

庆祝 2015 国际光之年、纪念早期量子论

——从 2014 年诺贝尔物理学奖与化学奖谈起

施 郁

(复旦大学物理学系 200433)

2014 年 10 月 7 日，从诺贝尔奖官方网站得知 2014 年的诺贝尔物理学奖授予蓝光发光二极管的发明者，笔者联想到 2015 年是光和光基技术国际年（以下简称 2015 国际光之年）。这是联合国的庆祝活动，宣传光和光的应用。2013 年 6 月在新加坡举办的第 8 届华人物理学大会（OCPA8）上，国际理论物理中心的尼米拉（Niemela）教授代表联合国教科文组织介绍了 2015 国际光之年。

2014 年 10 月 8 日宣布，2014 年诺贝尔化学奖授予在超分辨荧光显微技术领域取得重要成就的三位科学家。这又与光有关。是不是 2015 国际光之年影响了诺贝尔奖委员会的决定？我们可以猜测，却不得而知。但不管如何，这两项诺贝尔奖丰富了即将开始的 2015 国际光之年的内容。

2015 国际光之年的庆祝活动包括以下成就的“大生日”：1015 年海赛姆（Al-Haytham）的光学著作、1815 年菲涅尔（Fresnel）关于光波的工作、1865 年麦克斯韦的光的电磁理论、1905 年爱因斯坦的光电效应理论、1915 年爱因斯坦涉及光在引力场中行为的广义相对论、1965 年彭齐亚斯（Penzias）和威尔逊（Wilson）宇宙微波背景辐射的发现、1965 年高锟在光纤通讯上的成就。

考虑到 2014 年的诺贝尔物理

学奖和化学奖，我们可以在这个“大生日”清单上加上 1995 年赤崎勇（Akasaki）和天野浩（Amano）以及中村修二（Nakamura）的蓝光发光二极管的发明（他们的关键论文都是 1995 年投稿），1994 ~ 1995 年赫尔（Hell）在受激发射损耗显微镜（STED）以及类似技术上的理论突破、1995 年白兹格（Betzig）关于超分辨荧光成像的关键思想。

这个“大生日”清单上提到了 1905 年爱因斯坦的光电效应理论。正如本文要解释的，这其实反映了一个广泛流传的误解。首先应该纪念的是 1905 年爱因斯坦的光量子理论。光电效应只是在同篇文章中讨论的这个理论的一个应用。另外，也应该纪念爱因斯坦 1905 年提出的指出光速与参照系无关的狭义相对论。

2014 年诺贝尔物理学奖和化学奖都可以看成对早期量子论的很合适的纪念。一方面，量子论是 2014 年这两项诺贝尔奖共同的直接理论基础。另一方面，还有有趣的巧合：10 月 7 日，即诺贝尔物理学奖宣布之日，是尼尔斯·玻尔的生日。笔者还要提请注意，10 月 7 日也正是量子论的诞生之日。下面结合 2014 年诺贝尔物理学和化学奖，顺便简略梳理一下这段光辉历史，澄清一些广泛流传的误解。我要特别强调爱因斯坦对量子论的伟大贡献，而这常常被人们忽略。

1900 年 10 月 7 日，为了结合黑体辐射高频率和低频率的实验数据，普朗克写下他著名的黑体辐射能量密度公式。这是量子论的最开端。其后几个月，普朗克给出了这个公式的理论推导，从而发现了量子。他提出，发出电磁辐射的振子的能量必须是某个基本单位的整数倍，这个基本单位是频率乘以一个常数，即后来所谓的普朗克常数。

1905 年，爱因斯坦奇迹年。这一年他的第一篇论文《关于光的产生与转换的一个启发性观点》是唯一被爱因斯坦自己称为具有革命性的文章。在这篇文章中，他提出光量子（1926 年后被称为光子）假说，即辐射本身是量子化的！作为推论，他提出光的产生也是量子化的。爱因斯坦还讨论了这个推论的应用。其中之一就是为他赢得 1921 年诺贝尔物理学奖的光电效应。值得注意的是，光电效应中的电子出射能量与入射光频率的定量关系是爱因斯坦给出的预言，10 年后才被密立根（Millikan）验证。

在这篇文章中，爱因斯坦还讨论了光致发光，用能量守恒解释了斯托克斯定律，即入射光的频率不小于出射光的频率。光致发光分为荧光（fluorescence）和磷光（phosphorescence），前者符合量子力学选择定则，所以立即发生；后者如果直接发生，则违背量子力学选择定则，所以需要复杂的中间

过程，从而时间尺度长。

1906年，爱因斯坦指出普朗克公式要成立，必须假设振子发射电磁波是量子化的。后来人们用此思想理解普朗克黑体辐射定律。这个假设并不是光量子说的全部内容（即电磁场本身的量子化）。

1913年，玻尔提出他的原子模型，指出原子核外的电子只能处于分立的轨道，而电子在不同轨道之间跃迁时的能量差与光辐射或光吸收相互转化，光的能量即为普朗克常数乘以频率。这里没有用到自由电磁场的光量子假说，但用到了爱因斯坦对普朗克定律的重新解释，而且假设单个电子与单个光子能量转移。而这种假设始于爱因斯坦对光电效应的讨论。

1916～1917年，爱因斯坦发表他的辐射理论。他考虑电子在两个能级之间跃迁导致的自发辐射、受激辐射和吸收，通过平衡关系得到普朗克公式，还讨论了动量转移。

普朗克因为“能量量子的发现”荣获1918年度诺贝尔物理学奖（1919年决定授予，1920年实际授予）。爱因斯坦因为“光电效应定律的发现”荣获1921年度诺贝尔物理学奖（1922年授予，11月9日决定，10日宣布，爱因斯坦13日在上海下船后得悉，未参加12月10日的颁奖典礼，次年7月11日在北欧自然学家大会上补作诺贝尔演讲），诺贝尔奖颁奖词中也提到光致发光和荧光，但未提光量子说本身。玻尔因为“原子结构及其辐射的研究”荣获1922年度诺贝尔物理学奖。

普朗克和玻尔，乃至验证了爱因斯坦光电效应关系式的密立根，都迟迟不能接受爱因斯坦光子说。

1913年普朗克等人提名爱因斯坦为普鲁士科学院院士的推荐信中，还将光量子理论作为爱因斯坦“在猜想中错过目标”的负面例子。但从普朗克1920年所作的诺贝尔演讲来看，他那时已经接受爱因斯坦光子说。而玻尔直到1925年康普顿效应中的能量动量守恒被证实后，才接受光子说。这已经是量子力学新时期开始的那一年。

获得2014年诺贝尔物理学奖的蓝光发光二极管的实现归根到底在于寻找合适的半导体实现PN结中电子和空穴的复合，以转化为蓝光光子。电子和空穴的复合本质上是电子从高能级转移到低能级，填补空位。这是玻尔原子模型以及爱因斯坦的自发辐射的推广。

在半导体中，高能级推广为导电电子所在的导带，低能级推广为空穴（即电子空位）所在的价带，二者之差即为半导体的能隙。它除以普朗克常数即为发射光子的频率，正如早期量子论告诉我们的。导带中的电子和价带中的空穴通过掺杂得到。因此要发射某个频率的光，就要有相应能隙的半导体，这首先要生长出这种晶体、完成合适的掺杂。

能带与动量有关，因此半导体能隙有直接能隙和间接能隙之分。前者在相同动量之间，发光效率高。后者在不同动量之间，需要借助于晶格振动，发光效率低。砷化镓具有直接能隙，发红外光。磷化镓具有间接能隙，发可见光。通过调整掺杂浓度，可以产生从红光到绿光的不同波长的可见光。混合晶体镓磷砷可以具有直接能隙，发光波长也比砷化镓短，这由霍龙亚克（Holonyak）等人1962年实现。

20世纪50年代也开始用氮化镓发光，但是它的晶体很难生长。所以虽然有人在蓝光发光二极管研究上有进展，但效率有限。20世纪80年代，赤崎勇和天野浩借助于金属有机物气相外延技术，在晶体生长上取得突破。中村修二也独立取得类似突破。后来，他们也分别在掺杂上取得进展。而且还做出了异质结和量子阱，从而可以将电子和空穴控制在一个小范围内，以实现高效发光。两个组在1995年实现了蓝光发射，所以分享今年的诺贝尔物理学奖。

而获得2014年诺贝尔化学奖的超分辨显微镜则应用了爱因斯坦在发展早期量子论过程中首先研究清楚的荧光和受激辐射。二者都由爱因斯坦给出正确的物理图像。

在赫尔的受激辐射损耗显微镜（STED）中，第一束激光激发荧光分子中的电子从基态跃迁到高能态，即光吸收；第二束激光频率较低，使得高能态的电子向下跃迁，即受激辐射，但回不到原来的基态。而且第二束激光从中心向外强度递增，从而只有中心区域能自发辐射发出荧光。这导致很小的中心区域被分辨。这里的3个过程正是爱因斯坦1916～1917年讨论的。

白兹格的超分辨方法是每次测量分散但属于同一个谱类的位置，最后将不同类叠加。这些谱类由单分子光谱的吸收频率线宽决定。而这个方法的实现利用了莫尔纳（Moerner）首先测量的单分子荧光，特别是绿荧光蛋白质（GFP）的性质。GFP的光学“活性”可以在波长413 nm的光激发下“打开”。“打开”后，在波长488 nm的光激发后可以发射荧光。因此利用这些性质选择和测量分散的位置。

1920年授予普朗克1918年诺贝尔奖的颁奖词写道：“普朗克的天才所导致的财富需要很长时间才能挖掘完毕。”2014年诺贝尔物理学奖和化学奖提醒人们，一百年后的今天，这些财富还没有被挖掘完，

也许永远不会完。

电子从高能级跃迁到低能级时，能量转化为光子。这是2014年诺贝尔物理学奖和化学奖获奖工作共同的基本理论基础。这是光产生的一个基本途径，又是早期量子

论的关键内容，现在已是物理学常识，值得在2015国际光之年得到特别的关注。

注：与本文内容相近的一篇英文文章将发表于 *Modern Physics Letters B*。

科苑快讯

“古DNA解密现代人起源”入选《自然》2014年度十大科学事件

《自然》杂志回顾了2014年的重要科学进展，评选出2014年度十大科学事件，“古DNA解密现代人起源”名列其中，以中国科学院古脊椎动物与古人类研究所为第一完成单位的一项重大成果是这项进展的核心部分。

2014年，中科院古脊椎所脊椎动物演化与人类起源重点实验室付巧妹博士与德国、美国、俄罗斯、英国、西班牙等国的学者一道，共同研究了发现于西伯利亚西南部额尔齐斯河岸距今约4.5万年的一块几近完整的人类股骨化石，这是目前在非洲和中亚之外有直接测年数据的最早的早期现代人化石。研究人员通过最新的古DNA技术，实现了对该个体全基因组达到42倍的高通量测序，其数据质量可与现代基因组相媲美。

2014年10月23日出版的《自然》杂志以长文的形式刊登了以付巧妹为第一作者及共同通讯作者的研究论文。据该文介绍，从线粒体、Y染色体及核DNA多种分析来看，西伯利亚古人类标本所代表的群体相较于非洲人而言，更接近欧亚大陆群体，即西伯利亚古人类标本所属群体与欧亚大陆的共同祖先同祖。但是，没有证据显示其与某一

具体的亚洲、欧洲或北亚古群体更接近。

据介绍，距今4.5万年的西伯利亚古人类标本与现代欧亚大陆人一样，含有少量的尼安德特人基因（约2.3%），其个体的生存年代与尼安德特人和早期现代人发生杂交的年代更接近，所拥有的尼安德特人的DNA片段发生重组次数少，片段长。研究人员利用其尼安德特人基因片段分布，推算出该个体所属的群体与尼安德特人大概在距今5~6万年间发生了基因交流，这缩小了之前提出的时间范围（距今8.6~3.7万年）。

对人类起源与演化的认知过去主要来自于对化石形态及其演变过程的观察，近年来新技术为古人类学发展注入了新的活力。比如，成立于2008年的中科院古脊椎所脊椎动物演化与人类起源重点实验室就专门设有古DNA分析中心和高精度CT中心，致力于现代人的起源与演化研究。2013年1月21日出版的《美国国家科学院院刊》

(PNAS) 刊发了该实验室付巧妹博士和高星研究员等组成的国际团队，对北京市西南部房山区田园洞出土的生活在4万年前的一个人类个体进行的古DNA提取与分析结果。为了能将古人类DNA与大量来自土壤细菌的DNA相区别和分离，研究人员进行了新技术的尝试并取得突破，将含量仅占0.03%的人类DNA成功辨识提纯出来，顺

利提取到该人体的核DNA和线粒体DNA，从而使田园洞人成为第一个能够获得核DNA的早期现代人。研究表明，该具人骨携带着少量古老型人类-尼安德特人的DNA，但更多表现的是早期现代人的基因特征，且与当今亚洲人和美洲土著人（蒙古人种）有着密切的血缘关系，而与现代欧洲人（欧罗巴人种）的祖先在遗传上已经分开，分属不同的人群。

据《自然》杂志报道，“大约三万年前尼安德特人已销声匿迹了，但由于古人类的杂居交配，尼安德特人的DNA却在现代非洲人以外的人类中留存了下来。2014年，国际上两个团队开始盘点现代人类中有关尼安德特人的遗传特征。

《自然》杂志在报道中表示，2014年最令人难以忘怀的是“科学研究从胜利高峰坠落到令人失望的谷底，甚至是悲剧的深渊有多快：干细胞和宇宙研究面临信任危机，商业航天工业遭遇重大挫折。而人们有理由去庆贺的科学研究则有人类宇宙探测器首次在彗星成功着陆、追踪现代人类起源的研究以及联合推动深入了解大脑奥秘的举措”。2014年是科学让人既悲又喜的一年，在悲喜交加中，科学仍将不断前进。

（摘编自中国科学院网站：http://www.cas.cn/yw/201412/t20141224_4281332.shtml）