献(续)

### 二、饶毓泰物理奖

获奖项目:“光抽运铯束频率标准”

获 奖 者: 杨东海、王义道

主要贡献: 光抽运铯束频率标准是目前时间计量领域的前沿课题,其测量的准确度对现代物理学有重要和深远的影响。

本项目在过去研究的基础上,又实现了新的突破。其一是首创了偏置一铯和吸收半导体激光频率锁定法,使半导体激光的频率能够长期稳定准确地锁在设定的原子跃迁频率上;其二是提出并实现了斜入射光检测方案,使半导体激光的频率始终保持在原子跃迁谱线的峰值位置,减小了各种因素引起的频率变化,提高了信噪比,也有利于提高频率准确度;其三是发明了数字式辅助锁定环路,扩展了主锁环路的动态范围和增益,使频标能长期连续稳定工作。

由于这些突破,使钟跃迁信噪比达 8100,频标稳定度达到  $1.2 \times 10^{-11}/\sqrt{\tau}$ ,实现了频标长时间连续运转,首次给出了这种频标的天稳定度达  $2 \times 10^{-13}$ 。

### 三、叶企孙物理奖

获奖项目:“固体薄膜中离子束诱导非晶化和分形生长”

获 奖 者: 柳百新

主要贡献: 柳百新教授用离子束注入实验手段来研究薄膜中的分形生长,是分形物理研究方法上的重要创新,从而能观察到实际生长过程中的具体情况。这既可以验证理论和改进模型,又可以更好地了解分形生长过程中存在的实际物理因素,以利深入研究。

本项目的主要成果有以下几个方面:

1. 实验上首次用离子束方法研究薄膜中的分形生长问题。系统地观察了一些合金薄膜中分形过程的基本特点,例如碳离子直接注入到金属薄膜中形成了类DLA(diffusion-limited-aggregation)分形;合金薄膜(如 Ni-Zr, Co-Yb 等)的分形凝聚过程是多核心过程,而不是单核心DLA过程。

2 首次发现磁性粒子之间存在相互作用对分形维度  $df$  的影响可表示成  $df$  与  $\mu_B$  的线性关系。这对带磁性的粒子分形生长机制的研究提供了基础。

3. 在综合许多薄膜分形过程的实验基础上,找到了一些物理参数之间的相关性。作者用这些物理参数及其关系进行了薄膜的分形过程的计算机模拟,得到了与实际情况比较相符的结果。这表明,离子束方法是对分形进行实验研究的有力手段。

### 四、吴有训物理奖

获奖项目: 北京谱仪上  $\tau$  轻子质量的精确测量

获 奖 者: 李 金、漆纳丁、薛生田

主要贡献: 李金、漆纳丁、薛生田等同志首次采用在  $\tau$  轻子对产生阈值附近扫描的方法,测量  $\tau$  轻子质量,得到

$$m_\tau = 1776.9^{+0.4}_{-0.5} \pm 0.3 \text{ MeV}$$

此结果比原有的世界平均值降低 7.2 MeV,测量精度提高 5—6 倍。这一结果使  $\tau, \mu$  的轻子耦合常数平方比值更向轻子普适性靠近(由原先的世界平均值与粒子物理标准模型预言存在 2.4 $\sigma$  的偏离下降为 1.7 $\sigma$ )。

他们的这一成果是近年来粒子物理实验中较重要的新结果之一。在国际同行中受到重视和好评。

三位获奖者在这项工作中都做出了突出的贡献。