

玻尔与爱因斯坦间的论战缘由与细节

吴晓松

重庆涪陵第五中学校 重庆

【摘要】20 世纪 20 年代，旧的量子论通过海森堡，薛定谔，狄拉克等人的努力变成了新的量子力学，旧量子论的诸多假设均可以从新的量子力学中直接导出来。但对量子力学的物理意义的阐释却在物理学家之间产生了较大分歧。其中最为著名的就是玻尔与爱因斯坦之间的三次世纪大论战。其中 1927 年比利时布鲁塞尔的第五届索尔维会议，是玻尔与爱因斯坦间的第一次大论战，标志着“玻爱论战”的公开化；接下来最为戏剧性的第二次大论战发生在三年后的 1930 年第六届索尔维会议期间；而 1935 年的第三次大论战中的 EPR 理论所涉及的“叠加态”和“纠缠态”则成为量子理论新发展的生长点，并由此直接引导了量子力学后几十年的巨大发展。文中主要描述了这三次大论战的情景，包括论战的背景和具体的对话内容，这也为后世的学术争论提供了范例。

【关键词】玻尔；爱因斯坦；三次大论战；光盒子实验；EPR 理论

【收稿日期】2025 年 2 月 15 日

【出刊日期】2025 年 3 月 31 日

【DOI】10.12208/j.sdr.20250030

The reasons and details of the debate between Bohr and Einstein

Xiaosong Wu

Chongqing Fuling No.5 Middle School, Chongqing

【Abstract】In the 1920s, the old quantum theory became a new quantum mechanics through the efforts of Heisenberg, Schrodinger, Dirac and others. Many assumptions of the old quantum theory can be directly derived from the new quantum mechanics. However, the interpretation of the physical meaning of quantum mechanics has produced great differences among physicists. One of the most famous is the three great debates between Bohr and Einstein. Among them, the fifth solvay conference in Brussels, Belgium in 1927 was the first big debate between Bohr and Einstein, which marked the openness of the "Bolivia-love debate"; The most dramatic second great debate took place three years later during the Sixth Solvay Conference in 1930. However, the "superposition state" and "entangled state" involved in the EPR theory in the third great debate in 1935 became the growing point of the new development of quantum theory, which directly led to the great development of quantum mechanics in the next few decades. This paper mainly describes the scenes of these three great debates, including the background of the debates and the specific contents of the dialogue, which also provides an example for future academic debates.

【Keywords】Bohr; Einstein; Three great debates; Light box experiment; EPR theory

1 论战缘由——哲学思想不同

1927 年 9 月 11 日至 20 日在意大利科莫举行了国际物理学大会（图 1），史称“科莫会议”。这次会议是为了纪念电池的发明者，意大利人亚历山德罗·伏打逝世 100 周年而举办的。会议聚集了来自 14 个国家共 70 多位科学家的参与，包括玻尔，普朗克，洛伦兹，布拉格，劳厄，霍尔，索末非，泡利，海森

堡，玻恩，费米，德布罗意，卢瑟福，帕邢，理查孙，寇唐，克拉默斯，维格纳，科尔比诺，乔尔吉，C.G. 达尔文，密里根，爱丁顿，冯·卡门，康普顿，阿斯顿，伍德，仁科芳雄，玻色，德拜，布里渊，马约拉纳，塞格雷，桑木彥雄，冯·诺依曼等在内的顶级科学家。玻尔由于一直在赶他那篇论文的注释，直到 9 月 16 日才来到科莫的卡尔杜齐研究所，所以在图 1

作者简介：吴晓松（1984-）男，研究生，中学物理一级教师，研究方向主要为数理问题的探讨，教材与教法，竞赛与辅导，物理学史等。

中并未看到玻尔的身影。



图1 科莫会议合影

玻尔的论文包括了海森堡的不确定性原理，泡利的不相容原理，玻恩的概率解释以及他自己的互补原理等，所有这些要素就构成了对量子力学的新的物理认识的基础。后来物理学家把这些观点的总和称为“哥本哈根解释”。可以说科莫会议是哥本哈根学派的第一次集体亮相，玻尔的演讲是科莫会议的一个顶点。科莫会议上哥本哈根解释没有遭到强有力的反对可能和两个人的缺席有关，一个就是薛定谔，几周前，他才刚到柏林接替普朗克的职位，现在正忙着安顿下来，另一个重要人物就是爱因斯坦，因为他拒绝进入墨索里尼法西斯势力执掌下的意大利。不过等到一个月后，即1927年10月24日至29日在布鲁塞尔召开的第五届索尔维会议上（图2），玻尔就同爱因斯坦和薛定谔会面了。

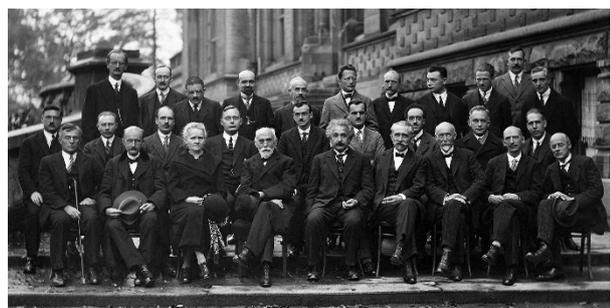


图2 第五届索尔维会议

在第五届索尔维会议上，玻尔再次讲述了互补性原理，在玻尔看来，量子世界所遇到的困难源于它的“不连续性”，像能量量子化，定态，跃迁这些“不连续性”最终不可避免地失去了“确定性”。玻尔认为，波粒二象性只能在互补性原理的框架之下，才能得到完整而准确的解释，人们也只能根据实验来确定粒子是波动性的还是粒子性的，至于粒子呈现什么性质，将取决于所作的实验。如果实验是要观察粒子性，那就得到粒子性图像，同样，如果要观察波动性，就呈现波动性图像。这两种图像如同硬币的两面，既不能分开，也不能同时呈现。实际上，

物质世界的所有性质，都呈现出这种成对的双面性。这就是“互补性”或者说“共轭性”。互补性原理能对探索量子世界的实验有清醒的认识，这种认识包括两个方面，一方面要看到被观察者不可避免地受到观察者的干扰，因此观察者和被观察者不可能截然分开；另一方面，对量子实验结果的表述也只能采用经典物理概念，这就使得所谓的“独立真实”不可能是独立存在的。为此，玻尔解释说，对于一个电子，询问它某时在什么地方，具有什么速度，这本身就毫无意义，因为不存在独立于观察和测量仪器的“客观真实”，或者说在对电子进行观察或测量确定它的位置之前，电子根本不存在于任何位置，只有在测量的作用下，电子才能显现出“真实”来，所以这个“真实”不可能是“客观独立”的。玻尔最后总结说：“认为物理学的任务是要找出自然界是什么的想法本身就是错误的，物理学所关心的是对自然界我们能够描述什么，舍此无他”。他认为科学只有两个目标，一是扩展我们的经验范围，二是使获得的经验简单化和有序化。然而，爱因斯坦不能接受玻尔的这套哥本哈根学派解释。对他来说，物理学的唯一目标是致力于挖掘自然界的“真实”，这就是独立于观察者的“真实”。相信一个独立于观察者的客观现实的存在是探讨科学的最基本的前提，这应成为自然科学工作者的信念。显然，在对“物理学研究的目标”“自然真实本性”“观察者的地位”“因果关系”等一系列根本问题上，爱因斯坦和玻尔之间有着根本不同的看法，一场世纪大论战不可避免的即将展开。

2 玻尔与爱因斯坦的第一次大论战

2.1 初始对话——单缝衍射，攻其区域性

玻尔在第五届索尔维会议上讲完话后，L.布里渊，德·唐德和玻恩三人紧接着发了言。这时，爱因斯坦终于不再沉默，他向主席洛伦兹举手示意，表示有话要说。“尽管我意识到，对量子力学的实质还没有足够深入的认识，但是我还是想要在这里给出一般性的评论”。^[1]他采取了他最钟爱的战术策略——思想实验。爱因斯坦走向黑板，画出了一个单缝衍射的示意图（图3）。电子束通过遮光屏的狭缝后，在照相板上呈现出衍射花纹，感觉电子就像球面波一样在传播。但是，电子实际上是作为单个粒子打在板上的。爱因斯坦说，有关这个思想实验有两种截然不同的观点（图4）。

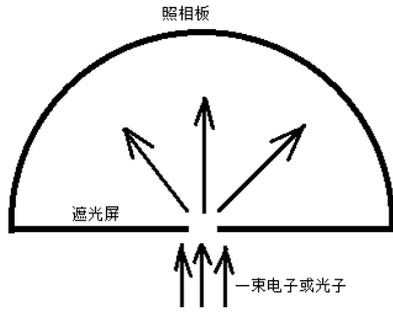


图3 爱因斯坦的单缝衍射思想实验

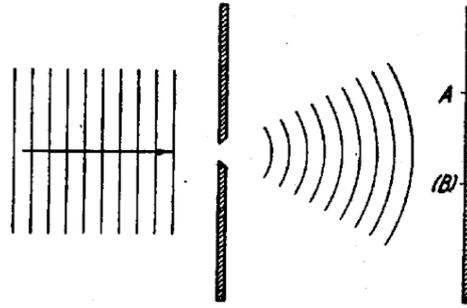


图4 玻尔对单缝衍射实验的再现

依据哥本哈根解释，电子穿过狭缝后冲向照相板的不是所谓的电子或者它的分身，而是一团概率波。别看只是一个电子的概率波，它占的空间可不小，覆盖了整个照相板。电子会选择哪个点落脚呢？波函数告诉我们任何一个点都可能成为落脚点，只是各点的概率不同而已，但是只要在 A 点检测到一个特定的电子，此刻在照相板的 B 点或任何别的地方发现这个电子的概率马上变为 0。爱因斯坦就此质问，如果我们知道了这个电子落在某点，那也就同时知道了它不会落在其他一点，这意味着在这两点之间可以隔空存在着“同时的相互影响”，即波函数的瞬间坍塌破坏了信号的传递速度最大为光速的基本要求，因此直接破坏了“局域性”的原则。为此，爱因斯坦提出了另一种解释。电子穿过小孔打在照相板上存在很多条路径，而电子实际走的是其中一条，但现在的量子力学方程不能精确地描述这条路径，只能描述这些路径的集合，并给出概率。这就是波函数描述的所谓概率波——薛定谔所说的电子云，波函数的乘方 Ψ^2 并不代表在 A 点发现某个特定电子的概率，而是代表在该点发现集合体中任一成员的概率。所以这个统计分布的函数跟处理布朗运动的算法差不多，都是一种统计手法，权宜之计。玻尔没有理解爱因斯坦到底想说什么，但是不赞成爱因斯坦纯统计性的解释，他主张波函数的瞬间坍塌，只是一种抽象的“几率波”，并非在三维空间中实际传播的，像水波那样的真实的“物质波”。所以，并没有违背狭义相对论的“局域性”原则。玻尔接着说道“我不知道什么是量子力学，我想，我们是在处理一些数学方法，这些方法适用于描述我们的实验”，并重申了他自己的互补观点。

2.2 再度交锋——双缝干涉，挑战自洽性

爱因斯坦对玻尔的回答无动于衷，并进一步修改了他的假想实验，他在遮光屏和照相板之间插入了一个双狭缝遮光屏（图 5）。

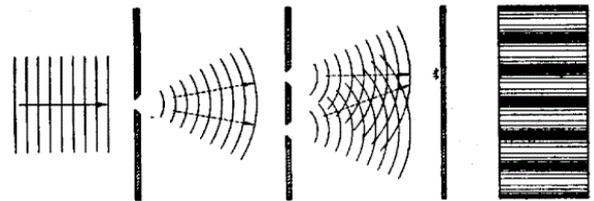


图5 爱因斯坦的双缝干涉思想实验

电子束离开第一个缝屏后，经过第二个缝屏变为两束，这两束电子在照相板上叠加的结果，就是双缝干涉花样。如果轮流挡住双缝中的一个缝，就可以知道电子通过了哪一个缝，同时照相版上也呈现了干涉花纹。似乎这样操作能同时看到粒子性和波动性。玻尔立即反驳，根本不存在这样的情况，当轮流盖住其中一缝时，双缝干涉花样也会随之消失，相当于多了一次的单缝衍射。双缝干涉只能出现在两个缝同时开的条件下。玻尔认为，由于现实世界的量子力学性质，电子既不是粒子也不是波，它是两者，有时表现为粒子，有时表现为波。在任何给定场合，电子是粒子还是波取决于所问的问题，取决于进行实验的类型。确定一个电子通过双缝屏上哪个裂缝的实验是一个需要粒子来回答的问题，因此没有干涉条纹。物理学家必须选择，要么跟踪粒子的路径，要么观察干涉效果。对玻尔来说，双缝干涉实验是一个在互相排斥的实验条件下出现互补现象的典型范例。对于一个微观物理现象，波和粒子的两个方面不能同时出现在一个实验中，不管是真实的实验还是假象的实验。

爱因斯坦随后质问这种干涉是如何发生的呢？

当降低电子束的强度，直到一次只有一个电子单独穿过双缝时，它又是和谁发生干涉的呢？它又是如何“知道”另一个狭缝是开着还是关着的呢？如果它不知道，又怎么在照相板上决定是要发生干涉还是不发生干涉呢？如果发生干涉，又是“谁和谁”发生干涉的呢？对于这一连串的问题，玻尔早已准备好答案，这正是认为电子具有“精确轨迹”所致。尽管电子是一次一个穿过双狭缝的，但它根本就没有确定的轨迹。量子力学的模糊性就在于此。电子具有各种各样可能的轨道，不可能从中确定地挑出一条轨道。这种量子模糊使一个粒子“尝试”各种可能的路径，因此它“知道”另一个狭缝是开的还是关的。不管狭缝是开的还是关的，都影响粒子将来的路径。

2.3 高潮对决——聚焦不确定关系

玻尔认为爱因斯坦分析他的假想实验时，默认地假定了遮光板和照相板在空间上和时间上都有明确的位置，这就要求遮光板要无限重才行。然而，这种精确性的获得是有代价的，就是电子的动量和能量完全不能确定。玻尔认为，更现实的是遮光板不是无限重的。尽管遮光板很重，当电子通过裂缝时遮光板仍然会有移动。虽然这种移动小到在实验室中无法检测，但是在抽象的思想实验中这种测量却没有问题。由于遮光板的微小移动，也造成了电子的位置与动量具有不确定性。玻尔的回答没能说服爱因斯坦。他希望玻尔能考虑电子在穿过遮光屏上的狭缝时，对遮光屏和电子之间的动量和能量的转移进行控制和测量的可能性。

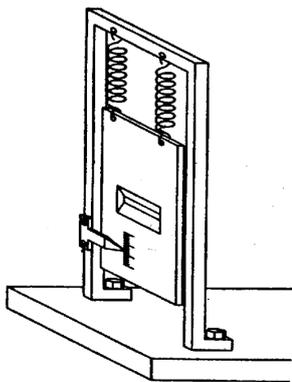


图6 玻尔设计的第一层遮光屏

爱因斯坦认为，当电子穿过狭缝发生偏转时，朝向照相板的轨道可以由动量守恒来确定，因为两

个物体（缝屏和电子）的总动量是守恒的。

如果电子向上偏转，那屏就朝下偏转而已，反之亦然。爱因斯坦说通过控制和测量粒子和第一个遮光屏之间的动量转移，有可能确定粒子是偏向第二个遮光屏的上面还是下面的裂缝。根据粒子打在照相板的位置和第一个遮光屏的动量，有可能跟踪粒子通过了两个裂缝中的哪个裂缝。显然爱因斯坦的这个论证有可能同时确定一个粒子的位置和动量，而且精度比不确定关系所允许的要高。在爱因斯坦的论证中，必定存在一个错误，于是玻尔着手去找出这个错误，他集中考虑的仪器是第一个遮光屏。并勾画出需要用来进行实验的设备。他用一个通过一对弹簧固定到支架上的遮光屏来充当第一个屏幕（图6），这样就可以对粒子穿过裂缝时发生的动量转移所导致的遮光屏的垂直运动进行测量。测量装置虽然非常粗糙（一个附着于支架的指针，一个刻在遮光屏上的刻度），但却具有足够的灵敏度。可以对遮光屏和粒子间的任何单独相互作用进行观察。如果用这个测量装置精确控制和测量转移到第一个遮光屏的动量以确定粒子的方向，就会引起第一个遮光屏位置的不确定。但问题就在于读第一个遮光屏上的刻度。为了读刻度就需要照明，就会引起光子从屏幕上散射，使动量转移无法控制。也就无法精确测量粒子通过裂缝时从粒子向遮光板转移的动量。消除光子影响的唯一方法是根本不照明刻度，这样也就不能读数。所以，无论如何，都无法同时确定一个粒子的位置和动量。

虽然在微观物理学中的物体，比如电子，受量子力学的支配，但是宏观的物体，比如测量仪器还是遵守经典物理学的定律。从玻尔的“干扰”解释可以看出在面对爱因斯坦的挑战时，玻尔是被迫让步了，他将测不确定关系运用在肉眼可见的第一个遮光屏上。借助这个操作玻尔强行把日常世界中的大尺寸元素运用到微观量子领域，因为他无法确定经典世界与量子世界的分割点——宏观与微观的界限究竟在哪儿。玻尔在与爱因斯坦的第一次量子对弈中走了一步疑云重重的棋。爱因斯坦对此反应很冷淡，他认为互补原理仅仅只是一种哲学的镇静剂，他说：“这剂药在当下如此神妙，它为自己的信徒提供了一个舒适的枕头，好让他们沉睡不醒，所以就让他们在那里安眠吧”。玻尔后来回忆说“爱因斯坦的关

心和批评很有价值地刺激我们所有人重新检查与原子现象描述有关的各个方面”。从哲学层面看，玻尔和爱因斯坦的争论涉及宇宙设计地核心，是否存在一种不依赖于我们观察的客观实在？是否存在着什么定律能够给看似随机的现象恢复严格的因果性？宇宙中的一切事物是否都是被预先决定的？有许多次，当爱因斯坦宣称上帝不会掷骰子时，玻尔都会反唇相讥地说出那句名言“爱因斯坦，不由我们告诉上帝如何掌管这个世界”。爱因斯坦的好友保罗·埃伦费斯特半开玩笑地说“爱因斯坦，我真为你感到惭愧，你现在反对量子理论这个新理论的样子，就和你的对手当年反对相对论一样”。实际上他们争论的背后隐藏的是一份真挚的感情，会心的幽默。玻尔和爱因斯坦第一次论战之后，虽然哥本哈根学派解释赢得了绝大多数人的支持，但是玻尔始终没有能使爱因斯坦信服量子力学是一个完备的理论。爱因斯坦对量子力学仍然抱有保留态度，认为量子力学有可能是一个成功的统计学理论，但是在理论上还不够完备。就这样，爱因斯坦和玻尔之间一场更为戏剧性的论战即将在下一届索尔维会议上上演。

3 玻尔与爱因斯坦的第二次大论战----光盒子实验

自第五届索尔维会议后，为了防止爱因斯坦再出一些新奇的实验，从1927年到1930年的3年间，玻尔对上次爱因斯坦提出的思想实验再次进行了研究，而且发现在每一个思想实验中爱因斯坦的分析都存在缺陷。不满足于既得的成就，玻尔自己也设计了一些思想实验，包括狭缝，遮光板，时钟等等的组合以试图找出哥本哈根诠释的缺陷。他发现他的解释无懈可击。即便没有穷尽爱因斯坦可能会想到的所有思想实验，玻尔倒也不太担心，因为量子力学的整个体系已经站稳脚跟，就算爱因斯坦再厉害，凭他一人之力也难以撼动量子力学的根基。而爱因斯坦则在盘算如何击溃哥本哈根的诠释，量子论从开始到现在确实方兴未艾，想要正面攻击，几乎不大可能，只能釜底抽薪，攻其一役。爱因斯坦在到达布鲁塞尔时，已经想好了一个新的思想实验。准备在第六届索尔维会议上给不确定性原理和哥本哈根解释带来致命一击。第六届索尔维会议（图7）于1930年10月20日至25日在比利时的布鲁塞尔召开，主题为物质的磁性。玻尔已经继爱因斯坦之

后加入了九人科学委员会，因此两人都自动获得了会议邀请函。而洛伦兹在主持完第五届索尔维会议后，便于次年（1928年）病逝了，法国物理学家郎之万接替了洛伦兹成为索尔维会议的主席，作为一次精英的大会，这次会议聚集了32名物理学家，其中含13名诺贝尔奖获得者。正是在这次会议的大背景下，爱因斯坦和玻尔就量子力学的意义和现实性的本质，展开了第二次大论战。



图7 第六届索尔维会议

3.1 爱因斯坦的光盒子诘难

这次会议，爱因斯坦有备而来，但主题是物质的磁性，与玻尔论战的内容不符，所以爱因斯坦和玻尔的第二次大论战是在会下进行的。爱因斯坦让玻尔想象一个充满光辐射的密闭盒子（图8），在它的一个壁上有一个带有遮挡板的小孔。这个遮挡板可以通过一个连接到盒子内的时钟机构打开或闭合。这个时钟与在实验室中的另一个时钟是同步的，以在适当时刻把遮挡板打开。实验开始时，先称出盒子的重量，然后定时打开遮挡板，放出一个光子，这样光子逃出去的时刻可以精确得知。玻尔此时仔细地听着，但没有挑出有什么可以怀疑的，因为爱因斯坦提出的每件事情看起来都很直接了当。不确定关系只适用于成对的互补变量，比如位置和动量，或者能量和时间。它并没有对一对互补变量中的任何一个变量的测量精度加以任何限制。正在这么想着，突然爱因斯坦的脸上露出一抹诡笑，它说：“现在请再次称量盒子的重量”。就在这一瞬间，玻尔恍然大悟，意识到他和哥本哈根解释遇上了大麻烦。这个称重的细节，令玻尔没有想到。其实早在专利局研究相对论的时候，爱因斯坦无意中就做出了一个惊人的发现，能量和质量是密不可分的： $E = mc^2$ 。通过对光子逃逸前后的盒子进行称重，很容易就可以算出质量上的差别。虽然这种极为微小的差别实际上是不可能测量出来的，但在思想实验领域中，这是完全没有问题的。

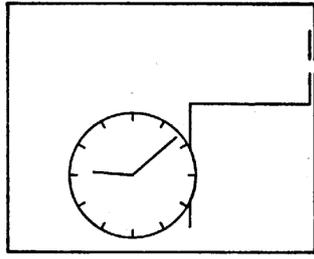


图8 爱因斯坦的光盒子思想实验

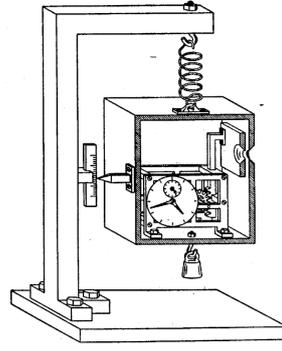


图9 玻尔改装后的光盒子

使用 $E = mc^2$ 将减少的质量换算成一个相等的能量数，就可以准确计算出一个光子的能量。通过与光盒子内控制遮挡板的时钟同步的位于实验室的另一个时钟，就可以得知光子逃逸的时间。看来，爱因斯坦已经设想了一个可以同时准确测量光子的能量和它逃逸时间的实验。而根据不确定性原理，能量和时间是一对共轭量，是不可能同时精确测量的。不用多举，仅此一例，足以摧毁哥本哈根学派赖以生存的基本原理。“玻尔惊呆了，他一时不知如何应对”。比利时物理学家罗森菲尔德回忆说“整个晚上，玻尔都极为闷闷不乐，一会儿走到这个人身边，一会儿又走到那个人身边，试图让他们相信这个光盒子实验是不可能正确的，如果爱因斯坦是对的，那么物理学也就终结了”罗森菲尔德还说“但是，他找不到任何理由来反驳”。^[2]玻尔度过了一个不眠之夜，一直在研究爱因斯坦那光盒子实验中的每一个细节。他拆开了这个虚构的光盒，试图发现其中存在的缺陷，并画出了一个他称之为“伪现实”的实验装置示意图（图9）来帮助自己理解。玻尔集中考虑称重这一步骤，记得他在1927年第五届索尔维会议的论证，任何对光盒子位置的测量将导致它的动量产生内在的不确定性，因为读刻度需要照亮它，就会引起光子从屏幕上散射使动量转移无法控制，也就无法精确测量粒子通过裂缝时从粒子向遮光板转移的动量。但与第五届索尔维会议上不同的是，爱因斯坦这次攻击的是能量时间的不确定关系，而不是位置动量关系。就在凌晨的某个时刻，当玻尔把目光集中到了光子逃逸前后称重上，突然脑中灵光一闪，找到了爱因斯坦光子盒实验的纰漏，原来爱因斯坦聪明反被聪明误，犯了一个几乎令人难以置

信的错误。

3.2 玻尔的相对论反击

爱因斯坦急于要击败哥本哈根关于量子现实性的观点，却忘记考虑了他自己发现的广义相对论理论。在广义相对论中，有一个令人瞩目的理论是“时钟的引力延迟”效应，在引力场中由于引力的作用，时间和空间都发生了畸变，空间的畸变导致物体在引力场中做曲线运动，而时间的畸变将引起时钟节拍变慢，引力越强，时空畸变越厉害。比如一个房间内有两个相同的调整成同步的时钟，一个挂在天花板上，一个固定到地板上，由于两处引力场不一样，地板处的引力场更强，那么地板上的时间过的就比天花板上的时间慢。同样，一个在重力场中移动的时钟走的速度就比一个固定的时钟要慢。玻尔就抓住了这一环节，第二天一早就漂亮地回击了爱因斯坦。他论证说，当光子从盒子里逃逸出去后，光盒子的重量就会变轻，光盒子必然上升，这个位置的变化将改变盒子里面时钟的节拍，当然也就不再与实验室的那个时钟保持同步了。因此它就不可能对遮光板打开以及光子逸出盒子的时间做出精确测量，如果光子质量测量越准，那么时钟的测时差也就越大，所以能量与时间还是不能同时精确测量的。

从理论上来具体分析就是在一个给定精度 Δx 下对光盒子位置的任一测定，都会带来光盒子动量的一个最小不准量 Δp ，它们的关系为： $\Delta x \cdot \Delta p \approx h$ 而动量的不确定量 Δp 显然又小于引力场在称量过程的整段时间 T 中所给与一个质量为 Δm 的物体的冲量，即： $\Delta p \approx \frac{h}{\Delta x} < \Delta mg \cdot T$ 由此可见，指针读数越准确（ Δx 越小），称量时间 T 就越长。现在，按照

广义相对论，当沿着引力方向移动一段距离 Δx 时，一个时钟的快慢就会改变一个量 ΔT ，即：

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{c^2} g \Delta x$$

将此式解出 T 带入上式有：

$$\Delta p < \Delta m g \cdot \frac{\Delta T c^2}{g \Delta x} \text{ 或者: } \Delta p \cdot \Delta x < \Delta m \cdot \Delta T c^2, \text{ 由于:}$$

$$\Delta E = \Delta m c^2, \Delta x \cdot \Delta p \approx h \text{ 故:}$$

$$\Delta E \cdot \Delta T > h$$

通过这一系列的不确定性，玻尔表明爱因斯坦的光盒子实验无法同时精确测量光子的能量和它逃逸的时间。海森堡的不确定性关系依然正确。哥本哈根学派不仅没有被光盒子所撼动，反而成了它最好的证明，而且更进一步揭示出它与相对论理论的内在联系，给它的光辉又添上了浓重的一笔。玻尔的这招“以彼之道，还施彼身”堪称第二次大论中最为戏剧性的一幕。

现在轮到爱因斯坦目瞪口呆，沉默不语了。他本来想给哥本哈根学派最后一击，没有想到玻尔反而用他的相对论进行反击并取得了胜利。不管最后爱因斯坦内心还保留着什么，但从表面上看，他也像当时的其他物理学家一样，接受了玻尔的观点，准备收兵，不再计较量子力学的不自洽，也不再抓住不确定性原理不放，而是集中精力把重点放在量子理论的“不完备性”上。用爱因斯坦自己的话说“我知道，量子力学内部并不存在矛盾之处，但是在我看来，它还是包含了一定的不合理性”。爱因斯坦热衷于维护物理学中的“确定性”，“真实性”与“局域性”，而玻尔的互补原理所要维护的正是量子力学的完备性。看来，他俩的第三次大论战将集中在量子力学的完备性上。

4 玻尔与爱因斯坦的第三次大论战---EPR 理论

4.1 来自 EPR 的终极挑战

1930 年第六届索尔维会议后，玻尔和爱因斯坦只有很少的接触，直接争论也减少了，特别是 1933 年 9 月他俩的朋友埃伦费斯特自杀后，他们之间的沟通渠道也中断了，由于希特勒的纳粹政策，爱因斯坦移居美国，1933 年 10 月到达普林斯顿。所以当年在比利时布鲁塞尔举办的第七届索尔维会议，爱因斯坦无法参加。在普林斯顿，爱因斯坦又有了

两个新助手（图 10），一个是来自麻省理工学院 26 岁的年轻纽约人罗森（N.Rosen），另一个是俄罗斯出生的 39 岁的波多尔斯基（B.Podolsky）。后者曾于 1931 年在加州理工学院见过爱因斯坦，并联合发表了一篇论文。自 1930 年后，爱因斯坦承认，尽管量子力学在逻辑上是一致的，但不是像玻尔声称的那样是一个完备的理论。

爱因斯坦知道，他需要新的策略来证明量子力学是不完备的。在 1935 年初的头几周，爱因斯坦在办公室会见波多尔斯基和罗森，说出了他的想法。经过商量后，由爱因斯坦提出论文的观点和总设计，波多尔斯基负责执笔和论文的细节处理，而罗森完成其中大部分的数学计算。这篇论文以三人名字的字头标注，称为 EPR 理论。

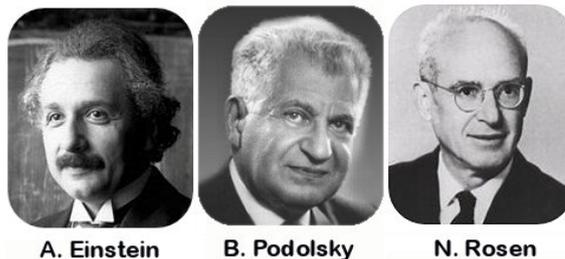


图 10 EPR 三人组

EPR 理论的思路来自爱因斯坦。他从前两次大论战中总结了经验，第一次论战由于动量的测量使得位置测量不准确，第二次论战中，能量的测量又使得时间的测量不精确，所以在这一回合的论战中，他打算设计出一个例子，使得两种测量互不干扰。为此，他想出了一个非常巧妙的思想实验。在三人的共同努力下，这篇论文最终于 3 月底完成和寄出，并于 5 月 15 日发表在美国的《物理评论》杂志上，这个论文的标题就是“量子力学在描述物理真实性上能被看作是完备的吗”。^[3]EPR 对此问题的回答是一个挑战性的“否”。这篇论文虽然只有短短 4 页，却对物理学界产生了强烈的震撼。

EPR 理论一开始，就定义了他们的实在论前提。“假如对一个系统没有任何干扰，我们就能够确定地预测一个物理量的值，那么对应于这一物理量，必定存在着一种物理实在的元素”。接着 EPR 理论提出了正确性与完备性的理论标准。它认为“一个理论的正确性应该以它的结论与人类经验的一致性的程度做出判断”。

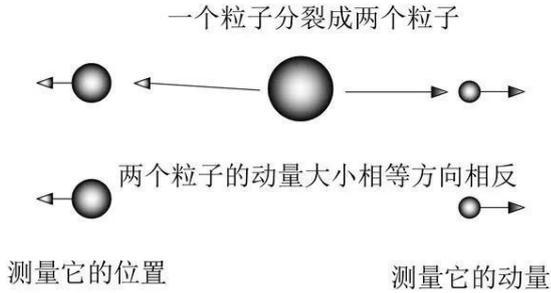


图 11 EPR 实验

EPR 理论进一步提到，在与实验相一致的情况下，量子力学理论还需具有“完备性”，并就理论的完备性提出了一个必要条件，这就是“物理实在”的每一个元素都必须能在这个理论中找到一个“对应物”或“对应的副本”。

设好这些定义后，EPR 理论就抬出了爱因斯坦那个非常耐人寻味的思想实验（图 11）。实验设想有两个粒子 a 和 b，比如它们是从同一个源中同时发出的正负电子。a 和 b 沿相反方向飞出，因为是从同一个源中出发的，不论它们离开彼此多远，它们带有相关的物理信息，例如自旋。现在对 a 进行测量，观察者可能得出两种不同的结果，比如测得 a 沿 Z 轴正向自旋（记为 +Z），根据哥本哈根解释，系统立刻“坍缩”为状态 1，此时，b 必然就是 -Z，即反向自旋；反之，如果 a 测得的是 -Z，b 必然呈现 +Z，虽然未测量之前无法确定它们每一个的自旋方向，但是，它们两个的自旋一定是反向的，当其中一个测出正转的结果，另一个同时呈现出负的结果，而无论它们之间有多远。至此，EPR 理论开始进入正题，也就是它的缺陷所在。EPR 理论承认，根据不确定性关系，在对 a 进行测量时，它的位置和动量不可能同时测得精确，例如动量（或自旋）测得精确时，其位置是不精确的，但是这一限制并没有涉及粒子 b，对粒子 b 的位置完全可以精确测量出来。现在，精确测量粒子 a 的动量，设粒子 a 与 b 的总动量为零（ $p_a + p_b = 0$ ），若对粒子 a 的动量 p_a 进行精确测量（ $\Delta p_a \rightarrow 0$ ），根据守恒定律可间接确定粒子 b 的动量 $p_b = -p_a$ 。此时，若直接测量粒子 b 的位置 x_b （ $\Delta x_b \rightarrow 0$ ），则理论上可同时精确获得 p_b 与 x_b 的值，从而绕过海森堡不确定性原理（ $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$ ）的限制。这样在不干扰 b 粒子的情况下同时精确测量了 b 的动量和位置，只不过位置是直接测量，而动量是间接测量的，但同时都是测量精确

的，至少从原理上看是完全可行的。此外，他们就这个假想实验，从另一个角度也提出了质疑。第二个粒子是如何精确地得知这个测量结果呢？难道 a 和 b 之间还有比光还快的信号传递吗？在显示不完备的同时，也直接违反了局域性原理，这更是爱因斯坦所不能接受的。

4.2 玻尔的紧急应对

1935 年罗森菲尔德当时正在哥本哈根，他回忆说：“来自 EPR 的攻击对我们来说犹如晴天霹雳，深深震撼了玻尔研究所”。玻尔立即放下手中的所有事情，决心全力以赴应对新一回合的挑战，他相信彻底检查 EPR 思想实验，将揭示爱因斯坦在哪里出了错。然而经过长时间的苦思冥想，他渐渐地恢复了冷静，发现 EPR 实验设计得既精妙又诡秘，所研究的系统没有力学干扰问题，驳倒它并不像最初设想的那么简单。为此，玻尔直接避开了 EPR 关于量子力学“完备性”的挑战，而是采取了迂回策略，就 EPR 的主要成分也是它的薄弱环节——“物理实在”作为突击点进行反击。玻尔没有反对 EPR 理论中根据测量 a 得到的知识来预测粒子 b 的可能结果，一旦粒子 a 的动量被测量了，正如 EPR 所阐述的，就有可能精确预计粒子 b 的动量的类似结果。然而，玻尔认为，这并不意味着这个动量是粒子 b 的现实性的一个独立元素。仅当对 b 进行了“实际的”动量测量才能说粒子具有动量，也就是说仅当粒子 b 与测量它的设备相互作用了，b 粒子的动量才成为“真实的”。玻尔坚称，无论是粒子的动量，位置，或其他什么量，只要不是直接经过测量所获得的结果，它们都不具有任何真实的意义。对于玻尔来说，在定义 EPR 的物理实在性元素中，测量仪器起关键作用。

玻尔虽然同意 EPR 理论中对粒子 a 的观察不会对 b 造成“机械的”干扰，然而玻尔认为现在有的不是 a, b 两个单粒子系统，而是一个双粒子系统，它们曾是相互作用的，彼此仍有千丝万缕的联系，对粒子 a 的测量或多或少会对粒子 b 产生瞬间的影响，不管它们分开的距离有多远。既然两个遥远的，具有相反自旋的粒子 a 和 b 本就是协调的一个整体，也就不存在什么“隔空”和“超距”作用一说。从理论上讲，尽管任何一对共轭的空间变量 x 和动量变量 p 都满足海森堡不确定关系： $xp - px = i\hbar$ ，但是，

和体系的组成部分有关的两个空间坐标之差 $x_1 - x_2$ ，这一点可以从 x_1 和 p_2 以及 x_2 和 p_1 的可对易关系直接得出，却是可以和对应的动量分量之和 $p_1 + p_2$ 对易的^[4]，

$$[x_1 - x_2, p_1 + p_2] = (x_1 - x_2)(p_1 + p_2) - (p_1 + p_2)(x_1 - x_2) = x_1 p_1 + x_1 p_2 - x_2 p_1 - x_2 p_2 - (p_1 x_1 - p_1 x_2 + p_2 x_1 - p_2 x_2) \text{ 又}$$

$$x_1 p_2 - p_2 x_1 = 0; \quad p_1 x_2 - x_2 p_1 = 0$$

所以上式可变为：

$$[x_1 - x_2, p_1 + p_2] = (x_1 p_1 - p_1 x_1) - (x_2 p_2 - p_2 x_2) = i\hbar - i\hbar = 0$$

因此， $x_1 - x_2$ 和 $p_1 + p_2$ 二者都可以在复合体系的一个态中精确地确定；如果用直接测量确定了 x_2 或者 p_2 ，那么我们就依次地预言 x_1 或者 p_1 的值。尽管不存在力学干扰问题，但一个粒子的任何改变都会影响另一个粒子。因此“同时精确测量”仅为表现现象，实则仍受互补性原理约束。玻尔的论文完成于 EPR 论文刊出一个月之后，并于 10 月 15 日也刊登在了《物理评论》上，玻尔的论文的题目就是“物理实在的量子力学描述能不能被认为是完备的”。论文页数共 6 页，虽然比 EPR 论文多了 2 页，但完成时间仓促，且在当时的年代量子叠加态与量子纠缠态等一系列奇异现象仅仅限于理论的探讨阶段，还缺乏实验依据，反驳显得含糊不清也软弱无力。爱因斯坦嘲笑玻尔的“妖术力”和“幽灵般”的相互作用。他告诉玻尔，“物理学应该代表时间和空间的现实性，不存在远距离的幽灵般的作用”。玻尔当然知道这一点，但玻尔争辩说：“没有量子世界，只有抽象的量子力学描述”。换句话说：“没有一个基本现象是真实的现象，除非这个现象是一个被观察的现象”。

5 物理学与实在——没有定论的尾声

爱因斯坦与玻尔关于量子力学的三次大论战不仅仅是关于上帝是否掷骰子，是否存在严格的因果律和决定论，也并非单单是定域性或者完备性的问题。它关乎的是实在，实在是否存在？或者说独立于我们的观察谈论物理实在有意义吗？对此，玻尔的回答十分明确：“我们所能知道的全部就是我们实验和观察的结果，而不是超出我们知觉之外的某种终极实在”。在玻尔与爱因斯坦的三次大论战中，虽然玻尔就爱因斯坦的每一个激辩点都做了反击，但并不认为自己就是一个胜利者。他发现爱因斯坦的每一次挑战中都有着不可思议的狡黠和智慧。这三

次大论战对玻尔来说，最重要之处在于激发了他不得不找出更准确，更清晰的方法来阐明量子力学的互补性原理。而爱因斯坦所使用的那个著名形容词：“鬼波引导着光子...” 不仅带有一种神秘的幽默感，更是一种穿透性的说法。既生爱，何生玻。两人的世纪大论战讨论彼此互不理解的东西，这种互不理解的根源当然是很深的，它们涉及对自然界“真实”的根本看法与信念。

爱因斯坦与玻尔的这场历史性的论战在物理学的发展史中产生了深远的影响。这两位 20 世纪最伟大的科学巨人，就“物理学与实在”的这场争论，不仅是智力的碰撞，也是对科学赤诚情感的交融，不仅对后世学术争论提供了范例，还是量子理论发展的触发点，特别是其中所涉及到的量子“叠加态”和“纠缠态”不仅成为量子理论新发展的生长点，同时也催生了玻姆，贝尔，惠勒，费曼，阿斯派克特等量子领域新一代人的成长，以及像他们一样的一代代物理研究者前赴后继地在为它（物理学与实在）寻找着答案，由此直接引导了量子力学后几十年的巨大发展。如今，贝尔实验已证实量子非局域性，但关于“实在论”与“工具主义”的哲学争论仍无定论，凸显玻尔与爱因斯坦之争的深远影响。

参考文献

- [1] 魏凤文,高新红.仰望量子群星---20 世纪量子力学发展史 [M].杭州 :浙江教育出版社,2016.3.
- [2] 曼吉特.库马尔著;包新周,伍义生,余瑾译.量子理论:爱因斯坦与玻尔关于世界本质的伟大论战玻[M].重庆 :重庆出版社,2012.1.
- [3] 玻尔著;戈革 译.尼尔斯.玻尔集.第七卷:量子物理学的基础 II (1933-1958)[M].上海:华东师范大学出版社, 2012.5.

- [4] (丹麦)玻尔 著;郁韬 译.原子物理学和人类知识 [M]. 北京 :商务印书馆出版,1978.7.
- [5] Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. Zeitschrift für Physik, 43(3-4), 172-198.
- [6] Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwert problem. Annalen der Physik, 79(4), 361-376.
- [7] Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? Physical Review, 47(10), 777.
- [8] Bell, J. S. (1964). On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. Physics Physique Физика, 1(3), 195-200.
- [9] Aspect, A., et al. (1982). Experimental Test of Bell's Inequalities. Physical Review Letters, 49(2), 91.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS