

用今天的知识来解释就是：蜡烛燃烧的光亮是来自没有完全燃烧的高温微炭颗粒的黑体辐射。法拉第的时代里还没有黑体辐射的概念以及普朗克辐射公式。但是法拉第证实了灯的光亮是来自高温微炭颗粒——不完全燃烧的产物，而不是来自所谓的“燃烧”。因为同样是燃烧，氢气或酒精的燃烧就没有像蜡烛那样的光亮，几乎看不到火苗。由于蜡烛发光需要同时制造出高温“发光体”的炭粒，所以蜡烛式的光源必然是低效率的不完全燃烧。因此单纯提高蜡烛的燃烧效率反而会因为炭粒的减少而使火苗的“亮度”降低。



图2 汉代的长信宫灯。使用反射面来增加光亮的技术

随着工业革命的来到，人们对光的需要也越来越迫切。比如用蒸汽动力就需要开采地下的煤炭作燃料，黑暗的矿井内需要高效率、安全的照明。发达的海运业也需要建设导航用的灯塔，在黑暗中识别海洋上船舶间的距离和行进方向（图3）。这些实际需求迫使人们开始规范灯火照明，制定照明的标准。日常人们所说的亮度一般对应着学术中的“光度”。在国际度量衡体系的七个基本单位中，有一个是评价光源光度的单位——烛光（堪德拉 *candela*）。由此也可推测照明在人类活动中的地位。1860年英国制定的光度定义是：1/6磅（约75.6g）的鲸鱼油蜡烛在每小时120戈令（=7.78g）的燃烧速度下产生的光亮。按照鲸油的燃烧热30 kJ/g换算，蜡烛的燃烧功率约是65W。这个蜡烛发出的光亮是一个“烛光”。将一个“烛光”的光度换算成光通量（光束）就是 4π “流明”（lm）。流明是一个考虑了人眼感光特性的光通量（光束）单位。由此可以算出，蜡烛燃烧作为光源的变换能效（*efficacy*）为0.18 lm/W。如果不用流明来计测光亮，还可以直接采用使用输

入功率转换成辐射功率的百分比效率（*efficiency*）来评价装置的效益。这时蜡烛的发光效率还会显得更低，大约是lm/W数值的1/5~1/10。也就是说，蜡烛照明体系的能量光亮变换率仅仅只有1.8%。现在的光度定义是：540 GHz的单色光（黄绿色）在所定方向的辐射强度为 $\frac{1}{683}$ W/sr时的光度为1烛光。这里的W是功率单位的瓦，sr是立体角的单位立体弧度。这个奇妙的定义是为了保持与当初烛光定义的连续性和继承性以及人眼的感受性。



图3 现代灯塔的光源。上百万烛光亮度的电灯+菲涅尔透镜（大型的直径可达1米以上）

煤碳的出现也为照明提供了新形态的燃料，使照明用的能源从动植物性油脂转变成了煤气。当初，为了保证夜间的治安、为了能让工人24小时夜以继日地劳动，城市里的街道、工厂里的车间也都需要照明。传统的蜡烛已经无法满足这样的需求。因此，利用特殊的耐高温汽灯纱罩作高温发光体的新光源技术就应运而生了。那时人们虽然还不知道黑体辐射以及物质发光的基本原理，但根据日常经验，知道通过高温物体能得到更亮的照明。用现代的知识解释就是：发光黑体的温度从蜡烛的一千度提升到汽灯的二千度时，根据辐射能量是温度 T 的四次方的斯蒂芬-玻尔兹曼辐射公式，其辐射能量可以提高16倍。如果再考虑到光谱的分布和人眼的感受性，明亮度的改善比16倍还要多。

提高煤气、灯油的燃烧温度在技术上比较容易，只要有充分的氧气供给就可以实现了。相比之下，要获得耐高温的灯芯材料以及在低温度条件下也容易发光的材料乃是技术上的难题。北欧处在高纬度的地理环境中，冬季里黑夜时间长，对高质量、高效率的照明光源有着迫切需求。如何获得便宜的、耐高温的灯芯材料呢？人们找到了二氧化钍

(ThO_2)，并掺杂少量的铈元素来配合发光。 ThO_2 是一种耐高温的材料，融点在 3390°C ，不必担心被烧毁。元素钍是 1829 年在北欧著名的斯堪得那维亚矿山地带被发现的，很快就被用来作汽灯的纱罩了（图 4）。汽灯纱罩是纤维网袋用钍和铈的硝酸盐溶液浸泡后制作的。没有使用时很软，跟一般的纤维没有多大区别。高温烧结后纤维变成二氧化碳飞走，只剩下常温下白色的二氧化钍的脆壳。掺杂铈元素是利用了化学的焰色反应增加光亮。这是个新的、不同于黑体辐射的发光机制。一百多年前的这项发明一直延续使用到今天。如今，在没有电的时候，照明主力依然是靠汽灯这类的燃油光源。这个技术革命使照明光源的发光效率比蜡烛提高了约十倍，光能的转换效率可以达到 2 lm/W 的级别了。



图 4 可以高温燃烧的汽灯
玻璃灯罩内的白色网是作灯芯的纱罩没有用过时很软，
烧过之后就变成很脆硬的网罩了

闪电是另一种人们常见的天然光源（图 5）。而电弧灯的发光原理就雷同于闪电。通过电弧放电可以获得比化学燃烧更多的光亮。因此早在 19 世纪中叶，电弧灯就被用在导航的灯塔上了。电弧的发光原理显然不同于热光源。用今天的知识看，电弧的光亮，除了高温的发光之外，更主要的是来自激发态的原子回到基态时的发光现象。在电弧中的原子可以被很有效地激发，而要通过燃烧的氧化反应把原子激发到那种能级的概率就很低了。电弧灯除了发出哗哗叭叭的响声、冒烟以及电极的损耗外，其

发光性能几乎可以与太阳光比美了。在氙气放电灯登场之前，拍电影、舞台照明都要用到碳电弧灯。

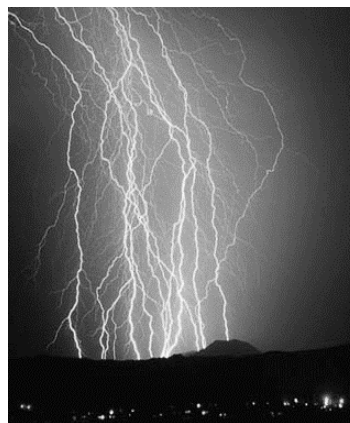


图 5 自然界里的放电现象
发光体的电弧能量约为几百万电子伏特

将大气中的放电现象移植到玻璃容器里（盖斯勒管、克鲁克斯管）、并且改变电极或放电气体的种类、控制放电气体的压力以及调节电极的电压就是今天各种类型放电光源、放电器件的雏形了。从物理学发展史上看，放电管无疑是个极为多产的“富矿脉”。从过去的阴极射线、X 射线和真空管到今天的纳米碳管等重大的发明、发现都是出自这貌似简单的玻璃容器。研究放电现象本身需要更复杂、更高级的实验设备。因此这类研究的初始投资很大。比如最早作碳棒的电弧实验时，一次就使用了两千个伏打电池的串联。那时还没有干电池，两千个电池的费用和所占用的空间都是很可观的。

灯火照明的致命弱点是使用明火。燃烧需要燃料和空气，既有污染、也不安全。而用电热灯丝可以克服这些弱点、改善照明的环境。除了发电、送电的问题之外，电力照明的主要技术难点是制作耐高温的高电阻灯丝。电灯丝和汽灯罩的研究和探索有着相似的历史。电灯丝材料需要耐高温、好制作以及导电性和耐用性。人们曾试过用白金和其他金属作灯丝，也曾抽真空防止灯丝氧化。各种材料都尝试了之后，筛选下来的只剩下炭丝了。为了能够得到长寿命、廉价的炭灯丝，爱迪生发明了用竹子作原料烧出的炭灯丝的制造方法（1880 年），并由此获得了商业上的成功。直到 1910 年，人们才得到了更理想的钨灯丝。金属钨的熔点在 3654K ，高温下的蒸气压也很低，是理想的灯丝材料。早在 18 世纪金属钨就被发现了，但是要把它加工成电灯丝

的钨丝，还需要有较高的加工技术。要得到适当电阻率的灯丝，钨丝就必须拉得很细；要保证有足够的发光空间，就需要有充分的灯丝长度。为此，钨灯丝在制作技术上采用了双重螺线的办法：先把很细的钨丝绕成螺线，然后将这个螺线再次绕成螺线灯丝。今天的灯丝一般也都保持着这样的结构。为了保证灯丝的使用寿命，要求灯丝的电阻率具有很高的均匀程度。如果电阻率不均匀，就会导致灯丝某处局部过热，缩短灯丝的使用寿命。电灯芯采用钨丝照明后，灯芯温度得到了进一步提高，今天光亮对能量的转换效率已经可以达到 20 lm/W 的级别。虽然灯丝温度只有 3000°C ，比太阳表面的 6000°C 要低很多，但是其照明的显色效果已经很好了。

从技术含量的观点看，加热灯丝是最低级的用电方式。但低技术含量也意味着低成本，有利于商业普及。很紧凑的灯丝可以使光源的另一个指标——辉度 (cd/m^2) 达到很高值，有利于光源与光学系统的匹配。在灯泡里添加卤族元素的技术可以使高温蒸发了的钨又重新沉积到灯丝上，延长灯丝的使用寿命。今天投影仪使用的光源基本上都使用这类卤素灯。一百年来白炽灯的技术虽然不断改进，但在光能转换能率上并没有什么根本的变化。

用光度来评价光源起源于人的视觉。虽然很有实用价值，但并不是一个好的物理评价指标。为了更全面地评价光源的性能，人们需要定义一个物理量——辉（亮）度（*brilliance*）。辉度是单位时间、单位面积（或体积）、单位立体角、在某个波段处的单位频带宽内发射的、具有某种偏振特性的光子数（或能量）。这里的单位 $\times \times$ 可根据实际需要来选择。比如日常中的单位时间可以选用每秒，脉冲光时就要用每纳秒。由于辉度是表述光源本质的物理量，所以一个光源的辉度数值不能被光源外部的任何光学系统改变。比如利用镜头组降低了光束的发散度就必然会导致光束直径尺寸的增大，反过来，通过聚焦改善光密度会增大光束的角度发散。光源的改质通常付出最大牺牲的是光强（单位时间内的光子数）。从技术的观点看，一般只有足够强的光源才能补偿光源改质带来损失。因此开发更高辉度的技术乃是光源开发的关键所在，光源物理学发展走过来的道路也证明了这一点。

发光形态可以有各种分类，但从溯源的角度看，

只有电子是发光的主角。爱因斯坦对发光更有其独特的看法。他认为发光机制只有两种——自发的（*spontaneous*）和受激的（*stimulated*）。前者对应着粒子由激发态回到基态时释放光子的过程，后者则是爱因斯坦在奇迹年（1905 年）里的重大发现。这个受激的发光就是几十年后激光的工作原理。增加总的发光体数量相当于增加灯捻、多用灯泡。这类做法虽然可行，但没有什么技术含量。增加发光电子的密度在技术上也会障碍重重。因此，对发光电子系统高效率地提供能量、维持其高密度的激发状态是技术开发的一个有效途径。由于热光源把能量主要提供给了无发光作用的原子振动系统，所以能量的发光转换效率必然会很低。放电激发是一种把能量直接输送到发光电子系统的方法，所以其效率较高。但是由于原子中电子能级的量子化，这种高效率激发的发光得到的是几条辉线而不是连续光谱，还很可能不在可见光的波段里。这类光源虽然可以有很高的转换效率，也很亮，但演色效果差。比如高压水银灯、高压钠灯，这些放电光源的能量转换率可以达到 200 lm/W 的级别。由于这类光源的转换效率高，所以也很容易制成大功率的光源。这些大功率的光源通常用于体育馆等公共设施的大规模照明。

日光灯属于小型的、适用于家庭照明的光源。其原理是利用低压（几百 Pa 的惰性气体和 1Pa 的水银蒸气）电离时产生的等离子体。电子在电场中被加速获得能量。为了使电子获得足够的加速时间，可以通过降低气体密度来提高粒子的平均自由程。但这样一来，发光粒子的密度就会变低，日光灯的辉度也要随之降低。为了补偿这个下降维持整体的光通量，就必须把灯管做得很长。水银离子从激发态回到基态时主要释放出 254nm 的紫外线。发射出来的紫外线可以通过管壁上涂布的荧光材料转变成成为可见光，并且可以通过日光灯使用不同的荧光材料调节最终照明用的光谱。由于这类荧光材料的光转换效率一般都在 90% 以上，日光灯也是一种比较理想的照明用光源，其光能的转换效率在 100 lm/W 左右。

上述的发光机制都是自然界里存在的。20 世纪以来，近代物理学的进步使人们对物质结构、以及物质与电磁场的相互作用有了比较深刻的理解。基于这种理解，20 世纪中叶以后人类发明了一些新的

发光机制。其中一个典型代表就是发光二极管(LED)。LED是将具有直接能隙的P型和N型的半导体材料结合在一起形成的。当施加顺电压到LED上时,N型半导体传导带中的电子与P型半导体价电带中的正孔跨越能隙相结合,直接把输入电能转化成对应着PN结能隙波长的单色光(图6)。不同的半导体材料有不同的能隙。比如GaAlAs的能隙对应着660nm的红色,InGaN有对应着520nm的绿光和390nm的蓝光的能隙。AlInGaN材料的能隙对应着紫外光。由于发生在固体当中的这种“发光体”(=电子与正孔的结合)密度要远大于放电气体中离子的密度,所以LED发光的辉度高,发光的转换效率也比较高,目前可以达到100~150 lm/W的量级。即便是LED达到了100 lm/W的转换效率,输入电功率的70%依然要以热的形式损失掉。因此,发光的高密度同时也意味着器件发热的高密度。由于发光器件的温度直接影响半导体材料的性能,所以LED很难实现大功率的器件。LED对发光器件的冷却设计比传统光源的显得更重要,对电源稳定性也比传统光源要求得更苛刻。

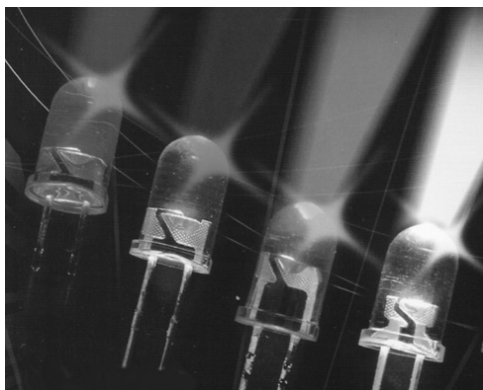


图6 LED的发光。发光二极管可以利用PN结处的能位差将电能转换为光能

原子系统从激发态回到基态时有多种途径。其中一个是通过释放光子等于辐射的方法,爱因斯坦称之为自发辐射。为了解释普朗克的辐射公式,爱因斯坦认为还需要考虑辐射场与辐射系统之间的相互作用,并称此项为受激辐射。受激辐射就是在有辐射场诱发条件下系统从激发态回到基态的过程。由于辐射场的媒介作用,发光体之间的发光不再是各自行事,而是具有了时间和空间的相干性(coherency)。发光的强度也不再是与发光体的数量N成比例,而是与 N^2 成比例。比如发光体的数

量有 10^{10} ,古典自发辐射光强比例于 10^{10} ,而在形成激光时,光强就要比例于 10^{20} 了。这时的光强变化就不是几倍、几十倍的形式了。进入激光光源的时代以后,光源的应用领域就不再是照明这样的单一用途了。评价光源也不再是议论多少烛光、多少流明的问题,而是要进一步评价光源的质量——单色度、相位、偏振、发散度、脉冲性和光强等等所有的物理指标。

激光有着极为广泛的用途,其自身也是一个近代物理学研究的热点。支撑着今天信息社会通信网络的基础就是激光通信技术。高能量密度的光束自然也会使人联想到制造具有破坏性的光线武器。破坏敌方装置的光束需要具有穿透金属外壳,破坏装置内部电子器件的能力。为此人们开始探讨如何能够得到更短波长、具有更高能量密度的X射线激光。由于受激辐射系数反比例于电磁波长的三次方,所以波长越短,生成激光的条件就越苛刻,形成激光也就需要更巨大、更昂贵的设备。比如利用现代加速器技术制造X射线激光的加速器,所需的长度为千米级,波荡器的磁铁排列长度为几百米,电子束流能量要高达几个GeV。

X射线是一种波长很短的电磁波。从能量来源分类,由内壳原子能级跃迁产生的辐射叫X射线,由原子核能级跃迁得到的叫 γ 射线。由于核能级跃迁的能量更大,X射线的能量高端相当于 γ 射线的能量低端。高端的 γ 射线也可以从宇宙线中观测到,人们至今仍然不知道宇宙中产生如此高能的 γ 射线(10^{20}eV)的机制。从理论上讲,黑体辐射也可以产生X射线。根据6000K的黑体辐射的最强波长是550nm的普朗克辐射分布以及维恩的温度波长位移法则,要得到0.1nm波长的X射线需要上千万度的黑体温度。那个温度下 1cm^2 表面积辐射功率将达到10GW。因此,要想让 1cm^3 的黑体方块达到和维持这个温度,那么对 1cm^3 的体积内必须有大于60GW的功率输入。一百多年前,琴伦时代获得X射线的方法是利用高能电子束碰击金属靶的激发机制。其转换效率只有0.1%,远低于蜡烛采光的变换效率。如果想要利用X射线作衍射实验,这种光源就更显得很暗,好比是使用蜡烛作各种光学实验。增加碰击金属靶电子束流强度是一个提高光源亮度的方法。但是电子的能量一般都是几十千电子伏,几十毫安的高能电子束打到 10mm^2 的焦点处,功率

密度要达到每平方毫米一百瓦的量级，大大超过了金属靶的冷却极限。

把高能电子束团引到真空容器中作韧致辐射“发光”可以看作是放电管的延伸。韧致辐射是高能电子在作加速度时释放电磁波的机制，属于古典物理学的范畴。原子核在中心，电子绕其运动的太阳系原子模型在今天属于常识了。但在 20 世纪初期，人们不能采纳这个模型。其理由就是因为这个韧致辐射。如果原子是电子在原子核的库仑场中旋转的模式，作圆周运动的电子就必然要辐射出电磁波。若没有对电子能量的补充机制，电子的轨道就会逐步缩小，直到电子与原子核的正电荷中和。但是，人们同时也知道最简单的氢原子的寿命几乎是无穷大。正是这个矛盾促使了新的微观物理理论——量子力学的诞生。在原子结构的问题解决了之后，一方面人们使用新理论解释固体物性和化学反应，另一方面，人们又开始思考原子核的结构和法则。由于核能的巨大威力和未知的核结构的诱惑，人们开始研制原子弹、开始建造大型的粒子加速器、开始探索高能物理的世界。从理论上讲，电子加速器能量的上限取决于电荷韧致辐射造成的能量逸散。由计算可知：辐射损失量与电子能量的四次方成正比，与电子的旋转半径成反比例。为了避免辐射带来的损失，电子加速器的能量越高，拐弯半径也就得越大，最终的选择只能是建造直线加速器。但是如果换个看问题的视点和立场，能够“有效”地阻碍加速器能量增加的机制也正好是高效率的辐射光源。人们在 1947 年首次从同步加速器电子轨道的切线方向看到了电子发出的明亮的韧致辐射，并因此称其为同步辐射。鉴于传统方式产生 X 射线的效率很低，为了更有效地获得高辉度的 X 射线，从 20 世纪 80 年代起，人们开始利用大型加速器作为 X 射线的光源。

中科院在浦东建设的上海光源是一个后第三代的大型同步辐射光源，是一项国家重大科学工程，总投资约 12 亿元，预定于 2009 年投入使用（图 7）。上海光源（Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF）由一条 150MeV 直线电子加速器、一个把电子能量从 150MeV 提升到 3.5GeV 的增强

器和一个周长为 432 米的 3.5GeV 电子储存环组成。当环电流为 100mA 时，储存环的总辐射功率要达到 120kW。这个能量损失由储存环上的大功率超导高频腔来补充。同步辐射光可以覆盖从远红外到硬 X 射线的波段，是我国生命科学、材料科学、环境科学、地球科学、物理学、化学、信息科学等众多学科研究中不可缺少的先进分析手段和综合研究平台，同时也是支援微电子、制药、新材料、生物工程、精细石油化工等先进产业技术研发的重要工具。



图 7 上海光源的模型。作为“发光体”的电子能量是 3.5GeV

光给人类带来了什么呢？太阳光的温暖自不必说，从人体的构造上看，外界信息的 80%是通过视觉获得的。因此，光还扮演着人与外部世界媒介的角色。自古以来，人类就没有停止过对光源的探索，未来我们期待着有更多更好的光源问世。

（日本高能加速器研究机构 KEK 光子工厂）

本文获“我心目中的现代物理”征文三等奖

