

量子力学诞生的动荡岁月

(北京大学 徐仁新 翻译自 Phillip Ball. *Physics*, February 4, 2025)

现代量子力学的创建过程错综复杂，许多开创者并未领会其发现的意义。

为纪念量子力学的完整表述诞生一百周年，联合国设立“2025国际量子科学与技术年”。1925年，德国物理学家海森伯首次提出新物理学的数学框架，其“矩阵力学”可预言原子的量子行为(如发射光谱)。年底，奥地利物理学家薛定谔给出一种更受欢迎的替代方案，即波动力学(1926年发表)。

但事实上，量子力学的诞生并非一蹴而就。这场持续几十年的革命历程充满混乱和困惑，革命的真正意义一直模糊不清——甚至在某些方面至今仍未解之谜。回溯历程，我们会发现量子论发展初期的动机并不牢靠。毫不奇怪，新的想法及其意义在保守派和革命派之间都引起过激烈争论。这些想法的出现归功于一些核心人物的勇于思维跳跃、超越传统经验和严谨逻辑。

探索物理世界的量子属性竟始于一个看似微不足道的开端。1900年，柏林大学物理学家普朗克提出，热物体原子振动的能量是量子化的，其离散频率犹如音阶音符。

普朗克的贡献常常被误解。他起初感兴趣于化学反应的不可逆性，不满意奥地利物理学家玻尔兹曼给出的答案。玻尔兹曼认为，化学反应方向仅体现若干分子过程的最可几结果。(普朗克为避免概率论而被量子假说吸引，有点讽刺。)这一探索导致普朗克思考一个电动力学难题：完全吸收的物体(称为黑

体)如何发射电磁辐射(热和光)?

黑体辐射谱的峰值位于波长 λ_m 处；当温度 T 升高时，峰值波长变短。德国物理学家维恩通过实验表明 $\lambda_m T$ 为常数。普朗克假设辐射源于定义模糊的“振子”的振动，着手从基本原理推导维恩定律。这些振子可被理解为原子，而那时普朗克并不完全相信原子真的存在。

1900年12月，普朗克宣称，假定给定频率 ν 的辐射能量 E_i 是量子化的(即是 $h\nu$ 的 n 倍， n 为整数)，就可以得到跟实验一致的结果。也就是说， $E_i = nh\nu$ ，后来将这里的常数 h 称为普朗克常数。

普朗克并不认为这种量子化有啥物理意义——如其所言，此乃特定“技巧”以获得符合数据的理论结果。他当然不认为他的理论与经典物理学决裂，几乎所有其他人也一样。荷兰物理学家洛伦兹指出：普朗克公式尽管符合数据，但缺乏坚实的理论基础。

爱因斯坦是个例外，他于1905年将普朗克的能量公式 $E = h\nu$ 应用于光。普朗克的黑体辐射研究没有提到这一点。该提议非常激进，但现在看来爱因斯坦的推理好像很随意。

爱因斯坦认为，物质由离散的原子组成，但电动力学描述的电磁辐射却是连续的，这似乎很奇怪。将光视作离散的、与普朗克公式一致的能量包不更自然些吗？

爱因斯坦的假说产生了可验证的实验预测。众所周知，光照射金属会发射电子，即“光电效应”。爱因斯坦指出，如果存在这种能量包，则发射电子的能量应取决于光的频率而非光强。

所有这些似乎暗示：光根本就不是波。尽管这已被迄今为止的实验明确论证，但那时没人意识到亟待解决光电效应问题。爱因斯坦的预言即便于1916年被美国物理学家密立根验证，也仅勉强接受。各种经典理论不能解释密立根实验，这在当时并非显而易见。

爱因斯坦提出光量子是有风险的。他晓得这有多激进：当回顾1905年他的四篇开创性论文时，他认为光量子论文最具革命性。

爱因斯坦进而将量子假说用于固体热容研究，成为刻画物质和能量的坚实基础。然而，大多数物理学家仍不觉得有理由怀疑经典物理的完整性。以“辐射与量子”为主题，1911年欧洲顶级物理学家齐聚布鲁塞尔召开第一届索尔维会议；

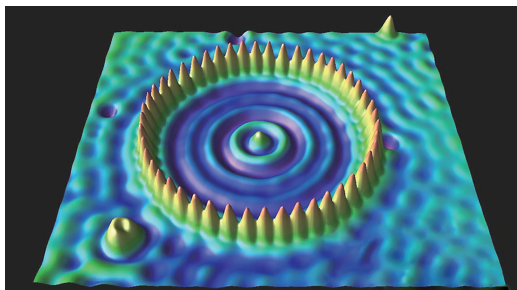


图1 这幅1993年利用扫描隧道显微镜拍摄的铜表面波纹图像，首次以直观形式揭示了电子的波动性。图中电子被约束在一个由铁原子环(峰)构成的“量子围栏”内

DOI: 10.7693/wl20250610

CSTR: 32040.14.wl20250610

在这个会议上，量子假说受到的评价也褒贬不一，尤其是资深学者。然而，普朗克勉强改变观念，同年在德国化学学会的会议上他说：“量子假说有助于构建一个理论，让我们有朝一日用全新的眼光透视分子世界。”

1913年是历史转折点；那时丹麦物理学家玻尔在英国曼彻斯特大学卢瑟福实验室工作，他用量子假说挽救了卢瑟福的原子模型（微型太阳系）。根据经典理论，绕原子核运动的电子会因辐射而失去能量，故原子不能稳定存在。玻尔理论避免了原子塌缩，将电子能量设为量子化的、不能任意改变的值。只有当原子吸收或发射光量子的能量 $h\nu$ 等于两个量子化轨道间的能量差时，电子才能改变轨道，实现瞬间“量子跃迁”。

玻尔假说可以解释氢原子的离散光谱发射线，即巴尔末线系（曾困扰物理学家多年）。该理论进而可以精确描述氦离子 He^+ 的光谱后，人们才开始相信它。当听到氦结果时，爱因斯坦大赞“巨大成就”。

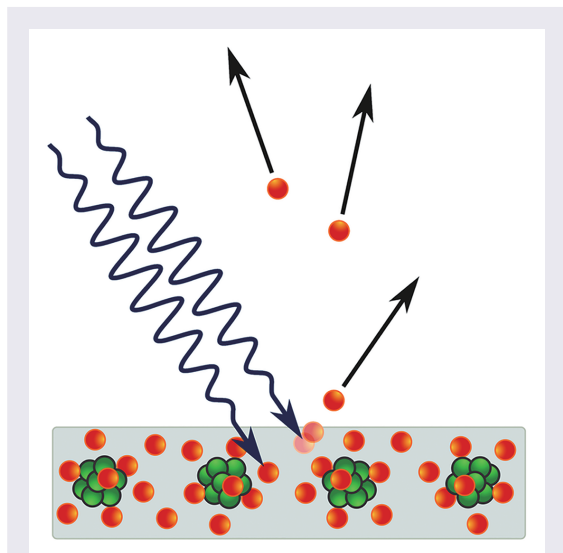


图2 由于光电效应，紫外光入射至固体材料后会发射电子

尽管如此，玻尔原子仅体现了量子论的早期发展，是量子 and 经典概念的粗糙混合，仅从实验出发构建量子数。“旧量子论”的分歧和困难日积月累。到了1923年，问题变得越来越尖锐，德国哥廷根大学的玻恩教授不得不说“整个物理体系必须重建”。如何重建？

1924年秋，玻恩的学生海森伯访问丹麦理论物理研究所的玻尔，致力于更好地描述量子理论。他们努力工作至第二年春天，但收效甚微。返回哥廷根后，海森伯在德国位于北海的黑尔戈兰群岛度假。当爬过岩石时，他产生一个“疯狂”（他对玻恩这么说的）想法来计算原子能级。

海森伯决定：既要接受跟经典物理的决裂，还要放弃用传统方式（粒子在空间中运动）描述量子理论的幻想。有别于描述不可观测的电子位置和速度，他寻求“构建可观测量之间关系的量子理论”。电子跃迁时发射光的频率就是可观测量，他在矩阵中列出这些频率。矩阵完全描述电子运动，并可通过数学计算预言其他可观测量。

这一“矩阵力学”既难懂又难用；1926年，薛定谔提出一种基于波的量子力学，受到人们的欢迎。薛定谔的灵感源于法国物理学家德布罗意在1924年就提出（但基本上被忽视）的建议：正如光波可被视为离散的粒子，电子这样的物质也可类似地描述为波。

多数物理学家意识到了薛定谔波动力学在计算过程中的优势。虽然薛定谔证明

了矩阵力学和波动力学数学上等价，但好胜心极强的海森伯认为薛定谔波动方程的物理解释“令人不快”。海森伯坚信，这类可视化亚原子世界的任何尝试注定失败。不过，薛定谔的波动图像最终成为了量子力学的标准框架。

接下来的三个进展完成了量子革命。1926年7月，玻恩指出薛定谔方程中电子波函数的振幅并非电荷密度的空间分布，而是反映给定位置找到电子的概率——量子力学概率性似乎是天生的。再者，1927年，海森伯揭示不确定性原理：不可能同时准确地知道电子（或其他粒子）的位置和动量。

最后，1935年，爱因斯坦与两个年轻的同事（波多尔斯基和罗森）指出量子理论暗示粒子之间存在非局域性关联。薛定谔将这种粒子间的关联称为纠缠，意味着无法局域地描述量子粒子。爱因斯坦、波多尔斯基和罗森认为这很荒谬；他们本希望以此证明量子力学的不完整性，而实验却证实了量子纠缠。

量子革命常被称为范式转变。这是科学史学者库恩提出的一个概念，特指只能通过与现有思想彻底决裂来解决科学危机。库恩说，决裂后产生的新范式如此自然，以至于科学家们无法想象回归旧思想模式的可能性。科学进步的方式都是这样吗？尚存争议。尽管库恩描绘了一幅科学家尽可能维护旧思想的画面，但历史表明：激进的新思想往往不是被抵制，而只是被忽略或视而不见——有时甚至是那些提出新思想的人。

从量子革命可见，一开始并不清楚真正的革命性在哪——其实不是量子化，而是量子概率性、非因果性和非局域性。一个世纪后，仍存争论。这一点更重要！