两朵乌云中诞生的一代神话——

哥本哈根学派的创建和历史研究

自55

张蔚桐

2015011493

摘要：

哥本哈根学派，通常指20世纪对量子力学这门现代物理学的基本理论和其解释的一派观点。这个学派的创始人是丹麦物理学家尼尔斯·亨里克·大卫·玻尔（Niels Henrik David Bohr），Bohr将这个学派的活动场所设在了丹麦首都哥本哈根。哥本哈根学派因此得名。哥本哈根学派的创立和不断发展，从根本上促进了丹麦甚至世界物理学的发展，对量子物理学体系的不断完整有着重要的意义。同时，哥本哈根学派内外的不断斗争，论战在推动量子力学等近代物理学科的发展中有着巨大的意义。这种意义甚至不限于在物理学本身，而在于Bohr本人以及哥本哈根学派的学术态度等是近代学术组织最好的榜样。在科学新理论不断发展的今天，各种研究组织层出不穷，哥本哈根学派的发展过程对这些组织具有极大的借鉴意义。  
 研究哥本哈根学派的历史，一方面可以帮助我们梳理量子力学这门20世纪刚刚诞生的物理学分支在其早期是如何在几位大师的努力下成为一个完备的学科。同时，也有助于我们树立正确的科学研究观和良好的团队观念。

1. 量子力学的早期发展——从量子论到量子力学  
    在历史跨入新世纪的日子里，英国科学界声名显赫的开尔文勋爵（Lord Kelvin）在1900年4月27日在皇家学会发表了一片著名的讲演。这篇讲演高度总结了I. Newton以来的物理学发展。Kelvin勋爵声称，“物理学的大厦依然建成，后人们要做的就是将这座大厦细致的装饰，解出现在解不出来的方程，或是进行一些无关紧要的理论推导就可以了”。的确经过了近200年的发展，物理学的体系已经日趋完善。而作为物理学大厦的三根支柱的理论力学，电动力学，统计物理这些理论物理学科在Lagrange, Maxwell和Boltzmann的发展之下，已经日臻成熟。物理学家们似乎已经能够得知从地球上到宇宙中每一处的秘密。然而，Kelvin勋爵也在演讲的开始就提到，在物理学辉煌的大厦上面，漂浮着两朵乌云——光速不变和黑体辐射。而就是这两朵乌云，日后将成为近代物理的两个基本支柱——相对论和量子力学。  
    如果说相对论完全是Einstein的一人的功绩的话，那么广大精深的量子力学则是大量科学家，物理学家的共同努力的结果。可以说，如果相对论只是挑战了人们对于高速情况下的想象力的话，量子论则挑战了人们对这个世界的根本认识，甚至是一种哲学上的认识。如果说相对论之中的相对性原理还让人们可以接受的话，那么量子论中对于传统认识中的“连续”的认识则完全挑战的人们的思维，因此，量子论、量子力学更需要更多的人来为它的发展做出自己的贡献。哥本哈根学派就是其中最典型的例子。  
    1911年秋，正在剑桥大学做J. J. Thomson的助手的丹麦青年Bohr遇见了正在研究原子的有核模型的教授Rutherford教授，当时由于Rutherford成功的利用盖革计数器完成了alpha粒子对金原子的散射实验，很多青年都集中到Rutherford周围并形成了Manchester学派。1912年初，Bohr也到Rutherford处工作。当时的Rutherford已经提出了原子的有核模型。但是，Manchester学派的很多人都意识到，有核模型虽然能成功解释alpha粒子散射的实验现象，但是原子的稳定性无法与经典的电动力学协调。经典电动力学告诉我们，当一个带电粒子做加速运动时会辐射电磁波从而损失能量。这样的话，绕原子高速旋转的电子会因为向心加速度的影响不断辐射损失能量最终使得和原子核对撞。如果这个解释成立的话，原子将无法长期稳定存在。当时的Manchester学派有很多人希望对这个问题加以修正。  
    同时，1900年，德国物理学家Planck从理论上对黑体辐射的数据进行拟合的时候发现理论上的经典力学作用量有其天然的最小值，即我们今天所知的普朗克常数。20世纪初的这个发现，，是人们第一次发现在自然界存在的不连续现象，甚至提出这个猜想的Planck都无法说服自己这个想法的可靠性。因为他信奉牛顿的完美理论，从而最终放弃了他提出的解释。但是，这个理论却吸引了年轻物理学家Einstein的注意，Einstein成功的利用了Planck的假设提出了光电效应方程，解释了许多之前不能解释的问题。并因此获得了1921年Nobel奖。  
    在黑体辐射方面的连续性被打破的同时代，关于原子光谱的发现同样揭示者原子内部隐藏着的秘密。1884年，瑞士数学家Balmer发现了氢原子光谱的“巴尔末公式”。一系列的实验和理论分析结论使得Bohr相信，要说明原子现象，就必须从根本上离开经典概念。1912年夏，Bohr回到哥本哈根，不断听卢瑟福通信联系。1913年春，Bohr从氢原子的“巴尔末公式”中发现了解决原子稳定性的线索。通过分析，他不得不假定原子发射或吸收的光辐射是一个不可分割的整体过程，即“量子跃迁过程”。同时，Bohr提出了“角动量量子化”的概念。显然，Bohr的两个新概念，已在根本上脱离了任何经典物理图景。但是，囿于Bohr当时年代的表述难度，Bohr又不得不将这些概念和经典力学中的“角动量”等概念结合起来。尽管这样，Bohr的氢原子模型在这个阶段是很成功的，Bohr也因为此获得了1922年Nobel奖。  
    氢原子模型提出后，Bohr名气大振，青年学者开始来到Bohr身边工作。1916年，Bohr被任命为哥本哈根理论物理学教授，从此开始，他致力于筹备创立哥本哈根理论物理研究所，并为此奉献终生。  
    哥本哈根理论物理研究所成立后，来自世界的物理学家来此工作研究，为量子力学成为一个完备的学科做出了自己的贡献。其中有我们熟知的德国慕尼黑大学的Sommerfeld和他的两个学生，奥地利人Pauli和德国人Heisenberg分别在1922年和1924年到哥本哈根常住。同时，也有英国的Dirac，法国人Brillouin，俄国人Landau，Gamov也在所中工作过。在Bohr大师的影响下，这自然而然的形成了哥本哈根学派。同时，一直跟Bohr联系密切的Heisenberg，由于最早提出了废弃经典电子轨道模型的新量子论（即量子力学）的数学表示，在后来的哥本哈根学派中也起到了重要的作用。  
    在哥本哈根学派的不断努力下，量子论终于不断被完备，最终成为了一门物理学分支——量子力学。
2. 量子力学的哥本哈根学派解释  
    在早期的量子力学解释中，存在着矩阵力学和波动力学两种解释。矩阵力学有Heisenberg创立，波动力学由Schrödinger创立。当时在de Broglie提出“物质波”的概念后，Schrödinger在一次物理学术研讨会上受当时的量子物理学家Debye的启发，认为应当有一个类似波动方程的偏微分方程来解释物质波，这样可以让物质波得到一个定量的解释。于是，仿照经典的电动力学波动理论，Schrödinger提出了一套后人以“薛定谔方程”命名的方程。不过这个几乎没有什么理论依据的方程竟然可以很好地解释很多的量子现象。Schrödinger由此创立了波动力学。但波动力学早期的一个重要问题是无法解释其中最关键的“波函数”的物理意义，这也成为早期量子力学发展的障碍之一。  
    矩阵力学是由Heisenberg等人提出的，在矩阵力学的早期，矩阵力学和波动力学的两派人物开始了长期的论战，1926年10月，在一次会面中Schrödinger和Heisenberg意识到波动力学和矩阵力学在原理上是等价的，而最开始发现这个问题的人还是哥本哈根学派的Pauli。稍后，Schrödinger给出了两种理论等价性的证明。  
    到了此时，最关键的波函数的物理意义终于开始浮出水面，量子力学的哥本哈根解释也逐步完善，1926年6月，哥本哈根学派物理学家Born提出波函数的统计解释，即波函数的模方代表一个粒子在某地出现的概率。同时，1927年，哥本哈根学派物理学家Heisenberg提出不确定性关系，又称测不准原理，将随机与概率赋予了宇宙间的所有事物。  
    测不准原理的提出是人类思维的有一个重大飞跃，后文将介绍Bohr将从互补的理论去阐释这个原理。测不准原理的“测不准”不是仪器误差，而是因为观测结果和客体之间的相互作用。从更高的层次说，事物必须被观察到才能被认识，这就要求人的观察活动不改变或不影响被观察事物的本质。用Heisenberg的话说就是有可能观察到现象而不可观的影响这些现象。可是在原子物理学中就办不到了。  
    关于这个问题，Bohr提到“我们必须体会到相互作用不能从客体的未受干扰的行动明锐地区分开，因为纯粹以经典观念为基础来描写测量仪器的轻质和操作的必要性隐含着……放弃课题对仪器反作用的控制”（1939，《物理学的新理论》）。  
    简单地说，在量子世界中，由于客体已不能再分的量子形式与主体作用，而且在观察过程中的主客体关系，界限往往是模糊不清的，例如，选用威尔逊云室观察粒子时，可以认为粒子是客体而云室以及观察者是主题，也可以认为观察者是主体而粒子和云室的相互作用是客体，这种主客体之间的牵连使得整个测量过程中总能受到不能再分的干扰，在这种情况下，任何的测量都会形成误差。  
    因此，正如刚才所言，不确定性关系，波函数的概率解释说明了不确定性在客体和主客体测量之间的广泛存在性；开辟了人们对量子世界的理解的新天地；构成了哥本哈根量子诠释的主题内容；为最关键的Bohr的互补原理的提出做好了铺垫。
3. Bohr互补原理的提出和哥本哈根学派的发展  
    著名的量子力学的哥本哈根解释正是以刚刚提到的Bohr的互补原理为核心。1927年，当测不准原理和波函数的统计学解释被提出后，Bohr在一次赴挪威度假的过程中详细梳理了这些观点并得出了一个总结性的互补原理。所谓总结性，是因为不像前两个性质可以用数学表达式准确的表述，Bohr的互补原理无法准确表述，Bohr提到，“我将尝试只运用一些简单的考虑而不深入到专门的数学性细节……来解释”，简单的说，Bohr的互补原理可以理解为，物质既有粒子性，又有波动性，但是每个现象当我们观察到的时候，它就只能表现出离子型，波动性的一面来。就像一枚银币，既有正面又有反面，而每次落地的时候只能看到它的一面。  
    这种哲学意义上的互补原理，使得量子力学形成了一套自洽的理论体系，也为哥本哈根学派以及量子力学的之后的发展打下了良好的基础。同时，必须指出的是，这种原理所隐含的哲学性将在日后被Bohr发扬光大而真正成为一条哲学思想，这些在后文中会提到。
4. Bohr- Einstein论战和EPR佯谬的论证
5. 哥本哈根学派从量子力学引出的哲学问题
6. 哥本哈根学派带给我们的启示