

光从哪里来

朱世豹



人类离不开光。太阳光为万物创造生机;电光源是现代文明的基石。我们通常所说的可见光,是指波长从 0.77 微米(红光)~0.39 微米(紫光)的电磁波。电磁波从红光向下可延伸至 3×10^{10} 微米,从紫光向上延伸可达 4×10^{-9} 微米。至今,电磁波谱尚无确切的起点和终点,各个区域之间也没有清晰的界限。

从 17 世纪中到 20 世纪初的 200 多年中,关于光的本性的探索经历了几次重大的发展,从牛顿的微粒说,到惠更斯、傅科、麦克斯韦的波动说,再到爱因斯坦的光子说。光的主要特性有波粒二象性和光速不变性等。

从 17 世纪中到 20 世纪初的 200 多年中,关于光的本性的探索经历了几次重大的发展,从牛顿的微粒说,到惠更斯、傅科、麦克斯韦的波动说,再到爱因斯坦的光子说。光的主要特性有波粒二象性和光速不变性等。

光速不变性是狭义相对论的两条基本原理之一。光在真空中的速度 c 是物理学的普适常数,现代技术的测量精度可达十位数,而计算使用值为 3×10^8 米/秒。光速等于光的频率与波长的乘积,而与光源的运动无关。按麦克斯韦方程

$$c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$$

式中 ϵ_0 和 μ_0 分别为真空电容率和磁导率。

波粒二象性是量子力学的基础。光的波粒二象性认为,光既是粒子,又是波,而且随条件的不同有所侧重,可用下列公式表示:能量 $E = h\nu = Pc$,动量 $P = h/\lambda = h\nu/c$,光子的静质量为 0。

式中 h 为普朗克常数, ν 、 λ 、 c 分别为光的频率、波长和光速。其中 ν 和 λ 为波的参数,而 E 和 P 则是粒子的动力学参数, P 又与波矢 K 相联系, $K = 2\pi p/h$ 。光子能量与频率成正比,可见光为 eV 数量级,50Hz 电力线路辐射的光子能量为 $1/10^{13}$ eV, γ 射线光子能量达 10^6 eV,现代物理学把光子和轻子、夸克放在同一层次上,视为物质结构的基元。有人估算宇宙中光子的总数目为 10^{88} ,即构成物质的一个原子核对应 100 亿个光子。

光从哪里来?我们将错综复杂的发光现象和光源大致归纳成几类:热辐射、激发辐射、韧致辐射、受激辐射、同步辐射、热核反应、物质与反物质湮灭、某些粒子衰变、物质运动及真空激发等。

具有一定温度而发生电磁辐射的现象称为热辐射。黑体、热炽灯、大地表面及所有物体都是一个热辐射器。当物体被加温至 500°C ,发出明显的红光,随着温度升高,依次发出橙色、黄色、蓝色光。太阳表面温度约为 6000°C ,发出的光呈黄色,而蓝色恒星的表面温度约 12000°C 。白炽灯泡的钨丝通电达到 1500°C 时会发出白光。

激发辐射俗称“冷光”或简称“发光”,它是依靠各种激发过程并非因温度获得能量进行辐射的。受电场激发的称为“场致发光”,如场致发光灯;受外来光线激发的称为“光致发光”,如日光灯就是利用灯管内汞蒸气放电产生紫外线激发荧光物质使其发出可见光;受阴极射线激发的称为“阴极射线发光”,如电视屏、计算机屏;受高能粒子激发的称为“高能粒子发光”,如闪烁计数器;受气体放电激发的称为“电致发光”,如钠灯、金属卤化灯;依靠化学变化能量产生的称为“化学发光”,它由化学反应形成电子激发态,持续时间约 10^{-14} s 而导致光发射;依靠生物体能量发光的称为“生物发光”,如萤火虫。现已发现,在生物活体中普遍存在超弱发光现象。值得一提的是 LED 和 LCD。LED 是一种在外加电压作用下会发光的半导体二极管,广泛用于光通信、数码显示和远红外遥控器中;LCD 是液晶,它是一种将直接光源调制后产生的间接光源,经过数十年的发展,现已广泛地应用于各种显示屏中。绚丽多彩的北极光是由于地球两极的大气层受到宇宙射线的激发而产生的。

X 射线是继电光源后人类应用的第二大光源,一般用高速电子流撞击阳极金属靶而获得,属韧致辐射。“韧致”辐射是指加速运动的电子受阻,将电子动能的变化量转换为光子辐射,韧致在德语中是“煞车”或“慢化”之意。X 射线的波长为 $0.01 \sim 10 \text{ \AA}$,波长短的称为硬 X 射线,其波谱与 γ 射线重叠。

1917 年爱因斯坦预言了受激辐射的存在,1960 年梅曼研制成功激光器。激光的基本原理是,处于激发态的物质粒子(如掺少量激活离子的玻璃和晶体,氩、二氧化碳等气体,砷化镓等半导体材料,某些有机或无机液体等)在光辐射的刺激下,引起从高能态向低能态的跃迁,并把两个状态之间的能量差以光

子发射出去。只有当外来光子能量正好满足此能量差时,才能引起受激辐射。激光的主要特点是单色性好、方向性好、相干性好和能量高,激光被称为人类第三大光源,大到用于研制武器,小到用于移动细胞或打掉化合物中的电子。

同步辐射是圆周运动的电子束产生的辐射,是一种单色性和偏振性好的强光源。在同步回旋加速器的发展过程中,同步辐射曾一度被认为是阻碍粒子能量进一步提高的障碍。一个现有同步辐射装置,其圆周长为 100 米,电子能量为 500MeV,同步辐射波长为 10^3\AA ,属紫外波段;若电子能量增加到 5GeV,波长可缩至 1\AA ,在 X 射线波段。上海已开始建造频率为 X 射线波段的强大的同步辐射装置。同步辐射光源是开发新材料新工艺必需的,例如用作超大规模集成电路的光刻,人们将其视作继激光后的第四大光源。

众所周知,太阳光和星光起源于核反应,但人类认识这一机理至今才 60 余年。费恩曼在《费恩曼物理学讲义》中对此作了生动的描绘:(二次世界大战期间的)某天晚上,一位发现恒星必须进行着核反应才能发光的年青物理学家和他的女友出来散步,女友对他说:“看哪,这些闪耀的星星多美啊!”他回答说:“是啊!此时此刻,我是世界上唯一知道它们为什么发光的人”。核反应释放大量的 β 和 γ 射线,温度骤增形成高能量可见光。尽管太阳能量只有二十亿分之一落到地球,但是夏天,在地球表面 1m^2 的面积上可获得 1kW 的光能。宇宙中存在数以百亿计的星系,每个星系又包含数以百亿计的恒星。已经观察到的超新星爆发,其亮度要超过 10 亿颗太阳。

物质和反物质湮灭能产生光。反物质于 1932 年已发现,但至今其性质尚未被充分发掘出来。实验表明,电子和正电子湮灭的速度与物质所含的电子数有关,对一些有机分子可达 1 纳秒。

有的粒子衰变会产生光子,例如 π^0 介子不稳定,很快衰变成两个光子。

分子运动(包括振动、转动和其中的电子运动)能产生光。分子光谱学已成为研究物质结构的重要工具。

根据德布罗意波的理论,凡有质量运动的物体都会伴随物质波产生,只要动量足够大,其波长就会进入电磁波谱内,例如,0.05eV 热中子的德布罗意波长为 1.28\AA 。

发光还与磁场有关。粒子沿磁力线高速运动会发光。已经发现,磁星(高能但却短命的脉冲星)在其磁场减弱时会引发强烈的 X 射线和 γ 射线暴发。

从物理学和哲学观点看,光具有时间和空间的普适性。光始终存在于时间的长河中。宇宙大爆炸是在微小空间即时形成超高温、放射性的火球,在夸克和反夸克的碰撞中产生大量光子。宇宙大爆炸之初,就是以辐射为主的。随后辐射与物质脱离,残存至今,仍有 3K 微波背景辐射。即使对因大恒星坍缩形成的光都逃逸不出的黑洞,其内部仍充斥着 X 射线。用现代望远镜可探测数十亿光年之处的星系发出的光,它告诉我们宇宙年青时的模样。像历史学家一样,宇宙学家依赖光认识到,开启未来的钥匙在于过去。光普遍存在于空间的每个角落。光子是电磁作用的媒介,电磁场的量子便是光子。真空并不是真的空,它充满着川流不息的一群群瞬时存在的“虚”光子(存在时间不超过 10^{-21} 秒),若从外界补充足够的能量,那么就能变成光子。按量子引力的超对称理论,费米子可变换成玻色子,因此物质和光具有一种共同的渊源。光无时无地不在:数以万计的电视和无线电广播信号,来自中子星的射电脉冲,来自几百万颗正常星体的射电噪声,微弱的宇宙背景辐射,来自太阳和我们星系中心的辐射,可能来自地外生命的通信以及其他电磁辐射此时此刻正通过你的房间!

综上所述,我们能否寻求产生光的共性的机理?电动力学和量子力学对此各有诠释。根据经典电磁理论,我们可以得出电磁波来源于电子(电荷)的加速运动的结论,或者说电磁波来源于随时间变化的电流,也可说它来自随时间加速变化的电场。实际上,通过对麦克斯韦方程的微分和组合,总可以形成二阶微分方程:

$$\frac{d^2\psi}{dX^2} + \frac{d^2\psi}{dY^2} + \frac{d^2\psi}{dZ^2} = \epsilon_0\mu_0 \frac{d^2\psi}{dt^2}$$

这就是三维波动方程,式中 ψ 表示磁通密度 B 或电场强度 E 的分量,而对 E 的时间二阶导数即是电荷的加速运动。1888 年赫兹的著名实验,采用的就是一个感应线圈连接两根共轴的有间隙的铜杆,形成电振荡偶极子,由其中电荷的加速变化产生电磁波。上述的基于韧致辐射原理的 X 射线,就是在加速电势作用下入射电子动能的损失转化为光子的,而动能的骤减源于电子的负加速度。同步辐射可视作是由作圆周运动的电子向心加速产生的,随着

物理文化论

程民治 汪业群

随着物理学的深入发展,特别是自1901年以来百余年中一个个诺贝尔奖成果的相继出现,以及物理哲学研究的不断深化,人们愈来愈认识到,物理学的发展与人类文化休戚相关,物理学一直是人类文明主要的文化力量,同时人类文化的进步又极大地影响了物理学的发展。于是,在20世纪末期,便出现了“物理学——一种文化体系”的物理哲学观。更确切地说,作为一种文化现象的物理文化从属于科学文化,是科学文化的一个子系统。现拟就这个问题,笔者不揣陋浅,敢布鄙见。

物理文化的内在涵义

我们知道,文化概念的形成,是以人类活动本身为基础的。但由于各个国家、各个民族、各个时期的文化特征表现互不相同,这就造成了人们对文化的内涵及其外延存在着形式各异的理解,因而对文化的定义也就不尽一样,甚至可以说是琳琅满目,令人目不暇接。即便如此,但只要纵观近代中外众多著名学者对文化概念的基本含意所做出的种种解释,我

们就不难发现文化具有人化的特征(按:人是文化的创造者,文化的世界始终是人类自己创造的世界,文化是一种人化的现象);文化是一个庞大的系统(按:人类文化或曰地球文化系统可分为人文文化和科学文化,其中科学文化又可分为数学文化、物理文化、化学文化和生态文化等);文化可分为三大要素,即文化的心理要素(按:它包括思维方法、思想观念、价值观念、科学意识等),文化的行为要素(按:它包括规范、风俗、习惯、生活制度等),文化的物质要素(按:它包括各种生产工具、生活用具,以及其他的物质产品);文化含有五个方面的内容——物质设备、精神产品、语言符号、社会组织 and 道德风范。

基于以上分析,我们便可对什么是物理文化,作一个基本的界定。

第一、科学精神

作为人文精神重要组成部分的科学精神是物理文化的核心,主要体现在三个方面:首先,科学作为一种认识活动,对真理和知识的追求并为之奋斗,是

带电粒子能量的不同,辐射的频率也不同。摇摆器(wiggler)是一种新型光源,其基本结构是电子在磁极间往复运动,可制成自由电子激光器,其基本原理也是依靠电子在弯曲运动过程中速度的改变产生辐射的。

量子力学的数学基础是状态函数,粒子和光的作用以哈密顿量表示。在热辐射中,光的产生源于电子能级改变——跃迁。当电子从外层轨道跳向内层轨道时将发射光子,越靠近核,波长越短。玻尔的氢原子模型是量子论的经典之作,计算与实验结果一致,虽然不适合含两个以上电子的原子和分子,但是关于能级或态的概念仍在沿用着。爱因斯坦的受激辐射理论是分析跃迁中两个态的简并数和能级差,使高能级的原子数大于低能级的原子数,实现粒子数反转,这是产生激光的必要条件。分子发光包括分子中电子运动、分子振动和分子转动3个层次的能级差。对双原子分子,分子转动能级差约1eV,分子振动时会产生电荷分布形成电偶极矩。当微观粒子系统(原子核、原子、分子等)的内部能量高于系统的

最低能量状态(基态)的能量时,我们常称其所处的量子状态为激发态。实际上,原子之所以处于激发态,是因为其中电子获得能量(通过吸收光子或其他粒子相互作用等)的结果。因此,从因果关系看,这种“态”的发光机理与经典电磁理论是一致的,只是迄今为止,两者在数理上尚未完全相洽。

光从哪里来?这个关于光的本性的问题,是个最普通的却可能是最深奥的问题。1951年底,爱因斯坦已近垂暮之年,但他对自己提出的光量子仍持保留态度。他写信给贝索说:“这50年来,冥思苦想并没有让我接近这个问题的答案;什么是光量子?当今任何一个普通人,都认为他知道这个答案,但是他是错的”。当代,光量子已写进物理教科书中并被命名为“光子”。但是,科学大师这段话却仍值得我们去回味,值得我们在光的世界中继续遨游。至少,至今人们对光和物质作用的细节仍不很清楚。历史已经证明,一旦有新的发光机理出现,往往会引发技术上的巨大应用。

(江苏苏州市彩香一村二区19-303 215004)