

你好！我是你们的学术导师。很高兴能带领大家深入探讨量子力学发展史上一个至关重要的时刻。今天我们要研读的这份文档，记录了物理学巨擘尼尔斯·玻尔（Niels Bohr）首次正式提出“互补性原理”的历史场景。这不仅是物理学的一次飞跃，更是一场深刻的哲学革命。

我们要解读的文本来自一本关于量子力学哲学的著作，重点讲述了1927年那场群星璀璨的科摩（Como）会议。请大家调整好呼吸，跟随我回到那个激动人心的物理学黄金年代。

【原文】

第四章 互补性诠释的早期说法

4.1 玻尔在科学的演讲

1927年秋天，在意大利的科摩[Como]城召开了纪念伏[A. Volta]逝世一百周年的国际物理学会议。科摩是伏氏诞生和逝世的地方。会议由马约拉纳[Q. Majorana]主持，与会的众多物理学家中有玻尔、玻恩、玻色[S. N. Bose]、布拉格[W. L. Bragg]、布里渊[M. Brillouin]、德布罗意、康普顿、德拜[P. Debye]、杜安[W. Duane]、费米[E. Fermi]、弗兰克[J. Franck]、弗伦克尔[Я. Френкель]、格拉赫[W. Gerlach]、海森伯、冯·劳厄[M. von Laue]、洛伦兹、密立根[R. A. Millikan]、帕邢[F. Paschen]、泡利、普朗克、理查孙[O. W. Richardson]、卢瑟福[E. Rutherford]、索末菲、斯特恩[O. Stern]、托尔曼[R. C. Tolman]、伍德[R. W. Wood]和齐曼[P. Zeeman]——真是当时物理学界的一次高级会议。只有爱因斯坦和埃伦费斯特[P. Ehrenfest]，虽然邀请了，却没有出席！

- 伏打(1745–1827)，意大利物理学家，他发展了电的流体理论，发现了水的电解，并且发明了伏打电堆，使得实验有了稳定可靠的电源。从此电学得到了迅速的发展，电压单位伏特(Volt)即来自他的名字。——译者注

是在聚集在卡杜奇学院[Istituto Carducci]的会堂中这群著名的听众面前。玻尔于1927年9月16日在一篇题为“量子假设和原子论的最新发展”的演讲①中，第一次向公众讲述了他关于互补性的观念。玻尔用以下的话开始他的演讲：

我将试图只利用简单的考虑而不深入到专门的数学性的细节，来对诸位描述某种一般的观点；我相信，这种一般的观点适于使我们对于从刚刚开始时的理论发展的一般趋势得到一个印象，而且我希望这种观点将有助于调和不同科学家们所持的那些外加矛盾的观点。

【解读】

同学们，如果说物理学界也有“全明星赛”或者“复仇者联盟”集结的话，那么1927年的科摩会议绝对算得上是一场盛况空前的聚会。

这段文字首先为我们设定了历史背景。1927年是量子力学发展的关键之年。就在这之前的几年里，海森堡创立了矩阵力学，薛定谔提出了波动方程，物理学界正处在一种既兴奋又困惑的状态：微观世界到底是个什么样子？

大家注意看文中列出的那一长串名字，这简直就是现代物理学的“封神榜”。你们在高中课本里学到的很多单位、常数和定律，都是以这些人的名字命名的：

- **普朗克**：量子论的鼻祖，普朗克常数 h 就是他的。
- **卢瑟福**：原子核式结构模型的提出者。
- **玻尔**：我们学的原子能级跃迁理论就是他搞出来的。
- **海森堡**：不仅有测不准原理（不确定性原理），还是矩阵力学的创始人。
- **泡利**：泡利不相容原理，解释了电子排布。
- **德布罗意**：提出了波粒二象性，物质波。
- **费米、玻色**：费米子和玻色子就是以他们命名的。
- **洛伦兹**：洛伦兹变换，相对论的先驱。

这些人聚集在意大利的科摩，原本是为了纪念电学先驱伏打（电压单位“伏特”就是为了纪念他），但实际上，这场会议成为了量子力学新观念的试炼场。

这里有一个非常有意思的细节：**爱因斯坦没有出席**。虽然爱因斯坦是量子论的奠基人之一，但他对后来量子力学的概率解释一直持有怀疑态度（那句著名的“上帝不掷骰子”）。他的缺席，使得这场会议成为了玻尔的主场。

在这样的场合下，玻尔发表了演讲。请注意玻尔的开场白，非常有他个人的风格——谦逊、谨慎，但暗藏玄机。他说不涉及“数学性的细节”，而是要描述一种“一般的观点”。这其实是因为玻尔的思维方式更偏向于哲学思辨，他试图解决当时物理学界的一个巨大矛盾：**粒子性（如海森堡的矩阵）和波动性（如薛定谔的波动）怎么看起来水火不容？**

玻尔希望用他的新观点——也就是即将登场的“互补性原理”，来“调和”这些看似矛盾的观点。这就像是他在说：“大家别吵了，你们看到的都是真理的一面，只是角度不同罢了。”接下来，我们将看到他是如何用深刻的逻辑来拆解这个矛盾的。

【原文】

玻尔对古典描述同量子现象作了对照：根据古典描述，物理现象可以不受显著的干扰而被观察；而量子现象的描述则遵从量子的假说，依照这个假说，每一原子过程都由一种本质的不连续性和他所称的个体性所表征。然后玻尔接着说道：“一方面，正如正常所理解的，一个物理体系的态的定义要求消除一切外来的干扰。但是在那种情况下，根据量子假说，任何观察都将是不可能的，而且最重要的是，空间概念和时间概念也将是不再有直接的意义了。

① Atti del Congresso Internazionale dei Fisici, Como, 11—20 Settembre 1927 (Zanchelli, Bologna, 1928), Vol. 2, pp. 565 – 588；演讲的实质内容重印于 Nature 121, 580 – 590(1928) 及

N. Bohr, Atomic Theory and the Description of Nature (Cambridge U.P., London, 1934), pp. 52 – 91; 中译文见《尼尔斯·玻尔哲学文选》(龙赛萍,商务印书馆,1999)第44—73页。此书有德文本(1931)、丹麦文本(1929)、法文本(1932)。此文的俄译文见 Н. Бор, избранные Научные Труды, т. 2.

另一方面,如果我们为了使观察成为可能而承认体系和不属于体系的适当的观察器械之间有某种相互作用,那么,体系的态的一个无歧义的定义自然就不再可能,而通常意义上的因果性也就不能存在了。就这样,量子理论的本性使我们不得不认为时空标示[space-time coordination]和因果要求[causality claim]是描述的两个互补而又互斥的特性,它们分别代表观察的理想化和定义的理想化;而时空标示和因果要求的结合则是古典理论的特征。”玻尔在这一段话里首次引进“互补”这个术语,把“时空标示”和“因果要求”称为彼此互补的。这一段话已包含了后来所谓的量子力学的“互补性诠释”或“哥本哈根诠释”的最早的说法之精髓。

【解读】

这段文字是整个文档的核心,也是理解玻尔“互补性原理”的关键。虽然文字有些拗口(这是玻尔的一贯特色,他写文章就像在绕口令),但只要我们剥茧抽丝,就能发现其中的奥妙。

玻尔首先指出了**经典物理**(古典描述)和**量子物理**的一个根本区别:

- **经典物理**(比如你扔一个篮球):你看它一眼,或者用摄像机拍它,这些“观察”动作对篮球的飞行轨迹几乎没有影响。我们可以“不受显著干扰”地观察它。
- **量子物理**(比如电子):这就完全不同了。你要“看”电子,就得用光子去撞它。对于宏观物体,光子的撞击微不足道;但对于微小的电子,光子的一撞就会彻底改变电子的状态。这就是文中说的“本质的不连续性”。

接下来,玻尔抛出了一个两难的困境,也就是著名的**观测难题**:

1. **如果你想定义一个系统的“态”(State)**:你必须保证它独立存在,不受外界干扰(“消除一切外来的干扰”)。就好比你要研究一片雪花完美的形状,你就不能去碰它,甚至不能让热气靠近它。但在量子力学里,如果你完全不干扰它,你就没有任何手段去探测它(因为探测必然涉及能量交换)。如果不探测,这个物体在时空中的位置和时间就变得没有意义了(你都不知道它在哪,谈何空间概念?)。
2. **如果你想进行“观察”**:你必须引入仪器去测量它(承认体系和观察器械之间有相互作用)。一旦你介入了,你这一撞,系统原来的状态就被破坏了,不再是原来的样子了(“无歧义的定义自然就不再可能”)。

这就引出了**“互补性”(Complementarity)**的定义。玻尔认为:

- **时空标示**(Space-time coordination):指的是搞清楚粒子在什么时间、什么位置(类似于问“它在哪?”)。这需要强烈的观测,会破坏粒子的动量。
- **因果要求**(Causality claim):在物理学里,因果性通常意味着根据能量和动量守恒定律来预测未来的状态(类似于问“它要去哪?具有多大能量?”)。要保持这种守恒和预测性,就不能干扰它。

在经典物理（牛顿力学）中，我们可以同时精准地知道一个物体在哪（时空）以及它具有多少能量/动量（因果），两者可以完美结合。

但在量子力学中，玻尔告诉我们：**这两者是“互斥”的，不可兼得，但又必须同时存在才能完整描述这个世界，这就是“互补”**。就像硬币的正面和反面，你一次只能看到一面，但只有正反两面合起来，才是一枚完整的硬币。

这也是著名的“海森堡不确定性原理”的哲学基础：位置（时空）和动量（因果/能量）不能同时测准。玻尔在这里把它上升到了哲学高度：**观察的理想化**（我想看清它）和**定义的理想化**（我想让它保持原样）是一对矛盾。

【原文】

我们将会看到，哥本哈根诠释并不是一组单纯的、清晰的、有着无歧义的定义的观念，毋宁说它是种种互有联系的观点的公分母。它并不同某种特定的哲学或意识形态立场有必然的联系，它能够、也已经为极不相同的哲学观点的信徒们所认可，从严格的主观主义和纯粹的唯心论，到新康德主义、批判实在论，直到实证论和辩证物论。此外，这个观点也并不一定只限于量子物理学的诠释。1930年，玻尔在他的法拉第讲座演讲词①中，就已经把这个观念推广到统计热力学，他说：“温度这个概念与所讨论的物体中的原子行为的细致描述达成互补的关系”。

玻尔也是第一个把互补性原理推广到生物学的人。在1932

① N. Bohr, “Chemistry and the quantum theory of atomic constitution”, 1930年5月8日在 Salter 会堂对化学学会会员的演讲，重印于 Journal of the Chemical Society, 1932, 349–383.

年8月15日于哥本哈根举行的国际光疗会议开幕式上发表的一篇讲话中，玻尔解释道，力学基础的修正：

一直直接扩展到一个物理理论究竟意味着什么这个问题本身；它不仅对于充分理解原子理论的现状不可少，而且也为讨论物理学同生命问题的关系提供了新的背景。……如果我们试图研究一个动物的各种器官，直到能够描绘出单个原子在生命机能中起什么作用的地步，那么我们无疑就得杀死这个生物。……按照这种观点，在生物学中，就必须把生命的存在看成是一个不能加以说明而必须出发的基本事实，就如同从古典的机械物理学的观点看来是不合理的作用量子与基本粒子的存在合起来就构成了原子物理学的基础一样。①

1982年，约尔丹②在一篇关于量子力学和生物学的短文中发表了类似的想法，他在文中把活力论[vitalism]和非活力论[physicalism]说成是对生命本质的研究中的两个互补的侧面。

【解读】

最后这一部分非常精彩，它展示了物理学思想是如何溢出实验室，影响到哲学、化学甚至生物学的。

首先，作者澄清了所谓的**“哥本哈根诠释”**。我们在课本里学的量子力学，大多属于这一派。但它其实不是一本严丝合缝的教条，而是一群聪明人（以玻尔、海森堡为首）达成的一种“共识”或“公分母”。有趣的是，无论你是唯心主义者还是唯物主义者，似乎都能在这个理论中找到立足点，足见其包容性和深邃性。

紧接着，文本介绍了玻尔如何将“互补性”推广到其他领域，这是非常体现玻尔智慧的地方，大家可以把它作为跨学科思考的范例：

1. 热力学的互补性（温度 vs. 原子行为）：

大家在高中物理学过，温度是大量分子平均动能的标志，是一个统计概念。

- 如果你想知道**温度**，你需要测量整个系统的宏观状态。
- 如果你想知道**每一个原子的具体行为**（位置、速度），你就进入了微观细节。
- 当你精确关注每一个原子的细节时，“温度”这个宏观概念就失去了意义（一个原子没有温度）。反之，当你测量温度时，你就忽略了单个原子的细节。这就是一种互补关系。

2. 生物学的互补性（生命 vs. 原子分析）：

这个类比更加震撼。玻尔提出：

- 如果你想从物理化学的角度彻底搞清楚一个生物体，你就要分析它每一个原子的运动和作用。
- 但是，要做到这种极致的分析，你往往需要解剖、切片，甚至用高能射线去探测。结果就是：“**我们无疑就得杀死这个生物**”。
- 所以，**“对生命的原子级分析”和“生命本身的存活”**是互补（互斥）的。你不能同时既把一个生物当成一堆原子来完全解析，又保持它作为一个活体来观察。

最后提到的“活力论”（认为生命有某种神秘的灵气）和“非活力论”（认为生命只是复杂的物理化学反应），在玻尔看来，并不是非黑即白的对立，而是观察生命的两个互补侧面。

总结一下：

这篇文档带我们回顾了玻尔在1927年科摩会议上的高光时刻。他提出的“互补性原理”告诉我们，世界是复杂的，有时候两种看似矛盾的描述（如波和粒子、时空和因果、生命和原子分析）其实是同一事物的两个侧面。我们无法同时得到它们，但必须同时承认它们，才能完整地理解这个世界。这不仅是物理学的智慧，更是人生的智慧。同学你好！很高兴能和你一起探讨这段充满学术气息的物理学史料。别被这些密密麻麻的脚注和引用吓倒，这其实是一段非常精彩的科学思想“探险记”。我们今天要读的内容，主要讲的是量子力学中的核心概念——“互补性原理”（Complementarity），是如何从物理学溢出，影响到生物学、人类学甚至哲学的。

咱们把这段材料分成两大部分来精读。第一部分主要讲述“互补性”这个概念的跨界之旅。

【原文】

① N. Bohr, “Light and life” , Nature 131, 421–423, 457–459 (1933); 重印于N. Bohr, Atomic Physics and Human Knowledge (Chapman and Hall, London; Wiley, New York, 1958), pp. 3–12; 中译文“光与生命”, 见《尼尔斯·玻尔哲学文选》(龙赛萍, 商务印书馆, 1999)第103—113页。此书有丹麦文本(1957)、德文本(1958)、法文本(1961)及俄文本(1963)。

② P. Jordan, “Die Quantenmechanik und die Grundprobleme der Biologie und Psychologie” , Die Naturwissenschaften 20, 815–821 (1932); “Quantenphysikalische Bemerkungen zur Biologie und Psychologie” , Erkenntnis 4, 215–252 (1934); “Ergänzende Bemerkungen über Biologie und Quantenmechanik” , 同上5, 348–352 (1935),。

年之后, 在哥本哈根人类学及种学国际会议(1938年8月)上, 玻尔①在克伦堡城堡[Kronborg Castle]的大厅里对他的听众解释了互补性关系在研究人类社会的原始文化中的作用。

在全部用来讨论互补性的1948年的 *Dialectica* [辩证法] 上, 数学家兼哲学家贡瑟特②特发表了一篇文章③, 他在该文中主张, 因为我们的知识是通过对实在的逐级揭露而得到的进步的, 而互补性概念指的就是这个辩证过程中任何两级之间的关系, 因此互补性在一切系统性研究的领域中都具有潜在的适合性。

互补性已被应用于心理学、语言学、伦理学和神学③。只举一个在这个最后一方面的例子: 英国皇家学会会员和牛津大

① N. Bohr, “Natural philosophy and human culture” , Nature 143, 268–272 (1939), 重印于文献3(1958) pp. 23–31; 中译文“自然哲学和人类文化”见文献3(1964) 第26–35页。

② F. Gonseth, “Remarque sur l'idée de complémentarité” , Dialectica 2, 413–420 (1948)。

③ 见 P. Alexander, “Complementary description” , Mind 65, 145–165 (1956), D. M. Mackay, “Complementary description” , Mind 66, 390–394 (1957), T. Bergstein, “Complementarity and philosophy” , Nature 222, 1033–1035 (1969) 及 T. Bergstein, Quantum Physics and Ordinary Language (Macmillan, London, 1972), N. Brody and P. Oppenheim, “Application of Bohr's principle of complementarity to the mind-body problem” , Journal of Philosophy 66, 97–113 (1969). 关于互补性与康德哲学之间的关系见C. F. von Weizsäcker, “中译文“光与生命”, 见《尼尔斯·玻尔哲学文选》(龙赛萍, 商务印书馆, 1999)第103—113页。此书有丹麦文本(1957)、德文本(1958)、法文本(1961)及俄文本(1963)。

【解读】

这段文字看起来引用了很多文献, 显得很枯燥, 但如果我们剥开这些学术外衣, 你会发现一个非常有趣的现象: **物理学思想的“出圈”**。

作为高三学生, 你们在物理课本上学过波粒二象性, 知道光既有波动性又有粒子性, 这就是“互补性”最基础的物理含义。但在上世纪30到40年代, 这个概念被它的提出者尼尔斯·玻尔(Niels Bohr)玩出了新花样。

首先，这段文字开头的大量注释提到了玻尔的文章《光与生命》(Light and Life)。这非常有意思，玻尔认为，我们在研究生物时也存在一种“互补”的困境：如果你想把一个生物体细分到原子层面去研究它的物理机制（粒子性），你可能就杀死了它，从而失去了研究“生命”本身（波动性/整体性）的机会。所以，**物质结构的研究和生命机能的研究是互补的**——你不能同时既把如果它拆得七零八碎看原子，又指望它活蹦乱跳给你看生命。

接着，文中提到了1938年在“克伦堡城堡”（也就是莎士比亚笔下哈姆雷特的城堡）的一场演讲。玻尔把这个物理学概念推广到了**人类学**。他认为，不同的文化（比如东方文化和西方文化）就像光的波动性和粒子性一样，虽然看起来矛盾，但如果你想完整理解“人类文明”这个整体，这两种视角都是必须的，它们互为补充。

然后，文中提到了贡瑟特(Gonseth)在1948年的观点。这把互补性提升到了**认识论**的高度。你可以把它想象成爬梯子（“实在的逐级揭露”）。贡瑟特认为，人类获取知识的过程就是辩证的，就像一定要左脚迈完迈右脚一样，互补性不仅仅是量子力学的专利，而是我们认识这个世界所有复杂系统（无论是心理学、语言学还是伦理学）的通用法则。

简单来说，这段话的核心思想是：“**互补性**不仅仅是解决“电子是波还是粒子”的工具，它变成了一种哲学万能钥匙，用来解释那些表面对立、实则共存的复杂关系。这在当时是一股巨大的学术潮流，大家试图用物理学的新发现去重塑世界观。

【原文】

学 Rouse Ball 讲座数学教授布莱森①认为，宗教和科学是两种互相代替的方法，它们虽然表面上是不可调和的，但却都有真理性，是彼此互补的。

在我们的研究中，我们将只在物理学的范围内来讨论互补性。但即使在这一方面，它也包含了各式各样的学说，因为可以从各种不同的角度来陈述互补性；例如可以像许多现代物理学的普及读物所做的那样，从纯粹本体论的观点来陈述；也可以像玻尔提倡的那样，从认识论的观点来陈述，或者像他的学生冯·威扎克提议的那样，从逻辑的角度来陈述。对互补性观念的历史的分析，由于下述事实而更加复杂了：不但在不同作者的笔下，这个词代表着不同的、虽则自然是有联系的概念，就是在同一作者的著作中，这个词也常常发生相当大的语义变化。我们将看到，玻尔本人就是如此。

因此首先让我们把注意力集中在玻尔关于这个问题早期著作，以尽可能精确地搞清楚。玻尔所说的原子物理学中的“互补性”究竟意味着什么。下述事实可以表明这个任务实在不容易：爱因斯坦在他写的“对批评的回答”②中，在提到玻尔在其论文“就原子物理学中的认识论问题和爱因斯坦进行的商榷”③中表述的互补

① C. A. Coulson, Christianity in an Age of Science (Oxford U. P., London, 1953).

② P. A. Schilpp, ed., Albert Einstein; Philosopher-Scientist (Library of Living Philosophers, Evanston, Ill. 1949; Harper and Row, New York, 1959), pp. 663—688, 此书有德文本(1955)。此文的中文译文见《爱因斯坦文集》第一卷(许良英等译,商务印书馆,1977),第462—484页。

③ N. Bohr, “Dicussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics”, 载

于 124 页注解②文献 (1949, pp. 199—241), 重印于 120 页注解①文献 (Wiley, 1958, pp. 32—66); 中译文见文献③ (商务印书馆, 1999, 第 137—179 页)。

第四章 互补性诠释的早期说法

性观念时, 爱因斯坦抱怨道 (写于 1949 年 1 月底): “尽管我为它花 了大量的力气, 我却一直未能得到玻尔的互补性原理的明确表述”。如果对于爱因斯坦这个可谓是反互补性的专家来说, 要得出 “互补性” 的一个清晰的定义或许是困难的, 那么下面的有关互补性诠释的一个热心的拥护者的例子, 就更清楚地表明了我们的任务是多么困难。

【解读】

这段文字将我们的视线从广阔的哲学应用拉回到了物理学本身, 并且揭示了一个极其深刻的矛盾: **连最聪明的大脑都搞不清楚“互补性”到底是什么定义。**

首先, 接着上一段的话题, 文中提到了布莱森 (Context implies Coulson, based on footnote ①) 教授的观点, 他认为**科学与宗教**也是互补的。这就像是一张唱片的A面和B面, 虽然看似不可调和 (一个讲实证, 一个讲信仰), 但只有两者结合才能完整描述人类的经验。这是一个非常包容的观点。

但在那之后, 作者话锋一转: “在我们的研究中, 我们将只在物理学的范围内来讨论互补性。”这句话是这一章的 “定海神针”, 告诉我们别扯太远, 还是回来聊物理。

然而, 即使回到物理圈, 事情也没那么简单。作者列举了三种理解 “互补性” 的角度, 这三个词对高中生来说可能有点抽象, 我来给你们翻译一下:

1. **本体论 (Ontological)**: 关注 “世界本来是什么样”。这种观点认为, 电子本身就是一种既是波又是粒子的奇怪东西。
2. **认识论 (Epistemological)**: 这是玻尔 (Bohr) 最喜欢的角度, 关注 “我们如何认识世界”。玻尔认为, 我们不用管电子本来是什么, 重点是我们**怎么观测**它。用粒子探测器, 它就是粒子; 用波动实验, 它就是波。**互补性是观测手段的互补。**
3. **逻辑 (Logical)**: 从语言和逻辑结构上分析这种看似矛盾的描述如何共存。

这一段最精彩的地方在于引出了大 Boss——**爱因斯坦**。

你们都知道爱因斯坦和玻尔是 “相爱相杀”的老对手。爱因斯坦在 1949 年抱怨说, 他花了那么大力气, 还是没搞懂玻尔的 “互补性原理” 到底有个啥明确定义。

这其实不仅是爱因斯坦的困惑, 也是量子力学初学者的困惑。为什么呢? 因为玻尔这个人的思维方式很像古希腊哲学家, 他的术语在不断进化、变动。爱因斯坦作为经典的 “实在论者”, 他想要像数学公式一样精确、死板的定义, 而玻尔给出的却是一个随着观测情境变化的哲学框架。

作者引用爱因斯坦的抱怨，目的是为了给这一章（第四章）做铺垫：**定义“互补性”是一件极其困难的任务。**既然连爱因斯坦都觉得难，那我们接下来的分析就需要格外小心和细致，去追溯玻尔早期的说法，看看这个让物理学界争吵了半个世纪的概念，最初到底长什么样。你好！我是你的学术导师。很高兴能带你一起探索这段关于量子力学发展史和玻尔“互补性原理”的珍贵文献。

这部分内容虽然有些深奥，涉及物理学史和哲学思考，但它其实是在探讨一个非常本质的问题：**我们要如何描述微观世界？**咱们高中物理学过波粒二象性，也听说过测不准原理，而今天这段材料，将带你走进这些概念背后的思想源头。

我们将把文档分为几个主要部分进行细致的解读。

【原文】

在玻尔的七十岁寿辰（1955年10月7日）之际，当时在哥丁根的普朗克物理研究所工作的冯·威扎克写了一篇关于互补性与逻辑的渊博的论文①。虽然冯·威扎克没有出席1927年的科摩会议。但是他在莱比锡当海森伯的助手，即很快就使他密切地接触到玻尔的互补性观念。他在刚讲的这篇文章中明白地说到，为了准备该文，他极为仔细地重读了玻尔早年关于这个观念的论文，并得出结论说，他在比25年更长的时间里都误解了玻尔的互补性观念，现在他自以为总算是发现了它的真意了。但当他询问玻尔他的诠释（我们即即将对它详细讨论）是否准确地表达了玻尔的想法时，玻尔却给他了一个断然否定的回答②。这个历史故事应当是对我们的一个警告，警告我们在分析玻尔原来的互补性观念时要特别慎重。

玻尔在科摩演讲中的出发点是下面这句话：“[量子]理论的精

① C. F. von Weizsäcker, “Komplementarität und Logik”, Die Naturwissenschaften 42, 521—529, 545—555 (1955).

② 玻尔1956年3月5日致冯·威扎克的回信，这封信是对冯·威扎克1956年1月17日来信的复信。

髓可以表现在所谓量子假设中；这个假设赋予任一原子过程以一种本质上的不连续性，或更恰当地说是个体性，这种性质是古典理论完全不熟悉的，它表现为普朗克的作用量子。因为根据这个量子假设，能量交换只以分立的非无限小的梯级来进行，因此正如玻尔两年后在一篇关于他的基本观念的谈话①中说明的那样，作用量子不可分性的假设“不但要求客体和测量仪器之间的相互作用不是无限小而是有限大小，而且甚至还要求在我们对这种相互作用的说明中拥有一定的活动范围”。这是因为，由于与古典物理学相反，客体和仪器之间的相互作用不能忽略，因此“就既不能赋予现象又不能赋予观察动作以一种通常的物理意义上的独立的实在性了”②。

【解读】

这段文字非常精彩，它首先用一个轶事给我们打了一剂“预防针”，然后直击玻尔思想的核心。

首先，作者讲了一个关于冯·威扎克（海森伯的助手，著名物理学家）的故事。他在玻尔身边工作，研究了25年的“互补性原理”，自以为终于懂了，写了篇论文给玻尔看，结果被玻尔“断然否定”。同学们，这告诉我们什么？**量子力学的哲学解释是非常反直觉、非常微妙的。**哪怕是顶级的大物理学家都容易误解，所以我们在学习时感到困惑是非常正常的。

接下来，文章进入正题，引用了玻尔在1927年科摩会议上的演讲，这是量子力学的里程碑。玻尔的出发点是**“量子假设”**。

在高中物理中，你们学过普朗克常数 h 和光子能量 $E = h\nu$ 。这段话里的核心概念是**“不连续性”和“作用量子不可分性”**。

- **古典理论（经典物理）：**世界是连续的。比如你给一辆车加速，速度是平滑上升的；你用尺子量桌子，理论上你可以把对桌子的干扰降到无限小（比如仅仅是光照在桌子上），这种干扰可以忽略不计。
- **量子理论：**能量是一份一份的（分立的梯级）。更关键的是，“**客体和测量仪器之间的相互作用不是无限小的**”。

这是什么意思呢？想象一下，你要测量一个电子的位置。你必须得“看”到它，这意味着至少要有一个光子撞击在这个电子上。在宏观世界，光子撞击汽车，汽车纹丝不动。但在微观世界，这一个光子的能量足以把电子踢飞！

所以，玻尔指出：**测量行为本身会不可避免地、不可忽略地改变被测量的对象。**

原文中这句“既不能赋予现象又不能赋予观察动作以一种通常的物理意义下的独立的实在性了”，翻译成大白话就是：在量子世界里，你不能把“电子在做什么”（现象）和“你怎么测量的”（观察动作）分开来看。**没有脱离观察的“客观实在”，只有“被观察到的现象”。**这种**“观测者与被观测者不可分割”**的思想，就是理解互补性原理的第一把钥匙。

【原文】

按照玻尔的看法，这个结果具有深刻的后果。“一方面，正如通常所理解的，一个物理体系的态的定义要求消除一切外来的干扰。但是在那种情况下，根据量子假设，任何观察就都将是不可能的，而且最重要的是。空间概念和时间概念也将不再有直接的意义了。另一方面，如果我们为了使观察成为可能而承认体系和不属于体系的适当的观察器械之间有某种相互作用，那么，体系的态的一个无歧义的定义自然就不再可能。而通常意义上的因果性

① N. Bohr, “The atomic theory and the fundamental principles underlying the description of nature”, 它是 1929 年 8 月 26 日在哥本哈根举行的斯堪的纳维亚自然科学家会议上发表的一篇演讲的译文，重印于文献①(1934, pp. 102—119)；中译文“原子理论和描述自然所依据的基本原理”，载于文献①(商务印书馆, 1999) 第 82—95 页；德译文载于 Die Naturwissenschaften 18, 73—78 (1930), 重印于 120 页注解①文献 (1931, pp. 67—77).
② 见 120 页注解①文献 (商务印书馆, 1999, 第 45 页).

第四章 互补性诠释的早期说法

也就不复存在了”。于是,前面已引用过的这一段话就导致结论:时空标示和因果要求是对物理观察的描述中的互补性。

正如上述引文清楚地表明的,玻尔在1927年的互补性观念首先指的是不可能同时对原子现象进行时空描述和因果描述。早在1925年,在哥本哈根举行的斯堪的纳维亚数学会议上的一篇演讲①中,玻尔就已指出,物理学的发展已使人们认识到对原子现象的一个贯彻一致的因果描述是不可能的。虽然定态的观念、定态之间的跃迁的观念以及同当时新建立的克拉默斯—海森伯散射理论相联系的那些观念在当时还是玻尔最为关心的所在,他在1925年8月就已宣称:“和通常的力学相反,新的量子力学并不处理原子粒子的运动的时空描述”。②看来,在1926年秋天,玻尔必定已经达到了从原理导向互补性原理的关键性一步。下面这样一些说法,如惠特—汉森③断言的“他[玻尔]从海森伯的测不准关系出发,在1927年表述了他的著名的互补性原理”,或贝道和奥本海姆④宣称的“测不准原理的发现推动了玻尔提出互补性”,如前所述,都是错误的。玻尔在他的科摩讲演中接着说,将不胜任的古典属性都照搬给微观客体,造成了某种意义含混,例如像熟知

① N. Bohr, “Atomic theory and mechanics”, 重印于120页注解①文献(1934, pp. 25—51);中译文“量子论和力学”,见120页注解①文献(商务印书馆,1964,第20—38页)。

② 同上, p. 48. 中文(商务印书馆,1999), 第36页。

③ J. Whitt-Hansen, “Some remarks on philosophy in Denmark”, Philosophy and Phenomenological Research 12, 377—391 (1952).

④ H. Bedeu and P. Oppenheim, “Complementarity in quantum mechanics—A logical analysis”, Synthese 13, 201—232 (1961).

的关于光或电子的波动性和粒子性的两难命题所表明的那样。玻尔说道:“这两种关于光的基本的看法,[的确]应该已成为了得到了实验证据的诠释的两种不同的尝试,古典概念的局限性在这两种尝试中以互补的方式表现了出来”。

【解读】

这段话非常关键,它揭示了“互补性”真正的定义,并纠正了一个常见的历史误区。

首先,我们要理解玻尔所说的**两难困境 (Dilemma)**,这是互补性原理的根基:

1. 想保持“孤立态”(**Definition of State**): 如果你想完美地定义一个系统(比如知道它所有的能量守恒、动量守恒),你就不能打扰它。一旦不打扰它,你就没法观测它(因为观测需要相互作用)。这时候,你拥有了完美的“因果性”(能量守恒),但失去了“时空概念”(你不知道它在哪、何时发生)。
2. 想进行“观测”(**Observation**): 如果你想知道粒子在哪儿(时空标示),你就必须用仪器去测量它。一测量,就引入了干扰,破坏了系统的孤立状态。这时候,你得到了“时空描述”,但失去了严格的“因果性”(因为干扰导致未来的状态变得不确定了)。

所以，玻尔得出一个惊人的结论：“时空描述”和“因果描述”是互补的。这里的“互补”意思是：它们彼此排斥，不能同时完美得到；但它们又都是描述自然所必需的。就像硬币的正反面，你一次只能看到一面，但两面加起来才是一枚完整的硬币。

其次，这一段澄清了一个重要的历史误区。

很多教科书会说，是海森伯先发现了“测不准原理”（Uncertainty Principle），然后玻尔受启发才提出了“互补性原理”。

但这段文本告诉我们要尊重史实：玻尔早在1925年（海森伯发表测不准原理的两年前）就已经意识到，那种像经典力学一样，既能精确描述轨迹（时空），又能精确预测未来（因果）的方法在原子世界行不通。

互补性原理是玻尔深刻哲学思考的产物，而不是仅仅对数学公式的解释。

最后，文本提到了**“波粒二象性”**（Wave-Particle Duality）。这是互补性最著名的例子。光有时候像波（波动性），有时候像粒子（粒子性）。在玻尔看来，这正是古典概念局限性的体现——我们被迫用宏观世界的词汇（波或粒子）去描述微观世界，而微观客体本身既不是纯粹的波，也不是纯粹的粒子，我们需要这两种互斥的图景“互补”地来完整描述它。

【原文】

虽然通常的电磁理论对光在空间和时间中的传播提供了令人满意的描述，但是在辐射与物质之间的任何相互作用中的能量和动量的守恒——玻尔认为这是光学现象的因果方面——却恰恰是在爱因斯坦提出的光量子概念中得到了合适的表达①。物质的基本粒子（电子等）的物理学也呈现出类似的局势。

玻尔在他的科摩讲演的最后一部分里讨论了下面这个问题：尽管在微观物理学中摈弃了时空的叉瓣是因果的描述，古典的描述方式究竟还能在什么程度上应用，这个问题当然涉及海森伯关系。玻尔在讨论这个问题的一开始，引用了已经确立的普朗克—德布罗意—爱因斯坦方程：

$$E = h\nu \quad (1)$$

$$p = h\sigma \quad (2)$$

它们分别把能量 E 和动量 p 同频率 ν 和波数 σ 联系起来，或用玻尔的记号：

$$E\tau = p\lambda = h \quad (3)$$

其中 τ 和 λ 分别为振动周期和波长。玻尔写道：“一方面，能量和动量是和粒子概念相联系的，从而可以按照古典观点用确定的时

【解读】

这一段将前面的哲学讨论落实到了具体的物理方程上，这也是咱们高三物理选修内容中非常重要的部分。

1. 光的两种面孔：

- **电磁理论（麦克斯韦方程组）**：擅长描述“光在时空中的传播”。比如光的干涉、衍射，这些都是波的特性，需要在时间和空间中铺开来描述。
- **光量子概念（爱因斯坦光电效应）**：擅长描述“相互作用中的能量动量守恒”。这就是玻尔所谓的“因果方面”。当我们讨论光把能量传给电子时，我们要把光看作一颗颗子弹（光子）。

2. 连接两个世界的桥梁——普朗克常数(\hbar)：

文中列出了三个公式，咱们仔细看看：

- (1) $E = \hbar\nu$: 左边 E 是能量（粒子属性），右边 ν 是频率（波的属性）。
- (2) $p = \hbar\sigma$: 左边 p 是动量（粒子属性），右边 σ 是波数（波的属性）。
- (3) $E\tau = p\lambda = \hbar$: 这里 τ 是周期， λ 是波长。这其实是前面公式的变形（因为 $\nu = 1/\tau$, $p = \hbar/\lambda$ ）。

重点在于等号！

这几个简单的方程，用普朗克常数 \hbar 强行把原本风马牛不相及的两个概念——“粒子性”(E, p) 和“波动性”(ν, λ) ——画上了等号。

3. 玻尔的深意：

玻尔引用这些方程是为了说明：我们无法摆脱古典的概念。

- 当我们说“能量”和“动量”时，我们脑子里想的是粒子，是可以应用守恒定律（因果性）的东西。
- 当我们说“频率”和“波长”时，我们脑子里想的是波，是需要在时空中延展的东西。
- 而在量子力学中，因为 \hbar 的存在，这两个方面被死死地绑在了一起。你不能只要其中一个而完全扔掉另一个。

这再次回到了互补性的主题：微观客体迫使我们必须同时使用这两种相互矛盾的古典图景。你想测量动量（粒子性），你就得牺牲对位置（波动性/时空描述）的精确知晓，反之亦然。这也正是为什么海森伯的测不准关系（不确定性原理）会出现——它不仅仅是测量的技术限制，而是大自然本身属性的体现，即“互补性”在数学上的表达。【原文】

① 见 120 页注解①文献，中文版（商务，1999，第 47 页）。

第四章 互补性诠释的早期说法 129

空坐标来表征；而另一方面，振动周期和波长却涉及一个在空间和时间中无限延伸的平面简谐波列”。玻尔接着说，借助于弗加原理，可以建立起同通常的描述方式的一种联系，因为由于德布罗意的著名的结果①（波场的群速度等于和波场相联系的粒子的移动速度），叠加原理使我们可以把波包证认为粒子。玻尔指出，把一个粒子同一个波包联系起来，这几乎是明白地[ad oculos]宣告

了描述的互补性质;因为“波群的利用必然会使得周期和波长的取值不明确”,从而也使得由公式(3)给出的“相应的能量和动量的取值不明确”。

对于平面波 $A \cos 2\pi(vt - x\sigma_x - y\sigma_y - z\sigma_z)$ 并引用从经典理论已知方程

$$\Delta t \cdot \Delta v = \Delta x \cdot \Delta \sigma_x = \Delta y \cdot \Delta \sigma_y = \Delta z \cdot \Delta \sigma_z = 1, \quad (4)$$

玻尔从(3)式导出海森伯关系

$$\Delta t \cdot \Delta E = \Delta x \cdot \Delta P_x = \Delta y \cdot \Delta P_y = \Delta z \cdot \Delta P_z = \hbar, \quad (5)$$

它表示了属于微观客体的时空变数(t, x, y, z)和能量-动量变数(E, P_x, P_y, P_z)的取值的最大精确度之间的一个普遍的反比关系。玻尔接着说:“这一情况可以看成是对时空描述和因果要求的互补性的一个简单的符号表示”。

【解读】

大家好!作为你们的导师,今天我们深入探讨量子力学巨人尼尔斯·玻尔(Niels Bohr)思想的核心——“互补性原理”。这段文字看似枯燥,实则是物理学史上一次惊心动魄的思想飞跃。

首先,我们要理解玻尔在这里处理的矛盾: **粒子 vs 波**。在经典物理中,粒子像子弹,在某个时刻必然有一个确定的位置(时空坐标);而波像水面的涟漪,它是延伸的,占据着广阔的空间和时间。你没法说一个单纯的波“在”某一个具体的点,因为它无处不在。

玻尔引入了“波包”这个概念来调和两者。想象一下,你把许多不同频率的波叠加在一起,它们在某些地方相互增强,在某些地方相互抵消,最后形成了一团局限在小范围内的“波疙瘩”,这就是波包。这团波包看起来就像一个粒子,因为它有比较集中的位置,并且按照群速度移动(这里提到的德布罗意关系,就是指波包移动的速度等于粒子速度)。

但是,这里有一个巨大的代价,也就是玻尔所说的“互补性质”。

如果你想要一个非常集中的波包(位置 x 很精确,即 Δx 很小),你就必须叠加非常多不同波长(动量 P)的波。这就意味着,这个粒子包含的动量范围非常广,你根本不知道它确切的动量是多少(ΔP 很大)。

文中列出的公式(4)是纯数学上的“傅里叶变换”性质:波的时间持续越短(Δt 小),它的频率成分就越杂(Δv 大)。玻尔巧妙地利用爱因斯坦和德布罗意的关系(能量 $E = h\nu$,动量 $P = h\sigma$),把这个纯数学公式变成了物理上的海森伯不确定性原理——公式(5)。

所以,这里玻尔告诉我们:**精准的时空描述(知道在哪、什么时候)和精准的因果描述(知道能量、动量,从而预测未来)是鱼和熊掌不可兼得的**。这不是测量技术的缺陷,而是自然的本质属性。这就好比你在听音乐,如果你把一段录音切得极短(确定了时间),你就听不出具体的音调(无法确定频率);如果你想听清音调,就必须播放一段时间(时间位置就不明确了)。这就是“互补性”的数学本质。

【原文】

读者应已注意到,玻尔导出测不准关系的方法(下面一段话对于时间-能量关系特别重要,其理由以后会说明)同海森伯的推导是根本不同的。为了使读者对这一点有深刻印象以备以后参考之

$$\textcircled{1} \quad v_g = dw/dk = dv/d\sigma = dE/dp = \frac{d}{dp}(P^2/2m) = P/m = v.$$

用,我们来更详细地分析一下玻尔的方法。玻尔把粒子的波函数 分解成傅立叶分量 $\exp[2\pi i(p_x - Et)/\hbar]$, 考察各分量之间的干涉对时间的依赖关系。在空间一固定点上的相长干涉与相消干涉 之间的时间推移, 必须至少等于各分量间的频率间隔 $\Delta E/\hbar$ 的倒数, 才能产生所需的相对位相变化。波粒子是在空间一固定的干涉 效应为相长干涉的时间间隔内的任一时刻 经过该点的, 玻尔得到 结论说, 粒子经过该点的可能时刻的分布范围 Δt 满足关系式 $\Delta t = \hbar / \Delta E$, 其中 ΔE 是波函数的傅立叶分解式中能量值的分布 范围。

这就是玻尔在1927年秋天所陈述的量子力学的互补性诠释 的原来的说法。在玻尔讲完后进行了讨论①。玻恩、克拉默斯、海森伯、费米和泡利曾参加了这场讨论, 但讨论中对玻尔的论文的真正争论之点却几乎毫未触及。对于那些头一次听到玻尔的想法 的人来说, 要理解些这些想法的全部意义也许是太困难了。例如,后来成为互补性的最雄辩的提倡者之一的罗森菲尔德,是这样谈到 玻尔的演讲的:“我看不出、也感觉不到演讲中的任何微妙之 处”②。据说曾听到过有关科摩讲座的维格纳说道,玻尔的讲话 “不会使我们之任何他改变对量子力学看的法”③。而据

① “Discussione sulla comunicazione Bohr”, 120 注注① (Zanichelli, 1928, pp. 589—598).

② 1963 年 7 月 1 日对 L. Rosenfeld 的访问记 (Archive for the History of Quantum Physics).

③ 1963 年 11 月 21 日对 E. P. 维格纳的访问 (Archive for the History of Quantum Physics).

【解读】

这段文字非常重要, 因为它揭示了两位物理学巨匠——海森伯和玻尔——在思维方式上的巨大差异。

大家在高中课本里学到的 “不确定性原理” (测不准关系), 通常是讲海森伯的思路: 我要用显微镜看电子, 必须得用光子去撞它, 光子一撞, 电子就飞了, 所以我越想看清位置, 动量就被扰动得越厉害。这是一种**操作性的解释**, 强调的是测量的干扰。

但这里, 作者特意强调: **玻尔的方法根本不同**。玻尔完全没有用 “显微镜干扰” 这种物理图像, 他用的是**纯粹的波动逻辑**。

玻尔的逻辑是这样的:

1. **傅里叶分解**: 任何一个复杂的波, 都可以看作是无数个简单正弦波 (分量) 叠加而成的。
2. **相长干涉**: 粒子之所以在某个时刻 “出现” 在某一点, 是因为在那一瞬间, 所有的波分量 正好 “步调一致”, 叠加出了一个高峰。
3. **时间推移**: 随着时间流逝, 频率略有不同的波分量步调会乱掉, 波峰就消失了。
4. **结论**: 要让波峰维持一段很短的时间 (Δt 很小), 这些波分量之间的频率差异 (对应能量 差异 ΔE) 必须很大。反之, 如果能量差异很小 (单色性好), 波峰就会持续很长时间, 你

就不知道粒子到底哪一刻经过的。

所以，玻尔导出 $\Delta t \cdot \Delta E \approx \hbar$ ，靠的不是“我测量时手抖了”或者“光子撞击了”，而是波动的内在数学属性。这比海森伯的解释更深刻，因为它说明不确定性是物质的本性，而不是测量技术的限制。

然而，有趣的是历史的反应。1927年科摩会议（Como Lecture）上，当玻尔抛出这套惊世骇俗的哲学时，台下的反应竟然是——**没反应**。

想象一下，玻恩、海森伯、费米、泡利，这些当时世界上最聪明的大脑坐在下面，结果大家都觉得“这没啥啊”。罗森菲尔德甚至说“没感觉”。这说明了一个道理：**伟大的思想往往是超前的**。当时大家还在忙着算公式（矩阵力学、波动力学），还没准备好接受这种对世界观的根本性重塑。玻尔讲的不是怎么算题，而是我们该如何理解“实在”。

【原文】

冯·诺伊曼则说过：“可是，有许多东西都是不对易的，你可以很容易就找出三个互不互易的算符来”①。

冯·诺伊曼的批评当然是由玻尔主张的下述看法所激起的：波动图像和粒子图像的互补性适当反映在相应的变量（或算符）的非对易性中，这就引起了一个问题：为什么“互补性”只限于两种属性，而不是——也许超出了它的纯字面的意义——被推广到三个或多个属性。例如，设有三种属性，在它们之间每一种都补充另外两种的组合，这从逻辑上说当然是可以设想的。冯·威扎克尔②专门研究了这个问题，他宣称，波粒二象性构成了一个完备的析取 [disjunction]，物理实在要么呈点状集中，要么散布在空间中；前者用粒子模型来描述，而后者则用场或波的模型来描述。

还是让我们回到玻尔的科摩演讲上来。说说这篇演讲“轰动了会议，如同西北风有时翻滚着通常是平静的科摩海面一样”③，这肯定 是太夸张了。事实上，还没过一段时间之后，玻尔的观念的真实意义才得到人们的充分理解，并被誉为“在对我们生活在其中的世界的理解上开始了新的章”④，或者是“当代最革命的哲学观念”⑤。

① 同上页注②文献。

② C. F. von Weizsäcker, “Zur Deutung der Quantenmechanik”, Z. Physik 118, 489—509(1941).

③ R. Moore, Niels Bohr (Knopf, New York, 1966), p. 162.

④ 124 页注①文献。

⑤ J. A. Wheeler, “A septet of Sibyls”, American Scientist 44, 360—377 (1956).

【解读】

这里我们要聊聊数学大神冯·诺伊曼（von Neumann）对玻尔的“吐槽”。

在量子力学的数学里，有一个核心概念叫“不对易性”。如果两个物理量（算符）是“不对易”的（即 $A \times B \neq B \times A$ ），那么它们就是互补的，不能同时测准，比如位置和动量。玻尔认为，“互补性”主要就是指波和粒子这两种图像的对立统一。

冯·诺伊曼作为一个数学家，他的思维很严谨：既然你说互补性对应数学上的“不对易”，那数学上我可以随便找三个、四个甚至更多个互相不对易的算符啊，为什么你玻尔老是盯着“波”和“粒”这一对（两个）不放呢？难道不能有“三象性”吗？

这时候，冯·威扎克尔站出来帮玻尔辩护了。他的解释非常有哲学味道：**世界本质上是一个二元选择（析取）。**

你要么把物体看作是一个“点”，集中在一点（粒子模型）；

你要么把物体看作是一个“场”，散布在空间（波动模型）。

除此之外，我们在直观上很难想象出第三种基本的“存在方式”。这就好比硬币只有正反两面，虽然数学上可以有更多维度的形状，但在描述物理实在的基本形态时，“点”与“面（场）”构成了逻辑上的完备集合。所以，互补性不仅仅是数学算符的游戏，更是关于我们如何感知空间存在的哲学命题。

最后，作者澄清了一个历史误区。有些传记作家喜欢戏剧化，说玻尔的演讲像“西北风翻滚海面”一样轰动。其实并不是。就像我们上一段分析的，当时大家都很懵。真理往往需要时间沉淀。直到后来，物理学界才回过味来，意识到玻尔在科摩讲的那些话，不仅仅是解释了公式，而是**“在对世界的理解上开始了新的篇章”**。它是人类思想史上最革命性的观念之一，因为它告诉我们要放弃对“绝对客观真理”的某种执念，学会接受不同视角下截然不同但又缺一不可的真理。

【原文】

4.2 批判的说明

上面我们几乎是逐字逐句地介绍了玻尔对其互补性诠释的最早的说法，也介绍了其部分历史背景。我们再从一种更批判性的观点来回顾一下局势。

首先应当记住，玻尔从未对“互补性”这个术语给出过一个清楚明晰的定义。在他的全部言论中，他在1929年说过的一段话可能最接近这个定义，他说，量子假设“迫使我们采用一种新的描述方式，叫做互补的描述方式；互补一词的意义是：一些古典概念的确定应用，将排除另一些古典概念的同时应用，而另一些古典概念在另一种条件下却是阐明现象所同样必需的”①。根据这一段话，不同的描述方式或不同的描述是互补的。

【解读】

在这一部分，作者转换了视角，从“介绍者”变成了“评论员”，开始对玻尔的互补性原理进行批判性的审视。

有一个非常令人惊讶的事实：**玻尔本人从未给“互补性”下过一个教科书式的死定义。**

如果你去读高中物理书，定义通常都是黑白分明的。但玻尔的思想充满了辩证的迷雾。他在不同的场合、不同的文章里，用词都很灵活。

作者帮我们从浩如烟海的文献中，挖出了玻尔在1929年说过的一段话，这段话被认为是最接近“官方定义”的解释。我们要仔细拆解这段话，因为它是理解量子力学哲学的金钥匙：

1. “一些古典概念的确定应用，将排除另一些古典概念的同时应用”：

这是指**排他性**。比如，你要用“位置”这个经典概念（粒子性），你就必须放弃“波长”这个概念（波动性）。当你盯着它在哪儿时，你就失去了它往哪儿波动的信息。这就好比你在看一张全息图，从左边看是兔子，从右边看是鸭子，你不能同时既看到完美的兔子又看到完美的鸭子。

2. “而另一些古典概念在另一种条件下却是阐明现象所同样必需的”：

这是指**必要性**。虽然兔子和鸭子不能同时看到，但要完整描述这张图，你必须承认它既包含兔子也包含鸭子。仅仅说它是粒子是不完整的，仅仅说它是波也是错的。

总结来说，所谓“互补”，就是“互相排斥，但又互相补充”。

对于高三的你们来说，这可能有点像盲人摸象的升级版。盲人摸象是因为看不全，而互补性原理告诉我们，宇宙本身就不允许你“全看清”。你必须在不同的实验条件下，选择不同的视角（描述方式）。这些视角单独看是矛盾的，但合起来才构成了完整的物理实在。这就是玻尔留给我们的思想遗产。各位高三同学大家好，我是你们的学术导师。今天我们要挑战的这份文档，是关于量子力学哲学基础的深度探讨，核心人物是著名的物理学家尼尔斯·玻尔（Niels Bohr）。

在高中物理课本里，你们可能已经接触过“波粒二象性”和海森伯的“测不准原理”（不确定性原理）。但你们是否想过，为什么这两个概念会彻底颠覆人类对世界的认知？玻尔提出的“互补性原理”（Complementarity Principle）正是为了解决这个哲学危机。接下来的内容，就是关于玻尔如何从“理想实验”出发，构建这一宏大理论的过程。

让我们开始第一部分的阅读与解析。

【原文】

这同他在科摩演讲中对这个术语的用法是完全一致的，他在那里对“互补的”这个形容词用了15次，都是用于像“描述的互补的性质(本性、特性)”这样的组合中；对“互补性”这个名词用了三次，一次是他在指出“量子假设给我们提出了要发展一种互补性理论的任务”的时候，一次是当他讲到“定义的各种可能性之间的互补性”时，第三次应该受到特别注意，是在他这次演的结束语中：“然而我希望，互补性这一概念是适于表征这种形势的；这种形势和人类概念形成中在区分主体和客体的问题上固有的普遍困难

① “Introductory survey,” 见 120 页注①文献，中文本“绪论”。(商务印书馆, 1999), 第 12 页。

深为相似。”几乎在一切场合下,描述的互补性都被明白说成是“时空标示(描述)”和“因果要求”,后者一般理解为或被明白表述为是指能量和动量守恒定理。

我们暂且不考虑上面所引的科摩讲演的最后一句话,而考虑玻尔在不同场合的一些别的说法,例如:“的確,每一种可以在一个有限时空域中记录一个原子级粒子的实验装置,都需要用到固定的杆尺和同步好的时钟;根据定义,这些杆尺和时钟就排除了控制传输它们的动量和能量的可能。反之,力学守恒定律在量子物理学中的任何无歧义的应用,都要求对现象的描述在原则上放弃细致的时空标示。”① 对此可以讨论如下。

【解读】

这一段通过分析玻尔的语言习惯,引出了量子力学中最核心的一对矛盾: **时空描述与因果描述**。

大家在高三复习经典力学时,习惯了这样的思维:只要我们知道一个物体现在的确切位置和速度(时空标示),再结合牛顿定律和能量守恒(因果要求/守恒定律),我们就能完美预测它未来的运动轨迹。在经典世界里,“在哪里”和“有多少能量”是可以同时被精确知道的,它们像一对好兄弟,携手帮我们描述世界。

但是,玻尔敏锐地指出,在量子(微观)世界里,这两者变成了“冤家”。

文中提到的“科摩演讲”(Como Lecture)是物理学史上的大事件,玻尔在那里正式提出了互补性。这里的“互补”,并不是说两样东西简单的互补(比如左手和右手),而是指**两样东西虽然都必不可少,但却不能同时出现**。

这就好比你看一张全息图,从正面看是圆形,从侧面看是方形。你为了描述这个物体,必须既说它是圆的,又说它是方的(互补),但你绝不可能同时站在正面和侧面去观察它(排斥)。

玻尔在这里强调了一个极具颠覆性的观点:

1. **时空标示 (Space-time coordination)**: 如果你想知道粒子确切的“位置”和发生的时间,你需要尺子和钟。为了测量准确,这些尺子必须固定得死死的。
2. **因果要求/守恒定律 (Causality/Conservation laws)**: 这通常指的是能量和动量的交换。如果你想知道粒子传递了多少动量,你需要让测量仪器能够发生反冲(移动),从而测量这个动量变化。

矛盾来了:如果你把仪器固定死(为了测位置),它就不能移动,你就测不到动量交换(放弃了因果描述);如果你让仪器活动(为了测动量),仪器的位置就在晃动,你就失去了精确的时空坐标。

所以,玻尔说“原则上放弃细致的时空标示”,意思就是:你想看清能量守恒的“因果”链条,就得在这个瞬间哪怕是在原则,也要在这个瞬间对“它究竟在哪”这个问题睁一只眼闭一只眼。这就是互补性的本质:鱼和熊掌不可兼得。

【原文】

在物理学史上,每当提出一个新的基本原理,总是把它建立在一个标准的理想实验的基础上。对于古典力学中的力量守恒原理,这个实验是两个理想弹性球在真空中的碰撞;对于广义相对论中的等效原理,就是爱因斯坦的电梯中的实验室这个著名的 Gedankenexperiment [思想实验]。对于玻尔的互补性原理,则是一个微观客体(光子、电子)通过一个光阑上的狭缝的实验装置。如果在这个装置中光阑同尺和钟构成运动的当地坐标系是刚性地联结起来的,那么微观客体的位置就是可以确定的(原则上直到任何小的 狹缝宽度),但是由于光阑同坐标系统的刚性联结,却丢失了关于微

① N. Bohr, “Atoms and human knowledge,” 1955 年 10 月在哥本哈根丹麦皇家科学院所作的讲演,重印于 Daedalus 87, 164—175 (1958), 及 122 页注① 文献 (Wiley, 1958, pp.83—93)。中译文:“原子和人类知识”,见 122 页注①文献(商务印书馆, 1999), 第 12 页。

184 量子力学的哲学

客观客体和光阑之间^①的准确的能量或动量交换的任何信息。另一方面,如果光阑连同它上面的狭缝是用一根弱弹簧悬挂起来的,那么 动量转移 (表现为已知质量的光阑的运动) 便是可以确定的,但是有关穿过狭缝的微观粒子的准确位置的任何信息,却由于光阑的位置不确定而告吹了。

【解读】

这段文字非常精彩, 它引入了物理学中最强大的武器——思想实验 (Gedankenexperiment)。

如果你在写作文时需要论证一个观点, 你会举例。物理学家也是如此, 但他们的例子往往是脑海中构建的完美实验。文中列举了三个著名的思想实验:

1. 经典力学: 弹性球碰撞 (不仅解释动量守恒, 也是台球桌上的物理学)。
2. 广义相对论: 爱因斯坦的电梯 (人在自由落体的电梯里感觉不到重力, 从而论证引力和加速度是等效的)。
3. 量子力学 (玻尔): 这就是我们要重点解读的单缝衍射实验。

想象一下, 一个电子要穿过一张纸上的一条狭缝 (光阑)。

原文中的“位量”大概率是翻译或印刷时的笔误, 结合上下文应理解为“位置”。玻尔让我们考虑两种极端的情况来安装这张带狭缝的纸:

情况A: 刚性联结 (钉死它!)

我们将带狭缝的板子焊死在实验室的地面上 (刚性联结)。

- **好处:** 我们极其精确地知道狭缝在哪里。当电子穿过时, 我们确切知道电子在那个瞬间的位置。
- **代价:** 当电子穿过狭缝发生衍射时, 它会稍微改变方向, 这意味着它给了板子一个反冲的动量。但因为板子连着整个地球 (刚性联结), 质量无穷大, 我们根本无法测量这个微小的动量交换。

- **结论：**确定了位置（时空标示），但丢失了动量交换的信息（因果链条断了）。

情况B：弱弹簧悬挂（让它晃！）

我们将带狭缝的板子用一根非常轻的弹簧挂起来，让它可以自由晃动。

- **好处：**当电子穿过狭缝并给板子一个反冲力时，板子会动！通过测量板子的移动速度，利用动量守恒，我们可以精确计算出电子交换了多少动量。
- **代价：**因为板子在弹簧上晃来晃去，当电子穿过的那一瞬间，狭缝到底在哪里？我们无法精确知道。
- **结论：**确定了动量（因果/守恒），但位置信息“告吹”了（时空标示模糊了）。

这个例子生动地向我们展示了：你选择什么样的测量仪器（刚性的还是有弹性的），决定了你能看到什么样的物理现实。你不能既把板子焊死又让它挂在弹簧上，所以你不能同时得到精确的位置和动量。

【原文】

玻尔推广^①了这个结果，他主张，用时空坐标进行的描述和用能量-动量转移进行的描述，或简单点说，时空描述和因果描述，二者是不能同时在操作上有意义的，因为它们需要相互排斥的实验装置。在玻尔的理想实验中，实验装置的互斥性的保证是：光阑和坐标架之间存在还是不存在联结在逻辑上是彼此矛盾的①。这样两种实验装置可以叫做“互补的”，因为它们虽然互斥，但是为了完备地描述物理情态，却又都是必需的——或者说是互相补充的。

97 然后，可以把“互补的”这个术语转用到和互补的实验装置相关联的描述方式上，因此时空描述和因果描述是互补的。最后，还可以把“互补的”这个术语移用到用来表述互补的描述方式的参量或变量本身，因此称位置坐标和动量变量是互补的。为了避免混乱，绝不应当忘记，“互补”这个术语的最后一种用法，只有在这

① 玻尔的这一段话回答了 Béla Fogarasi 提出的一个问题，为什么同时使用互补的属性会导致矛盾而这些属性的非同时使用则只导致互补性？见 B. Fogarasi, “Ist der Komplementaritätsgedanke widerspruchsfrei?” Proceedings of the Second International Congress of the International Union for the Philosophy of Science (Zurich, 1954) (Editions du Griffon, Neuchâtel, 1955), pp. 46–52. 又见 B. Fogarasi, Kritik des Physikalischen Idealismus (Aufbau-Verlag, Berlin, 1953).

第四章 互补性诠释的早期说法 185

称呼的变量是玻尔和互补的实验装置相对应的描述方式中时，才是正当的。

【解读】

这段话是玻尔哲学思想的逻辑升华，它把一个物理实验提升到了逻辑和哲学的高度。

首先，玻尔强调了**“互斥性”（Mutually Exclusive）的根源在于实验装置的逻辑矛盾**。就像我刚才举的例子，一块板子，不可能在同一时刻既是“完全固定”的又是“完全自由移动”的。这在逻辑上就是矛盾的。既然装置是矛盾的，那么由装置所测量出来的物理量（位置和动量）自然就不能同时被定义。

这里有一个非常清晰的逻辑递进链条，请大家务必理清：

1. **装置的互补性**：最底层是硬件。刚性固定的仪器 vs 弹簧悬挂的仪器。这是物理上的排斥。
2. **描述的互补性**：中间层是概念。如果你用了刚性仪器，你只能进行“时空描述”（电子在哪）；如果你用了弹簧仪器，你只能进行“因果/动量描述”（电子有多大力）。这两种描述方式互补。
3. **变量的互补性**：最顶层是数学变量。最后我们才说，位置坐标 (x) 和动量 (p) 是一对互补变量。

导师在这里要特别提醒大家注意文末的那句警告：“**绝不应当忘记**”。

很多学生（甚至大学生）在学习量子力学时，会机械地背诵“位置和动量不确定”。但玻尔警告我们：单纯说“变量 x 和 p 互补”是很危险的，除非你脑子里非常清楚，这种互补性是来源于**背后的实验装置**的。

脱离了实验装置去谈论微观粒子的属性（比如“电子在这个时刻既有位置又有动量，只是我们测不准”），在玻尔看来是错误的。正确的说法是：电子展现出什么属性，完全取决于你用什么装置去“质问”它。并没有一个独立于观测之外的“真实电子状态”。这也是量子力学最让人烧脑的地方——观测者和被观测者是不可分割的整体。

【原文】

在玻尔的主要观念作了这样的澄清之后，我们再回到海森伯关系上来。如同大多数量子力学教科书所表明的，从作为我们澄清互补性概念的出^①发点的那些实验装置的数学讨论导出海森伯测不准公式，是很容易的。实际上，在许多教科书中，是用海森伯的著名的 γ 射线显微镜思想实验来作为海森伯公式的例证的，并常常用作证明。不过从概念上说，可以把海森伯的实验看作只是玻尔的一种变型或改进，虽然从历史上说，海森伯是在他同在哥丁根的朋友玻歇（P. 杜鲁德“之子”）的一次更早的讨论中独立于玻尔想出的实验。

如果玻尔和海森伯都是从同一情况出发的，那么，他们又在哪些方面不同呢？显然，争论并不在于实验事实或数学表述。意见分歧在于所说的情况在何等程度上要求诠释。任何诠释都应当使用经典物理学的术语，在这一点上海森伯和玻尔是一致的。但是海森伯满足于这一事实，无论是粒子语言还是波动语言——而且二者是相互独立的——都可用来作最佳描述，虽然有一定的限制，其数学表述即测不准关系；而玻尔则坚持必须将两者都用。对于玻尔来说，测不准关系表明，必须修改的并不是经典概念，而是关于解释的经典观念。玻尔①在 1929 年写道：“于是，在我看来，相信

- P. 杜鲁德 (Paul Drude 1863–1906)，德国物理学家，主要工作在物理光学方面。
- ——译者

- ① 见 120 页注①文献。

186 量子力学的哲学

最终用一些新的概念形式来代替经典物理学的概念就可以避开原 子理论的困难，那或许是一种误解”。同一年他曾说，“一般说来， 98 我们必须准备接受下述事实：同一客体的完备阐述，可能需要用到一些分歧的观点，它们否定了一种唯一的描述” ①。

玻尔在引用光的波粒二象性以拒绝海森伯的做法时，心中考 虑的——是经典解释的物理的破坏。一方面，海森伯能够 从量子力学形式体系把他的测不准公式作为一个演绎结果推导出来；另一方面，通过分析一个假想的实验装置并同时考虑二象性， 也可以给出这些公式的一个独立的证明。我们讲述，这一事实在 玻尔看来，正是他对微观物理学的互补性诠释和量子力学的数学 表述相容的一个证明。

【解读】

这一段是全文的高潮，它对比了量子力学的两位奠基人——玻尔和海森伯的思想异同。

你们在课本上学过海森伯的测不准关系（即不确定性原理）： $\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$ 。这看起来是一个冷冰冰的数学不等式。文中提到，这通常是用“ γ 射线显微镜”这个思想实验来解释的（为了看清电子位置，必须用波长很短的光撞击它，结果把电子撞飞了，动量就不准了）。

虽然玻尔和海森伯在数学公式和实验事实上一拍即合，但他们在** “这件事意味着什么”（诠释） **上有着深刻的分歧：

1. 海森伯的态度（实用主义/数学派）：他觉得既然我们不能同时用粒子（位置）和波（动量）的概念，那我就承认经典概念有局限性。粒子语言和波动语言是独立的，每种语言都有它的适用界限，界限就是那个数学公式。既然测不准，那就这样吧。
2. 玻尔的态度（深邃的哲学派）：玻尔想得更深。他坚持认为， **我们人类是宏观生物，我们要交流物理实验，就必须使用经典物理学的术语（如位置、速度、动量）**。我们无法发明一套全新的语言来替代它们。
 - 玻尔的名言大意是：别以为发明新词就能解决问题。
 - 困难在于，我们需要用旧的、经典的词汇（位置和动量），去描述一个全新的量子世界。
 - 因此，我们必须接受一种** “精神分裂” 般的状态**：为了完备地描述同一个电子，我们不得不轮流使用两套互相矛盾的观点（它是波，它又是粒子）。

最后一段提到的要点是：海森伯可以纯粹从数学公式推导出测不准关系，而玻尔通过分析实验装置（比如那个带弹簧的板子）也能推导出同样的关系。在玻尔看来，这证明了他的“互补性原理”不仅仅是哲学空谈，它和量子力学严密的数学结构是完美兼容的。

总结起来，这一章告诉我们：世界也许并不是单一逻辑的。为了看清全貌，我们有时必须接受矛盾的存在，并在矛盾的对立面之间寻找一种动态的平衡——这就是“互补性”留给我们的最高智慧。【原文】

在玻尔看来，量子力学的非决定论是玻粒二元论的一个结果，因此最终是使用了互补的描述方式的不同图像的结果，或是缺乏对运动和变化的统一的说明的结果。正如他在科摩演讲中所说的，“一个粒子的位置坐标的测量，不但会带来各动力学变量的有限改变，而且，粒子位置的确定就意味着对粒子动力学行为的因果描述的彻底破坏，而粒子动量的测定则永远意味着关于粒子的空间传播的知识的一个缺乏。正是这种形势十分突出地表明了原子现象之描述的互补性①质……”②。换句话说，在玻尔看来，量子力学中的非决定论的根源在于描述的不可避免的“破坏”；因为海森伯后来称之为“波包收缩”的东西，在玻尔看来，正像是一种描

① 120页注①文献(1934, p. 96; 商务印书馆, 1999, 第77页)。

② 同上(1934, p. 68; 商务印书馆, 1999, 第56页)。

第四章 互补性诠释的早期说法 187

述方式向与其它互补的描述方式的转换。

互补性诠释的早期说法的表述中有许多含糊之处。实际上，也许正是由于这种表达的不明确性以及与之俱来的概念上的灵活性，使得互补性诠释得以渡过一些严重的危机。大部分这类前后矛盾是关于其认识论和本体论的结论的。在玻尔对他思想的陈述中，最严重的矛盾也许就是关于刚才所说的“波包收缩”（或玻尔所谓的描述的“断裂”）的互补性解释的。因为除了在互补性的基础上说明这一特性之外，玻尔又一再指出“每一次观察都将引入一个新的不可控制的因素”①，“由测量引起的干扰，其大小永远是不知道的”②。以及“我们不能忽略客体和观察仪器之间的相互作用”③等等来为它辩解。玻尔宣称，正是这种“对现象进程的干扰具有这样一种本性：它使我们丧失掉因果描述方式所依据的基础”④。我们看到，在这里，不再把量子力学的非决定论看成从一种图像到它的互补方式的转换的结果了，而是看成一种操作的物理特性的产物。我们后面将看到，正是这种对“波包收缩”的操作解释的坚持，是玻尔诠释的最容易受到攻击之处。

第二个最后变成对玻尔（或更恰当地说是反对海森伯关系的原来的解释）的一个论据的概念困难，是一个微观客体的位置和动量变量的精确的联合值的表现上的可溯源性[retrodutability]。

① 120页注①文献(1934, p. 68; 商务印书馆, 1999, 第56页)。

② 120页注①文献(1934, p. 11; 商务印书馆, 1999, 第13页)。

③ 120页注①文献(1934, p. 93; 商务印书馆, 1999, 第75页)。

④ 120页注①文献(1934, p. 115; 商务印书馆, 1999, 第92页)。

188 量子力学的哲学

玻尔在科摩演讲中承认有这种可能性，但是否认它有任何预言意义。他说：“的确，一个个体在两个已知时刻的位置，可以测量到所要求的精确度；但是，如果我们想要根据这种测量用通常的方法算出该个体的速度，那就必须清楚地认识到，我们是在处理一种抽象，从它得不出任何无歧义的信息。”玻尔在他的思想实验中想象，在时刻t1的一次精确的位置测量表明一个

质量为 m 的自由微观客体位于点 x_1 ，在时刻 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 的一次类似的测量表明它位于点 $x_2 = x_1 + \Delta x$ 。于是他声称， $i=t_1$ 时刻的位置 x_1 和动量 $m \cdot \Delta x / \Delta t$ 均已准确确定。

海森伯在他的芝加哥讲演①中讨论了一个类似的思想实验。他把玻尔的实验安排中的头一次位置测量换成速度测量，并得出结论说，两次测量之间的任何时刻的位置和动量，可以用任意的精确度计算出来。但是他加了一句：“对这种关于电子过去的历史的计算是否能够赋予任何物理实在性，那就是一个人信念问题了。”人们一般没有注意到，甚至海森伯本人显然也没有注意到， γ 射线显微镜的思想实验就已表明了无限精确的回溯计算的可能性。我们回到第三章中对实验的说明上来，因为如果假定 p_z 已经准确知道，则 Δq 就可取得任意小（当然我们忽略高能现象），因此位置测不准量 Δx 就会小到随心所欲。由碰撞引起的巨大的 Δp_x 。这时并不成为一个问题，因为它是在碰撞时引起的，碰撞的路径就能以任何的精度回溯出来了。

① 88 页注①文献。

【解读】

各位高三的同学们，欢迎来到量子力学的哲学课堂。这部分内容可能有点“烧脑”，因为它探讨的不是公式怎么算，而是这些公式背后的世界观究竟是什么。我们刚才读到的这段话，实际上揭示了物理学大师玻尔（Niels Bohr）在构建量子力学大厦时，内心深处的纠结和矛盾。

首先，我们要理解一个核心概念——“**非决定论**”。在经典物理（比如牛顿力学）中，只要知道一个球现在的位置和速度，我就能算出它未来每一秒在哪，这是“决定论”。但在量子力学里，海森伯告诉我们“测不准原理”：你越想看清粒子在哪（位置），你就越搞不清它要去哪（动量）。

这段文本分析了玻尔对这种“测不准”的两种解释，这两种解释其实是打架的：

1. **第一种解释是“互补性”**：这是一种高大上的哲学视角。玻尔认为，微观粒子（比如电子）既是粒子又是波（波粒二元论）。这就像一个圆柱体，你从侧面看是长方形（粒子性），从上面看是圆形（波动性）。你不能同时看到两个面。当你选择测量位置时，你就是选择了“粒子”这个视角，那么“波”的视角（动量/传播方向）自然就消失了。所以，所谓的“波包收缩”只是我们**描述方式的切换**。这听起来很优雅，问题在于我们观察的角度，而不在乎粒子本身坏了。
2. **第二种解释是“干扰论”**：这是一种比较“笨”但直观的物理视角。文本中提到“不可控制的因素”和“测量引起的干扰”。想象你在黑暗屋子里找一只气球，你伸手去摸，当你摸到气球确认位置的那一瞬间，你的手肯定碰到了它，把气球弹飞了（改变了它的动量）。这种解释认为，是我们粗笨的测量仪器**物理上干扰**了精细的微观粒子。

这里的矛盾点在于：如果是因为“干扰”，那意味着粒子其实本来有确定的位置和动量，只是被我们碰乱了；但如果是“互补性”，则意味着粒子本来就没有同时确定的位置和动量。文本作者指出，玻尔在这两种解释之间摇摆不定，甚至利用这种模糊性来回避批评。这成为了玻尔理论的一个软肋。

接下来，文本讨论了一个更有趣的问题：“**可溯源性**”（Retructability）。也就是，我们能不能当“事后诸葛亮”？

测不准原理说我们无法预测未来。但是，如果我们测了两次位置 (t_1 和 t_2)，我们能不能算出它过去的速度？

海森伯和玻尔都承认：数学上是可以算出来的。比如你发现案发现场有子弹，墙上有弹孔，你可以反推出子弹的轨迹。

但是！这种“事后诸葛亮”有物理意义吗？

海森伯说这取决于你的“信念”。为什么？因为物理学的核心任务是预测。如果你算出的“过去”对于预测“未来”毫无帮助（因为测量已经破坏了粒子的状态，它接下来的路又变了），那么这个“精确的过去”到底算不算一种“物理实在”？这就像你复盘了一场已经结束的牌局，算出对手当时手里有什么牌，这对你打下一局牌没有任何帮助，因为牌已经重新洗了。这部分内容极具挑战性，它在问我们：科学到底是描述客观存在的历史，还是仅仅为了预测未来的工具？

【原文】

第四章 互补性诠释的早期说法 189

另一个矛盾涉及玻尔从测量在量子力学中的作用引出的结论，这个结论常常被引用来证明玻尔的互补性诠释是以主体间的唯心主义为基础的。在讲到后一次测量将在一定程度上通过前一次测量获得的信息失去预示意义这一事实时，玻尔得出结论说，这些事实“不但会对可由测量获得的信息的范围有所限制，而且也对我们能赋予这些信息的意义有所限制。在这里，我们又在新形式下遇到了一条真理：在我们对自然的描述中，目的并不在于揭露现象的真实本质，而在于尽可能地在我们的经验的种种方面寻出一些关系。”②如果玻尔在这段话中否定了对微观现象作一种实在论的解释的可能性，那么他又主张，“我们已经一步一步地被迫放弃对单个原子在空间和时间中的行为的因果描述，并被迫考虑大自然在各种可能性之间的自由抉择，对于这些可能性是只能应用几率处理的。”③

玻尔很早就认识到，他的互补性诠释是以必然使用经典术语为前提的。在他的一些早期著作的丹麦文版的绪论中写道：“只有借助于经典概念才能赋予观察结果以无歧义的含义”，1929年他又说，“一切经验最终必须通过经典概念表达出来，这是物理观察的本性。”④对于玻尔来说，在讨论观察事实时使用经典物理学语言的必然性是由于我们不可能放弃我们通常的种种知觉形式；

① 主体间的唯心主义[intersubjective idealism]是唯心主义的一种形式，它不依赖于特定的主体或个人，而是以对不同主体共同的东西为基础。——译者

② 120 页注①文献(1934, p. 18; 商务印书馆, 1999, 第 18 页)。

③ 120 页注①文献(1934, p. 4; 商务印书馆, 1999, 第 7 页)。

④ 120 页注①文献(1934, p. 94; 商务印书馆, 1999, 第 76 页)。

它也使得不可能从自此就把经典物理学的各种基本概念抛弃掉，不再用它们来描述物理经验①。

当时玻尔未曾讨论他坚持使用经典物理学所引起的逻辑问题，即使用经典物理学作为描述（或测量）量子现象的必要的先决条件同承认量子力学取代了经典物理学这两件事在逻辑上是否相容。或者换成冯·威扎克的活：“经典物理学被量子论取代了；量子论被实验证实了；而实验则必须通过经典物理学来描述。”②这个逻辑一贯性问题是玻尔的互补性诠释的主要概念困难之一，我们将在说明量子力学测量理论时来讨论这个问题。

现在回顾一下前面对玻尔早期的互补性观念的介绍是有益的。

玻尔的推理过程可以提纲挈领地概括为如下的一连串逻辑演绎环节③：

【解读】

这一大段内容探讨了玻尔哲学的核心，也是最让物理学家感到困惑的地方：**我们要如何描述这个世界？**这里涉及两个极其深刻的矛盾。

第一，是唯心主义与实在论的矛盾。

大家在政治课上学过，唯物主义认为世界是客观存在的，不以人的意志为转移。但玻尔在这里似乎走向了“唯心主义”。

注意文本中的这句话：“**目的并不在于揭露现象的真实本质，而在于尽可能地在我们的经验的种种方面寻出一些关系。**”

这简直是科学观的大地震！传统的牛顿物理学认为，科学就是要找出宇宙的终极真理（真实本质）。但玻尔说：不，量子世界太诡异了，我们根本无法知道它“本来”是什么样，我们只能知道我们观测到了什么，以及观测结果之间有什么关系。

比如说，我们不用管“电子到底是个啥”，我们只需要总结“我按下按钮A，指针指向B”这种经验关系。

同时，玻尔提到了“**大自然在各种可能性之间的自由抉择**”。这意味着，当我们把骰子扔出去之前，结果是不确定的，是大自然像掷骰子一样随机选了一个结果给我们看。这种观点极大地挑战了传统的因果律，让当时很多相信“客观实在”的科学家（包括爱因斯坦）非常不爽。

第二，是经典语言与量子世界的逻辑悖论（这部分非常精彩）。

这也是这段文本的重头戏。玻尔坚持认为：**虽然微观世界是量子的，但我们描述实验必须用经典的语言。**

为什么？因为我们人类生活在宏观世界，我们的脑子、我们的语言、我们的实验仪器（尺子、时钟、指针）都是宏观的、经典的。如果不用“位置”、“速度”、“时间”这些经典词汇，我们根本没法交流实验结果。

正如文本所引用的：“**一切经验最终必须通过经典概念表达出来。**”

这就带来了一个巨大的逻辑怪圈（逻辑悖论），冯·威扎克把它总结得非常精辟：

1. **量子力学取代了经典物理学**（因为经典物理在微观不适用了）。
2. **量子力学被实验证实了**（实验结果支持量子理论）。
3. **但是，实验本身必须用经典物理学来描述**（因为仪器是宏观的）。

大家发现问题了吗？量子力学否定了经典物理，但它又必须依赖经典物理才能把自己的证据说清楚。就像是一个孩子（量子力学）长大了，想要推翻父亲（经典物理）的权威，但这个孩子说话用的词汇、语法，甚至证明自己长大的证据，全都是父亲教给他的。如果父亲是错的，那孩子用来证明自己的语言岂不是也是错的？

这就是玻尔“互补性诠释”中最大的逻辑困难。我们仿佛被困在了一个笼子里：我们想描述笼子外面的奇妙世界（量子世界），但我们只能用笼子里面的语言（经典概念）来描述，所以永远会有“词不达意”或者逻辑断裂的地方。这就是为什么量子力学这么难懂，因为我们在用描述“台球”的语言，去描述“幽灵”。【原文】

1. 作用量子的可分性（量子假设）
2. 基元过程的不连续性（或个体性）。
3. 客体同仪器之间的相互作用的不可控制性。
4. 一种（严格的）时空描述同时兼是因果描述的不可能性。
5. 经典的描述方式的放弃。

① 关于这点见C. F. von Weizsäcker, “Niels Bohr and complementarity, The place of the classical language,” 载于 *Quantum Theory and Beyond*, Ted Bastin ed. (Cambridge U. P., Cambridge, 1971), pp. 23—31。

② 同上(p. 26)。

③ 在 1971 年 7 月 26 日对海森伯的一次访问中，他证实这个提纲是玻尔在 1927 年的推理的一个准确的表述。

第四章 互补性诠释的早期说法 141

但是，我们刚已经讲过，按照玻尔的看法，对实验证据的任何说明都必须用经典术语来表达；不论所讨论的现象超越经典物理学解释的范围多么远都是如此。坚持这一点显然同上面的要求5矛盾。避免这种矛盾的唯一办法是能对使用经典术语施加一定的限制：当而且仅当经典术语的使用被限制到这样程度，使它绝不包含一个完备的经典描述方式时，这个矛盾就将避免。

如果在不同实验装置下获得的实验经验只有通过互相排斥的一组组经典概念才能完备地描述，那么上述条件显然将被满足。而且，若是我们硬是要企图应用这种互斥的经典概念组，那么由海森伯关系所示的不确定性便是我们必须付出的代价。最重要的两组经典概念便是时空描述和因果描述（后者包括能量和动量守恒定理）；它们在经典物理学中是相容的，但在量子物理学中则是互斥的，虽然对于一个详尽的说明它们二者都是必要的。

【解读】

各位同学好！咱们今天面对的这段材料，探讨的是量子力学中最核心、也是最烧脑的哲学基础——波尔的互补性原理。这部分内容其实是在讲一个物理学界的“语言危机”。

首先，大家看开头的五点提纲，这是玻尔当年推理的逻辑链条。特别是前三点，我们在高中物理学过：能量是一份一份的（量子化）、微观过程是不连续的（比如电子跃迁）、还有那个著名

的“测不准”（观测者会干扰被观测者）。这导致了第5点结论：我们必须放弃用纯粹的经典物理方式（就像牛顿力学那样完美确定的方式）来描述微观世界。

但这里有个巨大的矛盾，也就是文中“第四章”开头提出的问题：**虽然微观世界是量子的，但我们人类是生活在宏观世界的，我们的语言、我们的实验仪器（比如指针、屏幕）全是经典的**。也就是说，我们被迫用描述“台球”和“行星”的语言（经典术语）去描述“电子”和“光子”。

波尔认为，这是一个死结，解开它的唯一办法就是**“限制”**。

怎么限制呢？想象一下，你想描述一个人的性格，你既可以说他“极其理性”，又可以说他“极其感性”。在经典逻辑里，这人可能就是个分裂者。但在量子力学里，波尔说：这两套描述是**互斥的**，你不能同时用！

文中提到了最重要的一组互斥概念：“**时空描述**”和“**因果描述**”。

- **时空描述**：指的是粒子在什么时间、在什么位置 (x, y, z, t) 。这就像我们在看监控录像，知道物体确切在哪。
- **因果描述**：在这里特指动量和能量守恒定律 (p, E) 。在物理学中，动量和能量代表了物体运动的趋势和结果，代表了物理过程的因果链条。

在牛顿力学里（经典物理），我们可以同时知道一个车在哪（时空）以及它有多少动量（因果），这叫“相容”。但在量子力学里，海森伯的不确定性原理 $(\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi)$ 告诉我们，这两者是死对头。你想把位置（时空）看得越清，动量（因果）就越模糊。

所以，这段话的核心意思是：为了用我们熟悉的经典语言去描述那个诡异的量子世界，我们必须接受一种妥协——我们可以用两套不同的语言去描述同一个东西，这两套语言互不相容（互斥），但只有把它们合起来，才能构成一个完整的真相。这就是“互补性”。

【原文】

4.3 “平行” 互补性和“环形” 互补性 102

前面对玻尔的互补性诠释的介绍我们简短地称之为(哥本哈根诠释的)泡利说法,由于它的言之成理和直观明晰性,它也许是人们所最广泛持有的观点。这个说法同玻尔在他的科摩演讲和他以后对这个问题的讨论中的绝大多数论述是一致的,但是很难说它也符合上面援引的科摩演讲的最后一段话和下述事实:玻尔在通篇演讲中都没有提到位置和动量是一对互补量,虽然在种场合下他都完全可以这样做。

由于这个原因,特别是由于玻尔宣称互补性观念所表征的局

势“和人类概念形成中在区分主体和客体的问题上固有的普遍困难极端相似”，玻尔所想象的各种互补的描述看来也是和不同的客体—主体关系相关联的，亦即是从不同的着眼点来作的描述。各种互补描述的差异不仅可以表现在据以进行观察的实验装置的多样性上(这同哥本哈根诠释的泡利说法是一致的)；它也可以是客体和主体之间的关系的结构本身发生变化的结果，例如，若感知的客体本身构成被观察的客体的一部分时，便是如此。

比如，预先要求客体与观察者之间有一相互作用的时空描述方式，在其描述中必然要包含观察主体的某些特征，而因果描述方式则谨慎地回避了这样的牵连。正如“至少在某些人身上，总的可能的意识可以分裂成共存而又相互忽略的各个部分，并在各个部分之间分配认识的对象”①一样，在物理学中也有类似的情况，一些在古典理论中共存而且协调的认识，在量子理论中分裂成互斥而又互补的观点。

“同一客体的完备阐述，可能需要用到一些无法加以单值描述的分歧的观点。确实，严格说来，任一概念的自觉分析是和该概念的直接应用处于互斥关系中的。”②

一方面是如位置和动量之间的互补性所示的通常的互补性观念(泡利说法)，另一方面是刚才所说的玻尔对互补性的认识论结

① W. James, *The Principles of Psychology* (Holt, New York, 1890; Dover, New York, 1950), Vol. 1, p. 206. 关于James对玻尔的影响见文献1—1(pp. 176—179). 译者按: W. 詹姆斯士(1842—1910)，美国实用主义哲学家。

② 120页注①文献(1934, p. 96; 商务印书馆, 1999, 第77页)。

【解读】

这段文字带我们进入了更深一层的哲学思考，主要是对比了**泡利 (Pauli) 和波尔 (Bohr) **对互补性的不同理解。

大家可以把泡利看作是“务实派”。泡利的观点（也就是大家普遍接受的观点）很简单直观：互补性就是因为我们要用**不同的实验装置**。比如，你想测波粒二象性，用双缝干涉装置就看到波，用光电效应装置就看到粒子。装置不同，结果不同，这就是互补。这很好理解，对吧？

但是，作者指出，波尔本人的想法（特别是他在科摩演讲中的想法）比这要深奥得多，甚至有点像心理学。波尔认为，互补性不仅仅是换个仪器那么简单，它关乎**“主体（观察者）”和“客体（被观察物）”之间的界限**在哪里。

文中引用了心理学家威廉·詹姆斯的话，提到了“意识的分裂”。这听起来很玄，我们来打个比方：

想象你在做一个心理学实验，你要观察“疼痛”。

1. **作为体验者（主体）**: 你直接感受到疼痛，你会叫出来。
2. **作为分析者（客体化）**: 如果你试图冷静地分析“我现在感觉到的痛大概是几级，是因为神经末梢如何传导的”，当你开始分析时，那种纯粹的“痛感”其实已经变味了，你把自己抽离出来了。

波尔认为量子力学也是这样。

- 当你进行**时空描述**（测量位置）时，必须要有光子撞击电子，要有显微镜，**主体（仪器/人）必须强力介入**，主客体之间发生了剧烈的相互作用，分不清彼此。
- 当你进行**因果描述**（运用动量守恒定律推算）时，你更像是在旁边看着它自然演化，尽量不去打扰它，这时候主客体界限是清晰的，但你又失去了它的位置信息。

所以，波尔的互补性不仅仅是物理量的互补（比如 x 和 p ），更是一种**认识论上的互补**：即“直接参与体验”和“冷静旁观分析”是互斥的。文中那句“任一概念的自觉分析是和该概念的直接应用处于互斥关系中的”，意思就是：你一旦开始分析你在想什么，你就停止了纯粹的思考。同样的，你一旦试图精准定位一个粒子，你就破坏了它原本自然的因果运动状态。这是波尔思想中最迷人也最难懂的地方：物理学竟然和人类意识的结构有惊人的相似性。

【原文】

第四章 互补性诠释的早期说法 143

构的分析，这两方面之间的逻辑关系是冯·威扎克很感兴趣的一个题目。在对玻尔的著作进行一番研究之后，他得出了前面已经提过的如下结论①：位置和动量之间的互补性完全不同于时空描述和因果描述（或薛定谔函数数的描述）之间的互补性。他前者叫“平行互补性”[parallel complementarity]，因为这种互补性存在于这样两个概念（位置、动量）之间，在经典物理学中这两个概念都属于物理过程的同一个直观图像，并且二者都必须具有确定的值，如果要完全确定系统态的话。与此相反，时空描述和薛定谔函数之间的关系则被冯·威扎克叫“环形互补性”(circular complementarity)；这两种东西永远不会在任何经典模型中结合在一起，并且在下述意义上是互为条件的：为了描述能够循以下每种给定情况下建立薛定谔函数的各种观察，需要时空描述；为了对经典的测量结果作最佳的统计预告，需要薛定谔函数。

按照冯·威扎克的结论，玻尔原来的互补性观念是环形互补性；在海森伯发现测不准关系时，玻尔根据环形互补性把它解释成古典的粒子模型不能严格应用于微观物理学的一个表征，因为粒子的力学行为只有依靠互补的薛定谔函数才能预言。至此为止，一直没有涉及位置和动量之间的互补性。它们之间的互补性（“平行互补性”）属于不同的概念范畴。

在冯·威扎克看来，由于玻尔的以下做法，情况就变得更复杂了：玻尔把能量和动量使人易误解地同波动图像联系在一起（显

① 120 页注①文献。

【解读】

这段内容介绍了一位物理学家冯·威扎克（von Weizsäcker）对波尔思想的精彩剖析。他把我们之前讨论的“互补性”细分成了两种完全不同的类型：**平行互补性和环形互补性**。这个分类非常有助于我们理清思路，大家一定要听仔细。

1. 平行互补性 (Parallel Complementarity)：

- **对象**: 位置 (x) vs 动量 (p)。
- **特点**: 这两个概念其实都是**经典力学**里的老熟人。在牛顿的世界里，它们是“平行”存在的，同一个物体既有位置又有动量，必须同时具备这两个值才能确定状态。但在量子力学里，它们打架了（测不准原理）。
- **总结**: 这是“经典概念A”与“经典概念B”之间的互斥。这就是我们要背的 $\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$ 。

2. 环形互补性 (Circular Complementarity):

- **对象**: 时空描述（具体的实验现象）vs 薛定谔函数（ ψ 波函数）。
- **特点**: 这就不是两个经典概念打架了，而是**“现实描述”与“数学工具”**之间的循环依赖。
- **解释**:
 - 我们需要**时空描述**（比如“这里有个狭缝，那里有个屏幕”）来建立实验的边界条件，否则你根本列不出薛定谔方程。
 - 反过来，我们需要**薛定谔函数**（波函数）来预测在这个实验里会发生什么（比如电子落在屏幕哪里的概率最大）。
- **为什么叫环形？** 因为它们互为条件，谁也离不开谁，形成一个闭环。但它们性质完全不同：一个是硬邦邦的仪器和现象，一个是纸面上的概率波数学。它们永远无法在经典模型里融合——你见过哪个经典物体既是铁块又是概率波吗？

冯·威扎克认为，波尔最早提出的其实是这种高深的**环形互补性**：即“宏观实验设置”与“微观概率波描述”之间的互补。

这段解读告诉我们：不要把所有“测不准”都混为一谈。

- 如果你在纠结“位置准了动量就不准”，那是**平行互补性**。
- 如果你在思考“为什么我们要用经典的狭缝装置去验证抽象的波函数”，那是更深层的**环形互补性**。

最后一段提到，波尔后来把事情搞复杂了，因为他开始把动量和能量强行和“波动图像”挂钩（通过德布罗意关系），这让后来的学生很容易把这两类互补性混淆。

【原文】

144

然而是根据普朗克-德布罗意方程),使得人们总是想把粒子与波之间的互补性同位置与动量之间的互补性等同起来。但是,只有在把一个平面波看成是一个粒子的薛定谔场时,粒子的动量才对应于一个确定值;而如果波的形状实际上为一 ∂ 函数,它在上述同一种解释中就代表一个在所谓论时的时刻具有确定量的粒子。因此粒子和波之间的互补性是第三种互补性,它不能在逻辑上归结为

前两种。

【解读】

这是文档的最后一段，也是冯·威扎克为我们梳理的最后一种逻辑关系。他在这里澄清了一个极易产生的误区：很多人（包括很多教科书）喜欢把**“波粒二象性”简单等同于“位置-动量不确定性”**。

作者告诉我们，“粒子 vs 波” 其实是**第三种互补性**，不能直接画等号归结为前两种。

让我们来拆解一下其中的逻辑：

1. 普朗克-德布罗意方程 ($E = h\nu, p = h/\lambda$) 是连接粒子性 (E, p) 和波动性 (ν, λ) 的桥梁。

2. 文中提到两个极端情况：

- **平面波**：这种波在空间中无限延伸，波长 λ 非常确定。根据 $p = h/\lambda$ ，它的动量是非常确定的。这对应了我们常说的“波动性强，动量确定，但位置完全不知道（因为它弥散在全空间）”。
- **δ 函数 (Delta函数)**：大家可以把它想象成一个极窄、极高的尖峰。这代表波被压缩在无穷小的一点上。这时候位置非常确定（就在那个尖峰处），这最像一个经典的“粒子”。

3. 核心结论：

虽然“动量确定”对应“波”，“位置确定”对应“粒子”，但作者强调，**粒子和波之间的互补性在逻辑上是独立的**。

- “平行互补性”讲的是测量值的精度限制 (x 和 p 不能同时准)。
- “环形互补性”讲的是宏观实验描述和微观数学形式的依赖。
- 而“波粒互补性”讲的是**物理图像的排斥**——你看到的图像要么是弥散的场（波），要么是集中的点（粒子）。

所以，作为高三学生，在理解量子力学时要建立分层的概念：

- 不要只会背“波粒二象性”这五个字。
- 要明白，这背后至少有三层含义：一是图像上的矛盾（波还是粒？），二是测量数值上的限制（位置还是动量？），三是描述语言上的困境（经典实验装置还是量子波函数？）。

这段文字虽然简短，却是在提醒我们：物理学的概念必须极其严谨，不能因为它们哪怕只有一点点关联，就粗暴地认为它们是同一回事。你好！我是你的学术导师。很高兴能带你一起研读这份关于量子力学哲学的文献。虽然这些内容看起来有些晦涩，涉及到了物理学史和哲学逻辑，但请放心，我会像剥洋葱一样，一层层为你揭开它神秘的面纱。

这段文本主要讨论的是物理学大师玻尔（Bohr）和他的后辈冯·威尔茨泽克（von Weizsäcker）之间关于“互补性”的争论，以及“互补性”这个概念的严格定义和历史渊源。这不仅是物理，更是关于我们如何认识世界的哲学。

下面我们开始逐段解读。

【原文】

104 玻尔①断然拒绝冯·威尔茨泽克对各种互补性的这种区分,他的理由是:包括薛定谔函数在内的量子力学的数学形式体系只是一种算法规则[algorithm],它对“广泛的经验范围内的量子现象提供了完备的描述”,但是,它本身不是一种物理现象,它不能同直接记录的观察处于互补性的关系之中。互补性只能在现象之间成立。玻尔的回答并不使冯·威尔茨泽克感到满意,我们将在第八章看到,在他看来,量子力学的形式体系远远不只是一套算法规则,而有更多内容。在致泡利的一封信②中,冯·威尔茨泽克把玻尔比作哥伦布,他根据一个正确的理论一直向西航行,但却到达了一个没有预料到的大陆而没有注意到他的错误③。冯·威尔茨泽克相信,玻尔“自

① 125页注②文献。

② 冯·威茨泽克 1956年8月27日致泡利的信。

③ 希腊哲布发现新大陆(美洲)而以为是印度。哥伦布坚信地球是圆的,从欧洲一直往西行驶也可以到达印度和远东。1492年,他奉西班牙国王之命,率三只船横渡大西洋,到达巴哈马群岛和古巴、海地等岛。在以后的三次航行(1493、1498、1502年)中,又发现了牙买加、波多黎各诸岛及中、南美大陆沿岸地带。他误认为所发现的新大陆是印度,“西印度群岛”、“印第安人”的名称即自此而来。一直到他为止,他都抱着这种看法。——译者注

第四章 互补性诠释的早期说法 145

已比任何其他当代思想家更理解自己言论的意义”,因此他很明白做出这样的评论是冒失的。

【解读】

这段文字记录了一场物理学界的“巅峰对决”,主角是量子力学的奠基人玻尔和著名的物理学家、哲学家冯·威尔茨泽克。为了让你理解他们的分歧,我们需要先聊聊“数学公式到底代表什么”。

想象一下,你手里有一张藏宝图(数学公式),它能精确地告诉你宝藏在哪里。玻尔的观点是:这张图只是一张纸、一种工具(文中提到的“算法规则”)。我们用它来预测实验结果,就像用计算器算账一样,它本身不是“真实的世界”。所以,玻尔认为,所谓的“互补性”(比如波粒二象性),只存在于我们观察到的现象之间(比如你看到的有时候是波,有时候是粒子),而不

能扯上数学公式本身。对于玻尔来说，量子力学的数学大厦是一套完美的操作手册，但也仅仅是手册而已。

但是，冯·威尔茨泽克不同意。他认为数学公式背后隐藏着更深层的、客观的物理实在，不仅仅是算数的工具。为了吐槽玻尔的“固执”，他在给朋友泡利（也是大物理学家，人称“物理学的良心”）的信中，用了一个非常精彩的历史典故——哥伦布发现新大陆。

这个比喻极其精妙，请务必细品：哥伦布当年为了去印度，一路向西航行，结果撞上了美洲大陆。但他至死都固执地认为自己到达的是印度（所以美洲原住民被误称为Indios，印第安人）。冯·威尔茨泽克把玻尔比作哥伦布：玻尔发现了一个伟大的新领域（互补性原理），这就像发现了新大陆一样伟大；但玻尔自己却误解了这个发现的本质，他以为这只是关于“观测现象”的理论（就像哥伦布以为到了印度），而实际上，这可能揭示了关于物质世界本体的更深刻真理（真正的新大陆）。

这告诉我们，即使是像玻尔这样伟大的思想家，也可能受限于自己的哲学视角。冯·威尔茨泽克虽然敬重玻尔，承认玻尔比任何人都深刻，但他依然勇敢地指出了导师可能的认知盲区。这种批判性思维，正是科学进步的动力。对于高三的你们来说，在学习定律和公式时，也可以试着思考：这些公式仅仅是解题的工具，还是宇宙某种本质的直接反映？

【原文】

4.4 历史上的先例

虽然我们看到,要为玻尔的互补性概念下一个确定定义是不容易的,但是互补性诠释的概念看来并不难定义。我们可以对这个概念定义如下。一个给定的理论 T 可以有一种互补性诠释,若是它满足以下的条件:(1) T 包含有(至少)两种关于其实体[substance matter]的描述 D_1 和 D_2 ;(2) D_1 和 D_2 是属于同一论域[universe of discourse] U 的(在玻尔的情况下 U 即微观物理学);(3) 单取 D_1 或 D_2 都不能完备地说明 U 中的一切现象;(4) D_1 和 D_2 在这种意义上是互斥的,即如果把它们组合成一种单一的描述就会导致逻辑上的矛盾。

这种阐述清晰地表述了哥本哈根学派所理解的互补性诠释的特征,这一点很容易用这个学派的代表人物自己的话来证明。按照这个学派的主要发言人之一罗森菲尔德①的说法,互补性是对下面这个问题回答:在面临要求我们必须使用两个互斥的而为了完备地描述现象却又是必需的概念的局势下,我们该怎么办?

“互补性表征了这样两类概念之间的一种全新型的逻辑关系,这 105 两类概念是互斥的,因此不能同时考虑,否则将导致逻辑错误,但

① L. Rosenfeld, “Foundations of quantum theory and complementarity”, Nature 190, 384–388(1961).

146 量子力学的哲学

是为了对情况做一完备描述,这两个概念却又要用到。”或者引用玻尔本人关于条件(4)的话:“在量子物理学中,由不同的实验装置所提供的关于原子客体的资料……就是要想组合成一种单一的图像,看来是互相矛盾的。”①玻尔一次在总结玻尔的观点时说道:“我们的整个经验世界没有一个统一的映象。”实际上,玻尔的科赫讲演就是完全符合上述定义的一个例子,他在讲演中强调了因果描述(D_1)和时空描述(D_2)之间的互补排斥而不“可缺”的性质,它是玻尔对现代科学的哲学的最大贡献。人们常常说,发现互补性是玻尔对现代科学的哲学的最大贡献。

【解读】

这段文字从刚才的“口水战”转入了严谨的逻辑定义。这部分非常关键,它试图把“互补性”这个有点玄乎的概念,用类似数学定义的语言(T, D, U)给框定下来。我们把它翻译成高三物理课本上的例子来理解,你就会觉得豁然开朗。

让我们套用那个著名的“波粒二象性”模型来解析这四个条件:

- **T (理论)**: 量子力学。
- **U (论域)**: 微观粒子(比如电子)。
- **D₁ (描述1)**: 粒子性(电子像子弹一样一个个打在屏幕上)。
- **D₂ (描述2)**: 波动性(电子像水波一样发生干涉和衍射)。

现在看那四个条件:

1. **存在两种描述**: 电子既有粒子性 D_1 ,又有波动性 D_2 。
2. **属于同一对象**: 这两种描述说的都是同一个东西——电子 U 。
3. **缺一不可**: 如果你只把电子当粒子,解释不了双缝干涉;只当波,解释不了光电效应。必须两个都有,才能“完备”地说明一切。
4. **互斥且矛盾**: 这是最烧脑的一点。粒子是“一坨”在某个位置的东西,波是“弥散”在空间的东西。如果你试图想象一个东西“既是集中在一点的又是弥散在全空间的”,你的逻辑就崩溃了。这就是所谓的“组合成单一描述会导致矛盾”。

文中引用罗森菲尔德和玻尔的话,就是为了强调这种尴尬但又必须接受的局面:我们需要两套概念,但这俩概念水火不容。玻尔那句“我们的整个经验世界没有一个统一的映象”极具震撼力。

想一想,我们在高中学习经典物理(牛顿力学)时,习惯了世界是确定的、统一的。一个球在哪里就是哪里,怎么动就是怎么动。但玻尔告诉我们,微观世界的本质是分裂的。这就好比你

看一个圆柱体，从侧面看是长方形，从上面看是圆形。你需要长方形和圆形这两个概念来完整描述圆柱体，但你永远无法同时看到这两个形状。它们互斥，但又互补。

这就是玻尔对人类思想最大的贡献：他打破了我们对“单一、绝对真理”的执念，告诉我们有时候真理是由两个相互矛盾的侧面组成的。

【原文】

但是,像上面这种以相当一般的措辞定义的互补性诠释的概念(而不拘泥于 U 的本性),我们在人类思想史上容易找出满足所有的条件(1)至(4)的概念结构句的更多例子。最早的例子之一也许是公元前五世纪爱利亚的芝诺在著名的悖论中对运动概念的处理。这个悖论难倒了他的同时代人(同样也使后世人感到困惑)。一位现代作家有一次在总结这些悖论的精神时说：“在试图对运动作出一个精确的说明时,人类心智发现它面对现象的两个侧面。这两个侧面是不可避免的同时它们又是互相排斥的。”②

① N. Bohr, “Quantum physics and philosophy”, 载于 *Philosophy in the Mid-Century, R. Klibansky, ed.*, (La Nuova Italia Editrice, Florence, 1958), Vol. 1, pp. 308–314, 引文见 p. 311;重印于 N. Bohr, *Essays 1958–1962 on Atomic Physics and Human Knowledge* (Interscience, London, 1963), pp. 1–7;有德译文、俄译文及丹麦文本, 中译文“量子物理学和哲学”,见《原子物理学和人类知识论文编(1958—1962年)》(伽旭译,商务印书馆,1978),第229—237页。

② H. Fränkel, “Zeno of Elea’s attacks on plurality”, *American Journal of Philosophy* 63, 1–25, 193–206 (1942), 引文在 p. 8上。

第四章 互补性诠释的早期说法 147

【解读】

这段文字将我们的视野从20世纪的量子物理拉回到了2500年前的古希腊哲学。作者指出，“互补性”这种思维模式并不是玻尔凭空创造的，在人类思想史上早有先例，最典型的就是**芝诺悖论**。

你们在数学或历史课上可能听说过“芝诺悖论”，比如“阿喀琉斯追不上乌龟”或者“飞矢不动”。这里提到的主要是关于**运动**的悖论。让我们深入浅出地分析一下为什么芝诺悖论也是一种“互补性”。

芝诺曾提出过“飞矢不动”的悖论：一支飞在空中的箭，在任何一个瞬间，它都占据着一个确定的位置。既然它在这一瞬间占据着位置，那它在这个瞬间就是静止的。如果每一个瞬间它都是静止的，那它怎么可能在运动呢？

这里其实就出现了两个互斥的描述 (D₁和D₂)：

1. **D₁** (位置/静止): 为了描述箭在哪里, 我们需要把它定格, 这就意味着“不动”。
2. **D₂** (运动/变化): 为了描述箭在飞, 我们需要它改变位置, 这就意味着不能被定格。

你看, 这完全符合刚才定义的四个条件: 如果不看位置, 没法描述物体; 如果不看变化, 没法描述运动。但这二者在逻辑上又是矛盾的 (静止 vs 移动)。文中引用的那位现代作家说得非常精辟: “人类心智发现它面对现象的两个侧面……不可避免……又互相排斥。”

作者在这里引入芝诺, 是为了说明: 量子力学遇到的困境 (测不准原理: 位置和动量不能同时测准), 其实是人类逻辑深处的一个古老Bug。当我们试图用静态的语言或概念去捕捉动态的、连续的现实时, 必然会产生分裂。

对于高三学生来说, 这部分内容的启示在于: 学科之间是相通的。解决物理学的前沿问题, 有时需要回溯到古老的哲学智慧。当你觉得物理概念难以理解时, 不要觉得自己笨, 因为连古希腊的智者和现代的诺贝尔奖得主, 都在同一个问题面前挠头。这种跨越千年的思想共鸣, 正是学术研究最迷人的地方。[【原文】](#)

另一个古典例子是中世纪的“二重真理” [duplex veritas] 的哲学说, 它起源于十二世纪哲学家伊本-拉什德(阿维罗伊)^①的著作, 或者至少是由他的同时代的敌对者们加之于他的。这个学说 106 后来得到了拉丁的阿维罗伊主义者的倡导, 并受到邓斯·司各脱 [Duns Scotus] 与布拉班的赛格尔[Siger of Brabant]^②讨论。它宣称, 两种不同的命题, 诸如对同一实体的一种神学的说明(D₁)和一种哲学的说明(D₂), ——举个例子, 圣经上关于创世的教义和亚里士多德关于世界的永恒性的见解——可以都是正确的, 即使它们在逻辑上的合取[conjunction]导致一个“直截了当的矛盾” [flat

^① Ibn-Rushd, *Kitāb facl el maqāl wataqrir ma bain ech-charik wal' hikma min el-ittical* [论宗教与哲学之间的一致]. 见 J. Rosenfeld, *Die doppelte Wahrheit* (Scheitlin, Bern, 1914). 译者按: 伊本-拉什德(Ibn-Rushd, 1126—1198), 拉丁文译法为阿维罗伊(Averroes), 中世纪卓越的阿拉伯哲学家, 亚里士多德的研究者与信徒, 发展了亚里士多德哲学中的唯物主义成分。“二重真理” 学说的创始人之一, 所谓“二重真理”, 即是在承认神学的真理之外, 还承认有哲学的真理, 这两种真理有不同的来源和各自的范围, 可以并行不悖, 不应互相侵犯。在中世纪教权制度的统治下, 这种思想实际上是表述进步思想家企图限制神学的范围, 把信仰和知识划分开来, 从而为哲学与科学寻求解放。阿维罗伊在天主教哲学中的地位在伊斯兰教哲学中的地位更为重要, 他对西欧中世纪哲学有很大的影响。十三世纪后期, 以巴黎大学为中心, 出现了拉丁的阿维罗伊主义运动。阿维罗伊主义虽然承认法的存在, 但是认为宇宙是永恒运动的, 不生不灭, 个人的灵魂是不死灭的; 反对崇拜奇迹, 主张二重真理。当时的天主教教会曾宣布阿维罗伊主义是异端邪说。

^② P. Mandonnet, *Siger de Brabant et l' Averroïsme Latin au XIII^e Siècle* (Fribourg, 1899, 2nd ed. Louvain, 1908—1911). 译者按: 邓斯·司各脱(约1264—1308), 中世纪苏格兰经院哲学家, 唯名论的代表。他宣扬“二重真理”的理论。唯名论是英国唯物主义者理论的主要成分之一, 而且一般说来它是唯物主义的最初表现。(《神圣

家族》，《马克思恩格斯全集》第2卷,163页)。布拉班的赛格尔(? —1282),荷兰人,中世纪哲学家,巴黎大学教授,西欧的阿维罗伊主义者的首领,发展了阿维罗伊主义的唯物主义和无神论的倾向,被判终身监禁,死于宗教裁判所的监狱中。

148 量子力学的哲学

contradiction],也是如此。

【解读】

同学们，我们现在读到的这一段非常有意思，它在探讨一个看似荒谬但极具深意的主题：**人类的大脑是否可以同时接受两个截然相反的真理？**

为了解释量子力学中那些让人抓狂的矛盾（比如电子既是粒子又是波），作者带我们回到了中世纪，翻开了一页泛黄的历史——“二重真理”学说。

大家在高三数学逻辑课上学过，命题 P 和命题 $\neg P$ (非 P) 不能同时为真，否则就是矛盾。但在中世纪，哲学家们面临着一个巨大的生存危机：**科学理性（哲学）与宗教信仰（神学）**打架了。

文中提到的主角是**伊本-拉什德（阿维罗伊）**。他是亚里士多德的铁杆粉丝。亚里士多德认为“物质不灭”，世界是永恒的（这听起来很像我们物理课上的守恒定律，对吧？）。但是，《圣经》和宗教教义说“世界是上帝创造的”，有一个开端。

这就麻烦了。如果你坚持亚里士多德，你就是异端，要被烧死；如果你坚持宗教，你就得抛弃逻辑和理性。

于是，“二重真理”作为一个巧妙的（也是无奈的）解决方案诞生了。它宣称：**神学上的真理（D1）和哲学上的真理（D2）可以在各自的领域内同时成立，互不干扰**。哪怕把它们放在一起看是“直截了当的矛盾”，也不影响它们各自的有效性。这就像是一个精分现场：星期天在教堂，我相信世界是神创的；星期一在实验室，我相信物质守恒，世界永恒。

注脚部分非常详细地介绍了这个背景。请注意注脚中提到的“唯物主义”和“唯名论”。在中世纪那个宗教绝对统治的时代，提出“二重真理”其实是一种**思想解放的策略**。正如注脚所说，这是进步思想家为了给科学和哲学争取生存空间，试图把“信仰”和“知识”划清界限。如果不这么做，科学萌芽就会被宗教裁判所扼杀。

作者引用这个历史典故，不是为了给我们上历史课，而是为了做一个**类比**。他想告诉我们，量子力学中的“波粒二象性”或者“互补性原理”，其实在人类思想史上并不孤单。当我们面对微观世界那些违反直觉的现象时，也许我们需要一种现代版的“二重真理”态度：接受两种看似矛盾的描述（波动性和粒子性）在不同的实验条件下分别成立。这为我们理解玻尔的哲学做好了心理铺垫。

【原文】

最后,我们还可以在哥本哈根学派的看法和对待实验的

本性的一种古老的观念之间找出相似点,虽然这种相似性可能只是很一般的。为此,让我们回想起,正如我们看到的,玻尔的互补性哲学的出发点是下述观念:对微观物理过程进行时空描述而同时又要进行因果描述是相互排斥的,而这一观念的基础是承认,导致一种描述的实验程序同导致另一种描述的实验程序是不相容的。每一实验行为或测量都消除了获得了附加的(互补的)信息的可能性,这一事实也可以表述为:每——实验都是对自然的一种干扰,它抹去自然界的某些(否则可以实现的)潜在可能性。哥本哈根学派的理论家们常常表示出这样的观念:其时间发展由薛定谔方程支配的自然界的正常进程,受到观察行为(实验或测量)的粗暴干扰,从而使它转向强加于它的发展路线,我们将在 6.1 节中看到,约尔丹特别强调这一观念。

简而言之,一次实验是对自然界的正常进程的一次强烈的干扰。这个观念同物理学思维同样古老。实际上,正是这种观念妨碍了(或不如说是阻止了)古希腊哲人在他们对自然界的研究中发展一种系统的实验方法。诚然,社会学原因或其原因在这方面可能也起了重要作用。但是确切无疑的是,在古希腊,实验被看成是一种命中注定、不得不然的对自然或其进程的干扰:做一次实验就是一次“冒犯” [hubris] 行为,是要受到惩罚的,正如普罗米修斯、

第四章 互补性诠释的早期说法 149

迪德勒斯、艾克斯斯*和其他人的故事所表明的那样。对于希腊人,这是一个宗教报应的问题;对于玻尔,这是一个认识论失败的问题。

【解读】

这段话读起来可能有点绕,但它揭示了量子力学中最核心、最令人震惊的哲学观点:“看”这个动作本身,就是一种破坏。

让我们先回到高三物理课本。在经典物理(牛顿力学)中,我们测量一个滑块的速度,理想情况下,我们的测量不会改变滑块的运动。世界是客观存在的,我们只是在一旁静静地观察。

但是,这里提到了哥本哈根学派(以玻尔为首的量子力学正统学派)的观点。他们认为,在微观世界里,情况完全变了。

- 1. 时空描述 vs. 因果描述:** 这里指的是海森堡不确定性原理。你想知道粒子确切在哪(时空描述),你就失去了它往哪走、能量多少的信息(因果/动量描述)。这两者是互斥的,像跷跷板一样,按下一个,另一个就翘起来。
- 2. 测量的干扰性:** 文中提到“薛定谔方程支配的自然界的正常进程”。大家可以想象,在没人看的时候,微观粒子像波一样优雅地演化,充满了一切可能性(叠加态)。但是,一旦你进行“实验”或“测量”,你就“粗暴干扰”了它。你强迫大自然从无数种可能性中选择一种(波函数坍缩)。就像是一个害羞的精灵,本来在跳舞,你一开灯,它就僵住在那里不动了。

接下来，作者做了一个非常精彩的跨越千年的对比。他指出，这种“**实验即干扰**”的观点，其实古希腊人早就有了！

大家可能想过，为什么古希腊人几何学那么强，哲学那么深邃，却很少做物理实验？是因为他们懒吗？作者告诉我们就不是。古希腊人认为，大自然有它神圣的秩序。人类要是动手去“实验”，去人为地干预自然过程，就是一种**傲慢（Hubris）**，是对神的“冒犯”。

文中提到了几个神话人物作为例子（下一段有详细注解）：

- **普罗米修斯**：因为盗火给人类（一种改变自然秩序的技术行为），被宙斯惩罚。
- 这暗示了古希腊人潜意识里觉得：试图通过手段（实验）去拷问自然，会招致灾难。

核心总结：

- **古希腊人**：不做实验，因为怕遭报应（宗教/道德原因）。实验是对自然的亵渎。
- **玻尔（量子力学）**：做实验会遇到限制，因为观测会改变被观测者（认识论原因）。实验是对自然状态的不可逆的抹除。

虽然出发点不同，但结论惊人的一致：我们永远无法在不干扰自然的情况下，完全看清自然的本来面目。对于玻尔来说，这不仅仅是技术不够先进，而是宇宙的根本属性——**我们参与了我们所观察的现实的构建**。

【原文】

使玻尔的互补性诠释同所有这些历史上的前例区别开来，并使它在人类思想史上占有一个独特地位的特征，当然是下述事实：玻尔的观念不只是抽象的玄想，而是被各种经验发现所坚定地支持的。实际上，这些观念正是为了克服实验观察的矛盾而想出来的。

在讨论量子力学态代表着关系的观念(即认为一个系统的量子力学态不只限于描述系统本身，而表示了系统与测量仪器之间的关系)的 6.5 节中,我们将要让读者注意到更多的和玻尔的观念类似的历史上的先例。

* 这些都是希腊神话中的人物。普罗米修斯[Prometheus]，著名的盗火者，他把火焰带给人类，使人类发展了文明，触怒了主神宙斯[Zeus]，把他锁在高加索山岩上，让老鹰啄食他的肝脏，备受折磨。迪德勒斯[Daedalus]和艾克斯斯[Icarus]是父子，父亲迪德勒斯是建筑师和雕刻家，为克里特国建造一座巧夺天工的迷宫，建成后两父子都困于迷宫内，后用蜡造的翼腾空逃出。但艾克斯斯飞得离太阳太近，蜡翼融化，堕海而死。——译者注

【解读】

在这一段中，作者做了一个关键的收束，防止我们误入歧途。

虽然前面讲了那么多中世纪哲学和古希腊神话，把玻尔的量子力学说得好像是一种玄学或者复古的哲学。但是，作者在这里立刻踩了一脚刹车，强调了**科学与纯哲学的本质区别**。

为什么玻尔的理论如此伟大且独特？

作者明确指出：玻尔的“互补性原理”不仅仅是坐在摇椅上空想出来的（抽象的玄想）。它不是像古希腊哲学家那样，凭直觉觉得“实验不好”就停止了。相反，玻尔的观点是被**硬邦邦的实验数据**（经验发现）逼出来的。

想象一下，物理学家们本来也想追求一个完美的、确定的、不被干扰的世界。但是，黑体辐射、原子光谱、电子双缝干涉等一系列实验结果（也就是文中说的“实验观察的矛盾”），把他们逼到了墙角。旧的理论解释不了，如果不引入“互补性”和“测量干扰”这些概念，物理学就崩塌了。所以，量子力学的哲学虽然听起来很玄，但它的根基是**实证科学**。

关于译者注的神话故事：

这部分注解是对上一段提到的“希腊人的报应观”的补充。

- **普罗米修斯**：象征着人类通过技术手段（火）获取自然力量，结果受到惩罚。这对应了“实验是对自然的冒犯”。
- **伊卡洛斯（艾克斯斯）**：这是一个关于“度”和“界限”的故事。他用蜡做的翅膀飞翔（技术/实验），但飞得太高（离太阳/自然真理太近），结果翅膀融化掉下来了。这也隐喻了人类企图通过人工手段过度探究自然秘密时的危险和局限。

最后的前瞻：

文中预告了第6.5节的内容，抛出了一个极其深刻的概念：“**量子力学态代表着关系**”。

这是什么意思呢？在高三物理中，我们通常认为一个物体的质量、速度是它自己的属性。但在量子力学中，一个系统的状态，不仅仅属于它自己，而是属于**“它 + 测量仪器”**这个整体。

这就像你问：“这个学生是内向还是外向？”量子力学会告诉你：这取决于谁在问他。如果老师问，他可能是内向的；如果死党问，他可能是外向的。你不能脱离“询问者（测量仪器）”单独定义“学生的性格（量子态）”。这就是所谓的“关系”。

总结来说，这一章通过历史的回顾，让我们明白：量子力学不仅是一门计算粒子轨迹的科学，它更是一次人类认识论的革命，它迫使我们重新思考“客观现实”究竟意味着什么。