

好的，请看我的解读。

【原文】

第三章 测不准关系

3.1 测不准关系的早期历史

1926年夏天，薛定谔应索默菲尔德[Sommerfeld]之邀在慕尼黑就他的新波动力学作了一次讲学。薛定谔对氢原子问题的优雅处理，同泡利求得的矩阵力学^①相比之下，显示了波动力学相对于矩阵力学的优越性，因此薛定谔对波动力学形式体系的诠释也被慕尼黑讲习班的绝大多数参加者赞同地接受了。海森伯的反对意见(例如普朗克的基辅射定律在薛定谔诠释的框架内完全不能理解)被认为是夸夸其谈;例如，举一个典型的反应。慕尼黑实验物理研究所所长维恩[W. Wien]就驳斥海森伯的批评说，既然薛定谔已经证明了“量子跳变”是无稽之谈，从而宣告了建立在这种观念的基础上的理论的末日，那么用波动力学来解决所有遗留下来的问题，也就只是时间问题了。

会后不久，海森伯写信给玻尔谈到了薛定谔的演讲。可能是

① W. Pauli, “Über das Wasserstoffspektrum vom Standpunkt der neuen Quantenmechanik,” *Z. Physik* **36**, 336–363(1926).

第三章 测不准关系 81

这封信^①的内容促使玻尔邀请薛定谔到哥本哈根去度过两个星期，以讨论量子力学的诠释。正是薛定谔1926年9月对玻尔的研究所的访问，促进了(至少是间接地)最后导致玻尔宣布互补诠释的发展过程。

当时，玻恩关于绝热原理的论文^②尚未发表，在这篇文章里他通过他的统计诠释成功地把薛定谔一方、玻尔和海森伯为另一方的对立意见在一定程度上“掺和”(用他自己的说法)起来。虽然人们对薛定谔关于波动力学同矩阵力学之间的形式等价性的证明已经知道了六个月了，但是在作为这两种相互竞争的表述方式的基础的概念诠释之间的鸿沟，还远没有架桥。事实上，正是在薛定谔访问哥本哈根期间，意见对立公开化了，并且显得是不可调和的。最生动地反映了他们之间观点交锋的情况的，莫过于海森伯报道的这件事^③了:在争论结束时薛定谔喊道:“如果真有这些该死的量子跳变[verdamnte Quantenspringen],我真后悔不该卷入到量子理论中来”,而对此玻尔却回答说:“但是我们旁人都极为感激你曾经卷入过，因为你为发展这个理论作了这样的贡献。”⁵⁷

虽然薛定谔未能说服玻尔和不久前到达哥本哈根的海森伯，但是玻尔-薛定谔论战却激起了——直到薛定谔离开哥本哈根以后很久的炽烈讨论。事实上，这场论战的结果是，玻尔和海森伯

① 见 W. Heisenberg, 36 页注①文献(1969, p. 105;1971, p. 73)。

② 见 63 页注①文献。

③ W. Heisenberg, “The development of the interpretation of the quantum theory”, 收入文集 Niels

Bohr and the Development of Physics, W. Pauli, ed., (Pergamon Press, Oxford, 1955), pp. 12–29;德译文 *Physikalische Blätter* **12**, 289–304(1956)。 36页注①文献(1969, p. 108;1971, p. 75)。

【解读】

同学们好，我们今天来聊聊量子力学中最酷、也最颠覆三观的概念之一——“测不准关系”。但在直接进入公式和定义之前，我们先穿越回1926年，去感受一下那场物理学界的“华山论剑”。

想象一下，当时的物理学界正处在一个分裂的时代，有点像武侠小说里的两大门派。一派是以薛定谔为首的“波动力学派”，另一派是以海森伯和玻尔为首的“矩阵力学派”。

薛定谔的“波动力学”非常受欢迎，因为它很“优雅”，很符合物理学家的审美。它把电子想象成一种弥散在空间中的“波”，就像水波一样。你可以用一个漂亮的波动方程（就是著名的薛定谔方程）来描述它的一切。这种图像是连续的、直观的，大家更容易接受。文中所说的“优雅处理”，就是指薛定谔用他的理论完美解释了氢原子光谱，而且数学形式比对手的理论漂亮多了。所以你看，连实验物理的大佬维恩都成了他的“粉丝”，认为薛定谔的理论终结了那个令人头疼的“量子跳变”。

那么，什么是“量子跳变”呢？这是海森伯和玻尔他们那一派理论的核心观点。在他们看来，电子从一个能级跃迁到另一个能级，不是像我们上楼梯一样一步一步走上去，而是“唰”地一下，瞬间消失在一个地方，同时出现在另一个地方，中间过程根本不存在。这个想法在当时看来太怪异、太不连续了，简直是物理学中的“幽灵”。薛定谔就极其讨厌这个概念，他认为自己的波动理论证明了世界是连续平滑的，根本没有这种“该死的跳变”。

于是，物理学史上最著名的一场辩论上演了。玻尔邀请薛定谔到哥本哈根“喝茶聊天”，实际上是想说服他。结果呢？两个人谁也说服不了谁，吵得不可开交。原文中那段戏剧性的对话非常经典：薛定谔激动地喊出“如果真有这些该死的量子跳变，我真后悔...”这背后，是他对一个经典、连续、可知世界的捍卫。而玻尔的回答则体现了一位大师的风范，他感谢薛定谔的贡献，但潜台词是：不管你喜不喜欢，量子世界可能就是这么怪。

这场争论的核心，其实是两种世界观的冲突：世界在微观尺度上到底是连续的还是跳跃的？是可以直观理解的，还是只能用抽象数学描述的？这场“神仙打架”虽然没有当场分出胜负，但它点燃了导火索，迫使海森伯和玻尔去更深入地思考一个问题：我们的理论，和我们能“看到”的实验现象，到底应该如何联系起来？而这个问题的答案，最终将引出石破天惊的“测不准关系”。

【原文】

82 量子力学的哲学

固然坚信薛定谔的观念是靠不住的，但他也感到，需要进一步澄清他们所设想的量子力学同经验资料之间的关系。

他们从一个看来最简单的观察现象出发，试图分析根据他们的理论如何来说明威尔逊云室中所观察到的电子的径迹。在矩阵力学中，一个电子的“径迹”或“轨道”的概念是没有直接定义的，而在波动力学中任何波包在运动中都会很快弥散到与这种“径迹”的横向大小不相容的程度。一直在1927年2月玻尔离开研究

所去度一短暂假期的期间，海森伯一直在考虑这个问题，他看不到有任何摆脱这个困境的办法，而被迫得出结论说，这个问题的前提本身就必須修改。一方面，他发现量子力学的数学形式体系是如此成功，不能废除；另一方面他又观察到威尔逊云室中粒子的“径迹”。但是怎样把这二者联系起来呢？正是在这个问题上，他想起了1926年春天他对待柏林物理讨论会的讲演和会后同爱因斯坦就物理学中“观察”的意义进行的谈话^①。爱因斯坦曾说过：“是理论决定我们能够观察什么”^②。海森伯现在感到，问题的解决就在这句话中。因为，如果能够证明，理论论否定了粒子的轨道(位置及动量)的严格的可观察性，而是认为，威尔逊云室中“观察到”的现象只是由凝结的小水滴所表征的不精确位置所组成的一个不连续的序列，那么在数学形式体系与观察经验之间就可以建立起协调一致的联系。

① 详细情况见 W. Heisenberg, “Die Quantenmechanik und ein Gespräch mit Einstein”, 收在36页注①文献中(1969, pp. 90–100; 1971, pp. 62–69)。此文的中文译文载于《爱因斯坦文集》第一卷(许良英等译, 商务印书馆, 1977), 第210–217页, 题目改为“关于量子力学的哲学背景同海森伯的谈话(报道)”。

② 德文原话是“Erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann.”见36页注①文献(1969, p. 92, 1971, p. 63)。

第三章 测不准关系 83

正如他也自己在这些日子里的一些话和后来的回忆所充分证实的，海森伯在仍为仍然神秘的量子力学形式体系寻求一种诠释时，也想起了爱因斯坦对发生在空间不同地点的事件的同时性的分析是如何解决了相对论前的光学空间动力学中的棘手的矛盾。海森伯内心渴望，对位置和速度的概念做一番操作分析，或更恰当地说对这两个概念进行重新解释，对微观物体的力学会有起作用，将和爱 因斯坦关于同时性的分析对高速现象的力学所起的作用一样。正如在引入适当的对针方法之前谈论两个不同地点的事件的同时性是毫无意义的一样。海森伯说，“谈论具有一个确定速度的粒子的位置是没有意义的”。并且的确，他关于测不准关系的历史性论文^①是以这样的话开始的：“如果谁想要阐明‘一个物体的位置’，[Ort des Gegenstandes]例如一个电子的位置这个短短的意义，那么他就描述了一个能够测量‘电子的位移’的实验；否则这个短语就根本就没有意义。”

虽然把海森伯划为一个纯粹的操作论者^②还轻率了些，因为

【解读】

与薛定谔的激烈辩论之后，海森伯和玻尔虽然嘴上赢了，但心里其实很“虚”。他们坚信自己的理论是对的，但必须解决一个尖锐的矛盾：理论与现实的脱节。这个问题具体体现在一个非常经典的实验上——威尔逊云室。

同学们可以把威尔逊云室想象成一个“粒子显形器”。当一个带电粒子（比如电子）飞过充满过饱和水蒸气的腔室时，它会沿途让水蒸气凝结成小水滴，从而留下一条清晰可见的“径迹”，就像飞机飞过天空留下的尾迹。这个“径迹”看起来不就是我们熟悉的“轨道”吗？问题来了，这个看似简单的现象，两大理论门派都解释不了！

1. **海森伯的矩阵力学**：这个理论的数学框架里，根本就没有“轨道”这个词。它只能计算出电子在不同能级上的概率，无法描述一个连续的运动轨迹。

2. **薛定谔的波动力学**：如果电子是一个波包，那么根据波动理论，这个波包在传播过程中会迅速“弥散”开来，变得越来越大、越来越模糊，根本不可能形成一条细长的、清晰的径迹。

这就是海森伯面临的巨大困境：一个如此成功的数学理论，却无法解释一个最基本的实验现象。他苦思冥想，直到有一天，他脑中灵光一闪，想起了与另一位“大神”——爱因斯坦的对话。爱因斯坦曾对他说过一句充满哲理的话：“是理论决定我们能够观察什么。”

这句话是什么意思呢？它的颠覆性在于，我们通常认为，是先有客观的观察，然后我们建立理论去解释它。但爱因斯坦认为，我们用来“观察”和“思考”的概念（比如时间、空间、位置），本身就是由我们的理论所定义的。没有理论框架，这些概念甚至可能是无意义的。

海森伯从这句话中得到了天启。他意识到，也许问题不在于理论，而在于我们对“观察”和“径迹”的理解从根上就错了！他大胆地提出：我们看到的所谓“径迹”，根本就不是一条无限精确的连续轨道。它实际上只是一连串凝结的小水滴，每一个水滴标记了电子在某个瞬间的**一个不精确的位置**。我们的大脑自动把这些离散的点“脑补”成了一条线。因此，我们的理论根本不需要去解释一条完美的轨道，只需要解释为什么我们能观测到这么一串离散的、位置模糊的点就行了。

这个思想转变是革命性的。海森伯进一步借鉴了爱因斯坦在相对论中的思考方式。大家在高一物理学过，爱因斯坦是如何重新定义“同时性”的？他说，脱离具体的对时方法（比如用光信号）去谈论两个遥远事件的“同时性”是毫无意义的。同样，海森伯提出，脱离具体的测量实验，去谈论一个电子“既有确定的位置，又有确定的速度”也是毫无意义的。你不能想当然地认为这些经典概念在微观世界里依然好用。

于是，海森伯那篇开创性论文的开篇就直击要害：“如果你想谈论‘一个电子的位置’，你就必须先告诉我，你打算用一个什么样的实验去测量它。否则，‘电子的位置’这个词组就毫无意义。”这就是“操作主义”思想的体现：一个物理量的意义，完全蕴含在测量它的操作之中。这个思想转变，直接为“测不准关系”的诞生铺平了道路，它宣告了我们必须放弃对微观粒子进行经典式描述的幻想。好的，导师就位。各位同学，今天我们要一起深入探讨量子力学中一个非常核心，也经常被误解的概念——测不准关系，也就是大家熟知的“不确定性原理”。我们手中的这份文献节选，来自一部探讨量子力学哲学的著作，它将带领我们拨开迷雾，看看物理学大师们是如何思考和争论这个问题的。这不仅仅是物理知识，更是一场关于科学如何构建、理论如何诠释的哲学思辨之旅。准备好了吗？让我们开始吧。

【原文】

① 51 页注①文献。

② 操作论[operationalism]，现代西方哲学流派之一。由美国物理学家布里奇曼[P. W. Bridgman, 1882–1961]创立。它是经验论和实证论相结合的产物。它认为任何概念无非是一套操作，“概念同与其相应的一套操作是同义”。狭义的操作指物理操作，如测量、实验等；广义的操作则指思维、讨论、演算。这种把真理的标准归结为实验、演算手续的主观唯心论说法，在西方物理学家中很盛行。——译者注。

② 甚至在同情实证论的布里曼看来，海森伯的虽然属于操作论和实证论的言论也只是“对矩阵力学的成功所作的一种哲学解释，而不是……理论的陈述的一个不可分的部分”。见 P. W. Bridgman, *The Nature of Physical Theory* (Dover, New York, 1936), p. 65, 但另一方面，索末菲却在海森伯身上看到了马赫的一个

忠实信徒。见 A. Sommerfeld, “Einige grundsätzliche Bemerkungen zur Wellenmechanik”, *Physikalische Zeitschrift* **30**, 866–871(1929),特别是 p. 866。

84 量子力学的哲学

他完全同意爱因斯坦的这种意见,即什么东西可以观察到或观察不到最终是由理论决定的,但是很容易把他的论文解释成企图把量子力学建立在对可测量性的操作限制的基础上的一种尝试。论文前提的提要强烈支持这个看法。在谈到如位置同动量或能量同时间这些正则共轭量的测不准关系时,海森伯说道:“这种不确定性正是量子力学中出现测不准关系的根本原因”^①。

在1929年发表的一篇关于1918年到1928年期间量子理论发展的综述^②中,海森伯宣称,测不准关系,就它们仅仅只表示粒子理论的概念的可用性极限而言,是不足以成为形式体系的一种诠释的。“相反,正如玻尔已证明的那样,当同时依靠粒子图象和波动图象,这才是它在一切情况下确定经典概念的可用性的极限的一个必要而且充分的办法”^③。

但是对于那些对认识论的微差别不特别感兴趣的物理学家来说,把海森伯关系当作量子力学的一种操作基础是诱人的和有说服力的,正如不可能制造出(第一类)永动机可以而且也被确被当作谁能说的基础,不可能检测出以太漂移被当作狭义相对论的基础一样。这就难怪早在1927年7月,肯纳德就在一篇评述性论文^④中把海森伯关系称为“新理论的核心”。

① 见51页注①文献(p. 172)。

② W. Heisenberg, “Die Entwicklung der Quantentheorie 1918–1928”, *Die Naturwissenschaften* **17**, 490–496(1929)。

③ 同上 p. 494。

④ E. H. Kennard, “Zur Quantenmechanik einfacher Bewegungstypen”, *Z. Physik* **44**, 326–352(1927), 引文在 p. 337 上。

【解读】

同学们,我们眼前这段文字,实际上是在探讨一个深刻的哲学问题:一个物理理论的根基应该是什么?它首先引入了一个关键的哲学流派——**操作论**。这个词听起来很酷,但思想其实很直接。大家可以这样理解:我们如何定义“长度”?操作论者会说,“长度”这个概念的全部意义,就等同于我们用尺子去测量它的那一套动作。如果一个东西我们无论如何也无法通过任何操作(测量、实验)去接触到它,那么谈论它就是没有意义的。这是一种非常务实,甚至有点“极端”的科学哲学,强调“眼见为实,动手为真”。

海森堡在1927年提出测不准关系时,他的论证方式充满了这种“操作论”的味道。他分析了我们如何用显微镜去“看”一个电子,发现你看得越清楚(位置测量越准),用的光子能量就越高,把电子撞得就越厉害(动量就越不准)。于是他似乎在说,正是因为我们测量这个动作本身存在着不可避免的局限,导致了位置和动量无法同时精确测定。你看,这听起来就像是把量子力学建立在了“我们能做什么,不能做什么”这个操作限制上。

这段文字的精妙之处在于，它立刻向我们展示了科学界对这个观点的复杂反应。一方面，很多物理学家觉得这个想法太棒了！它简洁又有力。就像热力学建立在“永动机不可能”这个基本前提上，爱因斯坦的狭义相对论建立在“以太漂移测不到”这个实验事实上一样，把量子力学建立在“位置和动量无法同时精确测量”的基础上，似乎让这个奇怪的理论有了一个坚实的、可操作的出发点。所以当时就有人称之为“新理论的核心”。

但另一方面，事情没那么简单。海森堡本人，以及像布里奇曼这样的思想家，其实都看到了这种简单想法的局限。海森堡在两年后（1929年）的文章中就澄清了：仅仅说“我们测不准”，还不足以支撑整个量子力学大厦。他引用了导师玻尔的思想，指出问题的根源更深，在于微观粒子同时具有**粒子和波动的双重属性**。这两种图像是互斥的，但又都是描述粒子所必需的。所以，测不准关系不是一个简单的操作限制，而是这种深刻的“波粒二象性”带来的必然结果。这里，我们已经能嗅到一场伟大辩论的味道：测不准关系，它究竟是量子世界的“根本大法”，还是由某个更深层原理（比如波粒二象性）衍生出的一个“具体条款”呢？这个问题，将贯穿我们今天的整个解读。

【原文】

第三章 测不准关系

泡利在他的著名的《物理大全》论文⑥中是从叙述海森伯关系出发来阐述量子理论的，并且由于他的原故，韦尔夫于群论和量子力学的书⑦(其第一版出版于1928年)也把这些关系当作整个理论的逻辑结构整体的一个组成部分。从那以后，许多量子力学教科书的作者，例如马奇[March] (1931)、克拉默斯[Kramers] (1937)、达什曼[Dushman] (1938)、朗道和里夫席兹[Landau и Лифшиц] (1947)、希夫[Schiff] (1949)以及玻姆[Bohm] (1951)都采用了同样的办法。

但是是在1984年，波普尔⑧对于海森伯关系在逻辑上应当先于理论的其他原理的主张(这个主张以所谓理论的统计特征来自于这些不确定性的说法为理由)提出了诘难。波普尔反对对测不准公式同理论的统计或几率诠释之间的关系作这种分析，他指出，我们能够从薛定谔波动方程(对它应该作统计诠释)导出海森伯公式，但不能从海森伯公式导出薛定谔方程。如果我们对这种推导次序作了应有的考虑，那么就必须修正对海森伯公式的解释。

- ⑥ W. Pauli, “Die allgemeinen Prinzipien der Wellenmechanik”, Handbuch der Physik (H. Geiger and K. Scheel), 第二版, Vol. 24 (Springer, Berlin, 1933), pp. 83–272; 这篇论文除了最后几小节外重印在新的《物理大全》中; Handbuch der Physik (Encyclopedia of Physics) (S. Flügge), Vol. 5 (Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1958), pp. 1–168. 泡利的下述论文包含有关于旧量子论的价值的信息. W. Pauli, “Quantentheorie”, Handbuch der Physik (H. Geiger and K. Scheel), 第一版, Vol. 23 (Springer, Berlin, 1926), pp. 1–278.
- ⑦ H. Weyl, Gruppentheorie und Quantenmechanik (Hirzel, Leipzig, 1928); 英译本 The Theory of Groups and Quantum mechanics (Methuen, London, 1931; Dover, New York, 1950).

- ⑧ K. Popper, Logik der Forschung (Springer, Wien, 1935); 英译本 The Logic of Scientific Discovery (Basic Books, New York, 1959) ,p. 223.

【解读】

好的，同学们，我们继续往下看。上一段我们谈到，将测不准关系作为量子力学的逻辑起点，是一个非常具有吸引力的想法。这段文字就用事实告诉我们，这个想法有多么深入人心。它列出了一长串如雷贯耳的名字——泡利、韦尔、朗道、玻姆……这些都是物理学史上的顶级大师，他们写的教科书，在几十年的时间里定义了全世界物理系学生学习量子力学的方式。而他们中的许多人，都选择了从海森堡的测不准关系开始，构建整个理论体系。这就像我们学习几何，总是从几个不证自明的公理（比如“两点确定一条直线”）开始一样。在很长一段时间里，测不准关系就被赋予了这种“公理”般的崇高地位。

然而，科学的魅力就在于它从不畏惧挑战权威。这里，一位重量级挑战者登场了——卡尔·波普尔。他不是物理学家，而是20世纪最重要的科学哲学家之一。波普尔对科学的看法非常犀利，他关心的是理论的**逻辑结构**。他向这个流行了几十年的传统观点发起了诘难，也就是质问和责难。他的武器是什么呢？非常简单，就是数学和逻辑上的推导关系。

波普尔的论证，我们可以用一个简单的比喻来理解。假设我们有两个命题，A和B。如果我能从A推导出B，但不能从B反过来推导出A，那么在逻辑上，A就比B更根本、更基础。现在，我们把A看作是**薛定谔方程**，把B看作是**海森堡测不准公式**。薛定谔方程，大家可以把它理解为量子世界的“牛顿第二定律”，是描述微观粒子如何运动和演化的最核心方程。波普尔指出，物理学家们早已证明，只要我们承认薛定谔方程是正确的，并且接受对它的统计诠释（即波函数描述的是粒子在各处出现的概率），我们就能通过严格的数学演算，**推导出**海森堡测不准公式。但是，反过来行不通！你无法从一个简单的测不准公式（ $\Delta x * \Delta p \geq \hbar/2$ ）出发，反推出那个复杂而强大的薛定谔方程。

这个发现的意义是颠覆性的！它直接动摇了测不准关系的“公理”地位。按照波普尔的逻辑，如果测不准关系只是薛定谔方程的一个数学推论，那它就不可能是整个理论的逻辑起点。它不再是量子力学这座大厦的地基，而更像是从地基和主体结构中自然延伸出来的一个阳台。这就迫使我们必须重新思考：测不准关系到底意味着什么？它不是导致量子世界充满概率和不确定性的**原因**，而更像是这个概率化世界所表现出的一个**结果**或特征。这一下，整个问题的视角就被彻底扭转了。

【原文】

量子力学的哲学

我们要到后面的一节中再来讨论别种诠释——特别是波普尔提出的统计再诠释，根据这种再诠释，海森堡公式仅仅表示所包含的参量之间的统计散布关系。但是我们要指出，波普尔的批评并不是针对玻尔的，玻尔从来不把海森堡关系当作理论的逻辑基础，也不把它同将在下一章讨论的互补原理等同起来。我们认为，把互补性和测不准性混为一谈，这从历史上讲是错误的。例如，福克（他认为互补性是“量子力学整体的一个组成部分”和一个已牢固存在的自然规律”）的下述说法就错了，他说：“互补性这个

术语，最初是用来表示由测不准关系所直接引起的那种情况。互补性是关于坐标和动量测量中的测不准性的……并且‘互补原理’这个术语被理解为海森伯关系的同义语。”

【解读】

现在我们来到了最后一段，也是思想上最需要澄清的一段。这段文字的核心任务，是区分两个经常被混淆，但实际上层次完全不同的概念：海森堡的**测不准关系**和玻尔的**互补原理**。

首先，让我们再次明确波普尔的观点。在他看来，海森堡公式的本质，就是一个**统计散布关系**。这个词听起来专业，但意思不难懂。想象一下，我们有一大批完全相同的粒子，都处于同一个状态。我们去测量它们的位置，得到的结果不会都一样，会有一个分布范围，这就是“散布”。同样，我们去测量它们的动量，结果也有一个散布。海森堡公式告诉我们的，就是这两个散布的“宽度”（用标准差来衡量）之间有一个反比关系：一个越窄，另一个就必然越宽。它描述的是一个粒子群体的统计性质，而不是对单个粒子一次测量的直接限制。

接下来，文章抛出了一个至关重要的历史事实：波普尔的批评，虽然动摇了将测不准关系奉为圭臬的传统，但它其实并没有伤到量子力学另一位精神领袖——尼尔斯·玻尔。为什么呢？因为玻尔这位“哥本哈根学派的教皇”，从来就没想过把测不准关系当作理论的逻辑基础。在他的思想体系里，有一个更宏大、更深刻的原则，那就是**互补原理**。

那么，什么是互补原理？这是一个哲学高度远超测不准关系的构想。它的核心思想是：在微观世界里，一个客体（比如电子）的全部真相，无法用单一的、经典的图景来描述。它同时拥有看似矛盾的属性，比如**波动性**和**粒子性**。当你设计一个实验去观察它的波动性时（比如双缝干涉），它就呈现出波的形态，而它粒子性的一面就变得模糊；反之，当你设计实验去追踪它的粒子轨迹时，它就表现得像个粒子，而波动性就消失了。这两种属性，就像一枚硬币的两面，你一次只能看到一面，但你必须承认两面都真实存在，它们“互为补充”，共同构成了对这枚硬币的完整描述。

所以，请大家务必记住这里的关键区别：

- **测不准关系**：是一个定量的数学公式（ $\Delta x * \Delta p \geq \hbar/2$ ），是互补思想在一个具体物理情境（同时测量位置和动量）下的数学体现。它更像是一个“规则”或“定理”。
- **互补原理**：是一个定性的哲学框架，是一种世界观。它告诉我们应该如何理解和描述那个超乎日常经验的量子世界。它更像是一个“根本大法”或“指导思想”。

因此，文章最后严厉批评了像福克那样将两者混为一谈的说法。把“互补原理”等同于“测不准关系”，就像是把“生物进化论”这个宏大的理论体系，等同于“长颈鹿的脖子变长”这一个具体的例子一样，是犯了以偏概全的错误。测不准性只是互补性的一个精彩例证，却远非其全部内涵。玻尔的思想，比一个数学不等式要深邃得多。好的，我将扮演一位专业的学术导师，为高二的你详细解读这份关于量子力学哲学思辨的文档。让我们一起深入这个迷人又有些烧脑的微观世界。

【原文】

的确，互补性和海森伯不确定性这两个术语常常被当成是同义的。举个例子，瑟伯和汤恩斯在1960年纽

约量子电子学讨论会上宣读的一篇论文②中，谈到了“由互补性引起的对电磁放大作用的限制”，实际上他们指的是电磁波中位相 φ 同光子数 n 之间的测不准关系，即关系式 $\Delta\varphi\Delta n \geq \frac{1}{2}$ ，它决定了一个微波散射放大器性能的极限。互补性和海森伯测不准性肯定不是同义的，这可以从下述简单事实得出，我们即将看到，海森伯测不准关系是量子力学形式体

- ① В. А. Фок, “Критика взглядов Бора на квантовую механику”, УФН 45-3-14 (1951); 德译文, V. A. Fock, Sowjetwissenschaft 5,123-132 (1952); (德订稿) Czecho-slovak Journal of Physics 5,436-448 (1955).
- ② A. Serber and C. H. Townes, “Limits on electromagnetic amplification due to complementarity”, Quantum Electronics—A Symposium (Columbia U. P., New York, 1960), pp. 233-255.

第三章 测不准关系

系的一个直接数学结论，更精确地说，是狄拉克-约尔丹变换理论的一个结论，而互补性却是在加形式体系上的一个种外来诠释。事实上，完全不依靠互补性，也可以得到包括海森伯关系在内量子力学形式体系的逻辑一贯的诠释，而且已经得到了这样的诠释。

【解读】

同学你好，我们现在开始解读这份文档。这段开篇的文字，就像一位侦探在纠正一个流传已久的误会，这个误会就是——很多人把“互补性”和“海森伯不确定性原理”（也就是我们常说的“测不准原理”）混为一谈。作者开门见山地指出：它们俩绝对不是一回事！

为了证明这一点，他举了一个很具体的例子：一个关于电磁放大的科学论文。论文标题里用了“互补性”，但内容里讨论的却是光子数 (n) 和相位 (φ) 之间的不确定性关系。这就像什么呢？想象一下，你有一首音乐，你可以非常精确地知道这首音乐的“音量”（对应光子数，也就是光的强度），但这样一来，你就无法精确地知道音乐在某一时刻的“节拍”进行到哪里了（对应相位）。反之亦然。这个关系， $\Delta\varphi\Delta n \geq \frac{1}{2}$ ，和我们更熟悉的位移-动量不确定性关系 $\Delta x\Delta p \geq \hbar/2$ 在本质上是一样的，它是一个硬性的、数学上的限制。

这里，作者抛出了一个核心论点，这也是你理解后续内容的关键。他把量子力学分成了两个层面：

1. **“形式体系”(Formalism)**：你可以把它想象成量子力学的“数学引擎”。它是一整套严谨的数学规则、方程和理论（比如这里提到的“狄拉克-约尔丹变换理论”）。这套引擎本身就能通过计算，直接“推导出”海森伯不确定性关系。也就是说，不确定性是量子力学这台机器天生自带的一个属性，是一个必然的数学结论。
2. **“诠释”(Interpretation)**：这个层面更像是为这台神秘的“数学引擎”撰写的“用户手册”或“哲学解读”。尼尔斯·玻尔提出的“互补性原理”就属于这个层面。它告诉我们，一个微观粒子会同时拥有看似矛盾的属性（比如波动性和粒子性），但我们在一次观测中只能看到其中一面，这两面是“互补”的。这是一种理解和解释量子世界运行方式的哲学思想。

所以，作者的核心观点是：海森伯不确定性原理是量子力学骨子里的东西，是数学推导出的必然结果。而互补性原理，则是一种附加在数学骨架之上的哲学“血肉”，它帮助我们去理解和思考这个奇怪的微观世界，但并非推导出不确定性原理的必要前提。你可以不接受玻尔的哲学，但只要你使用量子力学的数学工具，就无法绕开不确定性原理。这个区分非常重要，它帮助我们将物理学的数学核心与哲学思考分离开来。

【原文】

3.2 海森伯的推理

在说了这些外的话之后，我们回到海森伯关系的概论起源上来。海森伯在1927年所面对的问题是双重的：(1)形式体系容许一个粒子的位置和速度在一给定时刻只能以有限的精确度被确定这一事实吗？(2)如果理论已承认这样的不精确性，那么它同实验测量中可以获得的最佳精确度是相容的吗？

在讨论海森伯对这些问题的回答之前，让我们对术语的使用作以下说明。海森伯在这些考虑中所用的术语是 *Ungenauigkeit* (不精确，不精密) 或 *Genauigkeit* (精密，精密度)。事实上，在他的经典性论文 (译者按即文献 2–20) 中这些术语 (不包括形容词 *genau*) 出现了 30 次以上，而术语 *Unbestimmtheit* (测不准) 只出现两次，*Unsicherheit* (不确定) 只出现三次。有意义的是，最后一个术语，除了一处例外 (p. 186)，只用于文后的附记中，而这个附记

- ① 为了历史的准确，应当说明，狄拉克在1926年秋已提出了同样的问题。他在论文“The Physical interpretation of the quantum dynamics” [Proceedings of the Royal Society A 113,621–641(1926), 1926年12月2日收到]中,先于海森伯写道(p. 623): “我们在量子理论的基础上不能回答任何关于 p 和 q 二者的数值的问题”。

量子力学的哲学

是在玻尔的影响下的写。一般来说，我们将遵循以下的术语用法：

1. 如果强调的是对可观察量取值的主观知识的缺乏，我们将使用不确定 (uncertainty) ① 这个术语，与海森伯的用法①相一致，
2. 如果强调的是可观察量的精确值假定在客观上(即与观察者无关地)不存在，我们将使用无定值 (indeterminateness) ② 这个术语，
3. 如果对哪一方面都不强调，我们将使用测不准 (indeterminacy) 作为①一个中性术语。

- ① 见 W. Heisenberg, *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie* (Hirzel, Leipzig, 1930) ,p. 15; 英译本 *The Physical Principles of the Quantum Theory* (University of Chicago

Press, Chicago, 1930; Dover, New York, 无出版日期), p. 20; 意大利文本 (1948); 法文本 (1957, 1972) 俄文本 (1932)。

- ② 见 D. Bohm, *Causality and Chance in Modern Physics* (Routledge and Kegan Paul, London, 1957), p. 85 上脚注; 译本 (1959), 中译本, 现代物理学中的因果性与机遇(桑克茨, 洪定国译, 商务印书馆, 1965), 第 101 页脚注。
- ③ 下面就本书对这几个术语的译法和用法做一说明。作者所列的三个术语中, uncertainty 与 indeterminacy 是比较常用的, uncertainty 尤为常用。海森伯关系一般英文量子力学教科书都作 uncertainty relations, 只有本书与上述 Bohm 的书作 indeterminacy relations。这些词在中文中的译法有一个演变过程。上世纪 60–70 年代, 都把它们译为“测不准”, 例如 1975 年科学出版社出版的《英汉物理学词汇》, 就将 uncertainty principle 与 indeterminate principle 不加区别都译为“测不准原理”。但是 1988 年全国自然科学名词审定委员会公布的《物理学名词》(基础物理学部分) (科学出版社) 中, 则 uncertainty principle (relation) 可译为“不确定原理(关系)”, 也可译为“测不准原理(关系)”。而 2002 年赵凯华先生主编的《英汉物理学词汇》(北京大学出版社) 中, 则将 un-certainty 与 indeterminate 二者都译为“不确定”。1987 年出版的《中国大百科全书·物理学卷》中, uncertainty relation 译为“测不准关系”; 而 2009 年出版的《中国大百科全书·物理学》第二版, 则主译为“不确定度关系”, 也译为“测不准关系”。本书中, 凡是 uncertain 都译为“不确定”, indeterminacy 译为“测不准”(并非强调其操作意义)。即依照上述规定。——译者注

第三章 测不准关系

为了回答上述问题①, 海森伯①引用狄拉克-约尔丹变换理论如下。对于位置坐标 q 的一个高斯分布, 态函数或海森伯所称的“几率振幅”由下式给出:

$$\psi(q) = \text{常数} \cdot \exp \left[\frac{-q^2}{2(\delta q)^2} \right]$$

【解读】

这段内容非常精彩, 它带我们回到了历史现场, 看看海森伯最初思考的是什么, 并且深入探讨了一个看似微小却至关重要的问题——“词语的选择”。

首先, 作者告诉我们, 海森伯当年面临着两个环环相扣的问题:

1. **理论层面**: 我们刚刚建立的量子力学“数学引擎”(形式体系), 是不是本身就“规定”了我们不可能同时精确知道一个粒子的位置和速度?
2. **现实层面**: 如果理论上确实存在这种“不精确性”, 那么它和我们在实验室里用最精密的仪器能达到的测量极限是否一致?

这展现了物理学家的严谨思维: 一个理论不仅要自治, 还要能和实验结果对得上。

接下来，文章进入了最核心、也最有趣的部分：辨析词义。你可能会觉得奇怪，为什么要在几个词上这么较真？因为在量子力学的世界里，不同的词背后，代表着对“现实”本质完全不同的哲学观点。

我们来拆解一下这三个词：

- **不确定 (Uncertainty)**：这个词强调的是“我们不知道”。它是一种**主观**的知识缺失。想象一个经典的场景：一个盒子里装着一只猫，在我们打开盒子之前，我们对猫的死活是“不确定”的。但这个观点会假设，猫在盒子里的状态其实是确定的（要么死，要么活），只是我们作为观察者信息不足而已。
- **无定值 (Indeterminateness)**：这个词的观点要激进得多。它强调的是“它就没有确定值”。这是一种**客观**的属性缺失。回到薛定谔的猫，这个观点认为，在打开盒子之前，这只猫就**真的**处于一种“既死又活”的叠加状态。它的状态不是我们不知道，而是它本身就是“无定值”的，直到我们观测的那一刻，它才随机地“选择”一个确定的状态。
- **测不准 (Indeterminacy)**：这是一个比较中性的词。它仅仅描述了“我们无法同时精确测量”这个现象，但没有深入探讨这个现象背后的原因——究竟是因为我们无知（Uncertainty），还是因为世界本就如此模糊（Indeterminateness）。

作者特别指出，海森伯自己最初更常用的是“不精确”(Ungenauigkeit)，而我们今天熟知的“不确定”(Uncertainty)反倒用得很少，这暗示了他最初的思考可能更偏向于测量过程中的实际限制。而译者的长篇注释，更是清晰地展示了国内物理学界几十年来对这些术语翻译的演变，这种演变本身就反映了我们对量子力学理解的深化。

最后，文章开始引入数学了。这个高斯分布的公式 $\psi(q)$ ，就是我们常说的“波函数”或“几率振幅”。你可以把它想象成一个描述粒子位置可能性的“概率云”。这个函数的形状是个钟形曲线（正态分布），曲线越“胖”(δq 越大)，说明粒子的位置越分散，我们对它在哪儿就越“不确定”；曲线越“瘦”(δq 越小)，说明粒子的位置越集中，我们对它的位置就了解得越精确。这正是用数学语言来描述“不确定性”的第一步，也是接下来推导不确定性关系的起点。好的，老师这就带你进入量子世界的奇妙旅程。我们将一起逐段剖析这篇关于量子力学核心思想的文档。这部分内容可能会有些烧脑，因为它挑战了我们日常生活中形成的直觉，但这正是物理学的魅力所在。准备好了吗？我们开始吧。

【原文】

其中 δq 是高斯凸包的半宽度，根据玻恩的几率诠释，它表示一个距离的范围。粒子几乎肯定处于此范围中，因而表示位置的测不准量 ($\delta q = \sqrt{2}\Delta q$, Δq 为标准偏差)。按照变换理论，动量分布应为 $|\varphi(p)|^2$ ，其中 $\varphi(p)$ 通过傅立叶变换得出：

$$\varphi(p) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[\frac{-2\pi i p q}{h}\right] \psi(q) dq$$

或

$$\varphi(p) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{q}{\delta q} + \frac{2\pi i p \delta q}{h} \right)^2 \right] dq \cdot \exp \left[-\frac{2\pi^2 p^2 (\delta q)^2}{h^2} \right]$$

令

$$\frac{q}{\delta q} + \frac{2\pi i p \delta q}{h} = y$$

并积分，海森伯得到

$$\varphi(p) = \text{常数} \cdot \exp \left[-\frac{2\pi^2 p^2 (\delta q)^2}{h^2} \right]$$

它表明动量的测不准量为

$$\delta p = \frac{h}{2\pi \delta q}$$

因此

- ⑨ 见 5]页注①文献(p. 175)。

90

量子力学的哲学

$$\delta q \delta p \approx \frac{h}{2\pi}$$

或

$$\Delta q \Delta p \approx \frac{h}{4\pi} \quad (1)$$

【解读】

同学们，我们眼前这段文字，虽然充满了复杂的数学公式，但它讲述的是量子力学中最著名、也最深刻的原理之一——海森伯测不准原理的数学推导。别被这些积分和指数吓到，我们来一步步拆解它的核心思想。

首先，想象一个微观粒子，比如电子。在经典物理中，我们认为它在任何时刻都有一个确定的位置和动量，就像一个台球。但在量子世界里，粒子的状态是用一个叫做“波函数”（这里用 $\psi(q)$ 表示）的东西来描述的。这个波函数本身不是物理实体，它的绝对值平方 $|\psi(q)|^2$ 才告诉我们，在位置 q 附近找到这个粒子的“概率”有多大。

原文提到的“高斯凸包”(更通俗的叫法是“高斯波包”)是一种最简单的波函数形态。你可以把它想象成一串水波中的一个孤立的波峰,这个波峰有一定的宽度,我们用 δq 来表示。根据玻恩的诠释,这个宽度 δq 就代表了粒子位置的不确定性——粒子大概率就在这个宽度范围内,但具体在哪儿,我们无法百分之百确定。

接下来是关键一步:“傅立叶变换”。这个听起来很高级的数学工具,其实有一个非常直观的物理意义。想象一下你听到一段复杂的音乐,傅立叶变换就像一个神奇的“棱镜”,能把这段混合的声音(相当于位置波函数 $\psi(q)$)分解成构成它的所有单一频率的纯音(相当于动量波函数 $\varphi(p)$)。在量子力学里,位置和动量就是这样一对“音乐和频谱”的关系。一个在空间上分布很窄的波包(位置很确定, δq 很小),就像一声短促、尖锐的“嘀”声,为了发出这样短促的声音,你需要混合大量不同频率的声波。反之,一个很纯粹的音符(动量很确定, δp 很小),比如长笛吹出的悠长声音,它的声波必须在时间(对应这里的空间)上延伸很长。

海森伯所做的,就是对这个代表位置不确定性的高斯波包进行傅立叶变换。经过一系列积分运算(我们可以暂时忽略细节),他得到了动量的波函数 $\varphi(p)$ 。他发现,这个动量的波函数也是一个高斯波包!它的宽度 δp (动量的不确定性)和原来位置的宽度 δq 之间有一个奇妙的反比关系: $\delta p = \frac{h}{2\pi\delta q}$ 。

把 δq 乘过去,我们就得到了最终的、震撼人心的结论: $\delta q\delta p \approx \frac{h}{2\pi}$ 。这里的 h 是普朗克常数,一个极小的数字。这个公式告诉我们: **一个粒子的位置不确定性与动量不确定性的乘积,永远不会小于一个由普朗克常数决定的最小值。** 你把粒子的位置测量得越精确(δq 越小),它的动量就变得越不确定(δp 越大),反之亦然。这并非我们测量技术不好,而是微观粒子内禀的、不可消除的性质。就像你无法同时拍出一张既清晰对焦在近处小草、又清晰对焦在远处高山的照片一样,在量子世界,位置和动量这对“焦距”无法同时被完美对准。最后的公式 $\Delta q\Delta p \approx \frac{h}{4\pi}$ 只是用了统计学上更严格的标准差(Δq)来表示,其物理意义是完全相同的。

【原文】

为了回答上述问题 2, 海森伯问道, 对测量过程本身的仔细考察, 是否并不导致违犯关系式(1)所施加的限制的结果; 为此, 海森伯分析了后来的所谓的“ γ 射线显微镜实验”。他在这里的出发点是操作论的观点: 一个科学概念是经过精炼后的一套操作规则, 它的意义归根结底是观察者的各种感觉印象之间的一种确定的关系。因为他说, 要理解一个粒子例如一个电子的“地点”或“位置”这个概念的意义, 就必须提出一个决定“位置”的确定的实验; 否则这个概念就没有意义。例如, 我们可以对电子进行照明并在显微镜下观察它。因为根据关于分辨率的光学定律, 辐射(照明)的波长越短则精密度越高, 因此 γ 射线显微镜可以得到确定位置的最高的精密度。但是, 这一测量程序中涉及康普顿效应。“在位置被测定的那一瞬间 [*im Augenblick der Ortsbestimmung*], 即当量子正被电子偏转时, 电子的动量发生一个不连续的 [*unstetig*] 变化。光的波长越短, 即位置测定得越精确, 电子动量的变化就越大。因此, 在确知电子位置的瞬间 [*in dem Augenblick, in dem der Ort des Elektrons bekannt ist*], 关于它的动量我们就只能知道到相应于其不连续变化的大小的程度。于是, 位置测定得越准确, 动量的测定就越不准确, 反之亦然”。 [*also je genauer der Ort bestimmt*

第三章 测不准关系

ist, desto ungenauer wird der Impuls bekannt und umgekehrt]

【解读】

刚刚我们从纯数学的角度看到了测不准原理的诞生。现在，海森伯要用一个更直观的“思想实验”来告诉我们，这个奇怪的原理在真实的物理世界中是如何体现的。这段文字的核心，就是著名的“伽马射线显微镜实验”。

在深入实验之前，我们先来理解一个重要的哲学思想——“操作论”。这个观点听起来很玄，但其实很简单：**一个物理概念的意义，取决于我们如何去测量它。**海森伯认为，空谈一个电子的“位置”是没有意义的，除非我们能设计一个实际可行的实验去测量它。这在当时是一个革命性的想法。它把物理学从纯粹的抽象思辨，拉回到了“可观测、可测量”的坚实地面上。就像你说“我的书桌有多长”，这个概念只有在你用尺子去量了之后才具有明确的物理意义。

好，现在我们来“测量”一个电子的位置。最直接的办法是什么？就是“看”它。怎么看？用光去照它，然后用显微镜接收反射回来的光。这和我们用眼睛看东西的原理是一样的。我们在高中物理学过，显微镜的分辨率，也就是能看清多小细节的能力，取决于用来照明的光的波长。波长越短，分辨率越高，看得越清楚。为了尽可能精确地测定电子的位置，海森伯选择了一种波长极短的光——伽马射线（ γ 射线）。

到这里，一切似乎都很完美。我们用伽马射线，造一台超级显微镜，不就能把电子的位置测得无限精确了吗？问题来了。我们在高二学过“康普顿效应”，它证明了光子不仅有能量，还有动量。当一个高能量的伽马射线光子撞击到电子上时（这是我们“看到”电子的唯一方式），它就不再像一束温柔的灯光，而更像一个高速飞来的台球！这次撞击，虽然让我们通过反弹的光子知道了电子“在那一瞬间”的位置，但也像打台球一样，猛烈地改变了电子原有的动量。

这就是矛盾的关键所在：

1. **为了精确测量位置**，你需要用波长很短的光子（比如伽马射线），这意味着这个光子的能量和动量都非常大。
2. **一个高动量的光子撞击电子**，会给电子的动量带来一个巨大的、且无法精确预测的改变。

海森伯的结论是颠覆性的：**测量的行为本身，不可避免地干扰了被测量的对象。**当你用极短波长的光子把电子的位置看得清清楚楚的那一刻（*im Augenblick der Ortsbestimmung*），这个光子已经把电子“撞飞”了，你对它原来的动量就彻底失去了控制。原文中反复强调的德语短语“in dem Augenblick”（在那一瞬间）正是在凸显这种测量与干扰的“同时性”。因此，位置测得越准，动量就变得越不准，反之亦然。这不再是数学游戏，而是任何测量行为都无法逾越的物理限制。

【原文】

海森伯还通过对确定原子磁矩的斯特恩-格拉赫 [Stern-Gerlach] 实验的分析证明，原子穿过偏转场所的时间 Δt 越长，能量测量中的不确定性 ΔE 就越小。若我们要测量某几个定态的能量，那么因为偏转力的

位能 E 在原子束的宽度 d 内的变化不充分大予这些定态的能量差 ΔE , 所以偏转力之最大值为 $\Delta E/d$, 于是动量为 p 的原子束的角偏转 φ 由 $\Delta E \Delta t / pd$ 给出。但是, 因为 φ 至少必须等于决定原子束宽度 d 的狭缝所引起的自然衍射角 λ/d , 其中按照德布罗意关系 $\lambda = h/p$, 于是海森伯得到结论:

$$\lambda/d = h/pd \approx \Delta E \Delta t / pd$$

或

$$\Delta E \Delta t \approx h. \quad (2)$$

海森伯说, “这个方程表明, 能量的准确测定如何只靠相应的对时间的测不准量才能得到”。

我们从以上对海森伯的论据的几乎逐字照抄的介绍中可以看到, 他的论点是把这些测不准量解释为属于单个粒子 (样品) 的, 而不是作为测量一个粒子系综各成员的位置或动量时所得结果的一个统计散布。而且, 海森伯把事情归因于康普顿效应引起的动量的不连续变化, 这并未对他的论证提供充分的论证。因为, 正如玻尔在阅读海森伯的论文的草稿时指出的, 必须考虑显微镜的有限孔径。的确, 在论文的附记中海森伯接受了玻尔的批评, 他写道,

① 见 51 页批注 ⑪ 文献 (p. 175).

98

量子力学的哲学

玻尔使他注意到他忽略了“本质之点”, 例如显微镜下“光束的必要的发散”, “因为只是由于这种发散, 在观察电子位置时, 才会只以一定的不确定性得知康普顿反冲电子的方向, 这种不确定性直接导致关系式 (1)”。

【解读】

在用伽马射线显微镜论证了位置和动量的测不准关系后, 海森伯更进一步, 将这个思想推广到了另一对物理量: 能量和时间。他借助了另一个著名的实验——斯特恩-格拉赫实验来进行分析。

这个实验简单来说, 就是让一束原子穿过一个不均匀的磁场。原子的不同能量状态 (定态) 会导致它们在磁场中受到的力不同, 从而发生不同角度的偏转, 最终打在屏幕的不同位置上, 就像光通过棱镜被色散一样。海森伯的分析逻辑是这样的: 要想把两个能量差很小 (ΔE 很小) 的能级分离开, 原子束的偏转角就必须足够大。为了获得足够大的偏转角, 原子需要在磁场中飞行足够长的时间 (Δt 很大)。也就是说, **要精确地测量能量 (ΔE 足够小), 就必须牺牲对时间的精确控制 (Δt 必须足够大)**。这个过程的推导中, 海森伯巧妙地结合了德布罗意波的概念——任何运动的粒子都具有波动性, 原子束穿过狭缝时会像水波一样发生衍射。正是这个由波动性决定的最小衍射角, 限制了我们区分不同能量状态的能力。最终, 他得出了能量-时间测不准关系: $\Delta E \Delta t \approx h$ 。这个关系同样深刻: 一个系统能量的确定

性，与其维持该状态的时间长短成反比。例如，一个寿命极短的不稳定粒子，它的能量就是非常不确定的。

接下来，文章指出了一个非常关键的观点，这也是量子力学与经典统计物理的根本区别。海森伯认为，这种“测不准”是**属于单个粒子的内禀属性**，而不是我们对一大群粒子进行测量时出现的统计误差。在经典世界里，如果你测量一班同学的身高，会得到一个平均值和一个分布范围，这是因为每个同学的身高本来就不同。但海森伯说，即使是对于一个孤零零的电子，它的位置和动量本身就是“模糊”的，是同时存在于一个不确定的范围之内。这种不确定性是根本性的，是写在物理规律底层的。

然而，即便是海森伯这样的天才，最初的论证也并非完美无瑕。文章后半段提到了他的导师，另一位量子巨匠——尼尔斯·玻尔的修正。玻尔读了海森伯的草稿后，敏锐地指出，海森伯在伽马射线显微镜的分析中，只强调了光的“粒子性”（康普顿效应的碰撞），却忽略了一个“本质之点”——光的“波动性”，以及任何真实显微镜都存在的“有限孔径”。换句话说，海森伯把测量的不确定性完全归咎于测量动作对电子的“笨拙撞击”，而玻尔则提醒他，问题比这更深刻。我们接下来看玻尔是如何完善这个思想实验的。这正是科学进步的典型方式：通过不断的批判、讨论和修正，使理论变得更加严谨和深刻。

【原文】

事实上，对 γ 射线显微镜实验的圆满的分析，应当从阿贝 [Abbe] 光学衍射理论的下述定理出发：显微镜的分辨本领的表示式为 $\lambda/2\epsilon$ （在空气中），其中 λ 为所用的光的波长， 2ϵ 为透镜的直径在物点所张的角。因此任何位置测量都含有平面上的 x 方向上的一个不确定量

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\epsilon} \quad (3)$$

【解读】

这段文字虽然简短，但它精确地指出了玻尔对海森伯思想实验的关键补充，使整个论证变得无懈可击。我们来仔细看看这个补充的精妙之处。

海森伯最初的解释，听起来像是测量过程的一种“技术缺陷”——我们想看清电子，就必须用高能光子去“撞”它，这一撞就把它撞飞了，导致动量不确定。这个解释虽然直观，但似乎留下了一个希望：如果我们能发明一种更“温柔”的测量方式，是不是就能同时精确测量位置和动量了呢？

玻尔的切入点则彻底粉碎了这种幻想。他引入了我们高中光学就学过的基本原理——**衍射**，以及衡量显微镜性能的“阿贝衍射极限”。任何光学仪器，比如显微镜，它的物镜（就是靠近观察物体的那个镜头）大小都是有限的。光波在通过这个有限大小的孔径（镜头）时，必然会发生衍射现象，就像水波通过一个窄缝会散开一样。

这个衍射效应，为显微镜的分辨率设置了一个不可逾越的理论上限。阿贝的理论告诉我们，一台显微镜能分辨的最小细节，也就是它测量位置的精确度（这里用 Δx 表示），正比于所用光的波长 λ ，反比于物镜的孔径角 2ϵ （你可以把它理解为镜头的“收光能力”或“张角大小”）。公式 $\Delta x = \frac{\lambda}{2\epsilon}$ 就是这个物理规

律的数学表达。这意味着，即使我们拥有最完美的技术，位置的测量也天然存在一个由光的波动性决定的不确定度 Δx 。

那么，这和动量的不确定性有什么关系呢？关系就在于那个孔径角 2ϵ 。想象一下，一个光子撞击电子后，反弹进入显微镜的物镜。因为它进入了物镜，我们才能“看到”电子。但是，我们并不知道这个光子是从物镜的哪个角度飞进来的。它可能从镜头的左边缘飞入，也可能从右边缘飞入，或者中间任何一个位置。这个光子入射方向的“角度不确定范围”，恰恰就是这个孔径角 2ϵ ！

根据动量守恒定律，我们可以通过测量反弹光子的动量来推算电子受到的动量冲击。但是，由于我们对光子反弹后的方向有了一个 2ϵ 的不确定性，这就直接导致了我们对电子反冲动量的计算也出现了一个无法消除的不确定性 Δp 。

现在，整个图像就完整了：

1. 位置的不确定性 Δx ：由光的波动性（波长 λ ）和仪器（孔径角 ϵ ）共同决定。

2. 动量的不确定性 Δp ：同样由光的波动性（衍射）和仪器（孔径角 ϵ ）决定。

你会发现，孔径角 ϵ 在两个不确定性中扮演了相反的角色。如果你想让位置测得更准（减小 Δx ），根据公式 $\Delta x = \frac{\lambda}{2\epsilon}$ ，你需要一个更大的孔径角 ϵ （用一个更大的镜头）。但一个更大的镜头，意味着光子反弹方向的不确定范围更大，从而导致动量的不确定性 Δp 也更大！

玻尔的分析比海森伯的更深刻，因为它指出，测不准原理的根源，并不仅仅是测量对客体的“干扰”，而是光的波粒二象性（以及所有物质的波粒二象性）与**任何测量仪器都无法避免的物理限制（如有限孔径）**相互作用的必然结果。不确定性不是一个可以被改进的技术问题，而是深植于我们用来观察世界的工具（光波）和世界本身（粒子的波动性）的基本属性之中。好的，作为您的学术导师，我将开始为您详细解读这份关于量子力学不确定性原理的文档。我们将一起深入探讨物理学家们是如何通过思想实验推导出这个惊人结论的，以及围绕着这个结论，物理学史上两位最伟大的头脑——海森伯和玻尔——之间发生的深刻哲学思辨。

【原文】

65 若一个波长为 λ 从而动量为 h/λ 的光子沿 x 轴射到一个电子处，电子在 x 方向的动量分量为 p_x ，则在碰撞前之总动量为 $\pi = (h/\lambda) + p_{x0}$ 。对于用显微镜能观察到的电子，光子必须被散射到角度 2ϵ 之内，即 PA 与 PB（极端向前散射与极端向后散射，见图 1）之间的某个方向，其波长由于康普顿效应相应地在 λ' 与 λ'' 之间。因此，被散射的光量的动量 x 分量处于 $-h \sin \epsilon / \lambda'$ 与 $+h \sin \epsilon / \lambda''$ 之间。如果用 p'_x 和 p''_x 。相应表示式在这两种极端的散射情况下电子动量的 x 分量，那么动量守恒就要求

第三章 测不准关系

$$p'_x - \frac{h}{\lambda'} \sin \epsilon = p''_x + \frac{h}{\lambda} \sin \epsilon$$

或

$$p'_x - p''_x = \Delta p_x = \frac{2h \sin \epsilon}{\lambda} \quad (4)$$

其中用 λ 代替了 λ' 和 λ'' , 因为我们只对数量级感兴趣。由于无法——这是整个事情的关键——精密判明光量子究竟是被散射到角 2ϵ 内的哪个方向, 碰撞后电子动量的 x 分量的不确定性不能更小了, 这个 Δp_x 。和 Δx 一起, 使得不能对碰撞后 (换句话说测量之后) 的粒子轨道作任何准确的确定或预言。显然, $\Delta x \Delta p \sim h$ 。

【解读】

同学们, 大家好! 我们眼前这段文字, 是物理学史上一个里程碑式的思想实验——“海森伯显微镜”的精髓。别被公式吓到, 它的核心思想非常巧妙, 而且跟我们生活中的经验息息相关。

想象一下, 你想知道一个在漆黑房间里快速移动的、极其微小的尘埃的位置。你唯一的办法是什么? 没错, 用一束光去照亮它! 当你用手电筒照过去, 光子撞击到尘埃上, 然后反射到你的眼睛里, 你就“看到了尘埃”。但这里有个问题: 光子本身是携带着能量和动量的。当它撞上那个微小的尘埃时, 不可避免地会把它撞飞, 改变它原来的运动状态。你看清它的那一刻, 它的速度和方向就已经变了。

海森伯的这个思想实验就是把这个逻辑推向了极致。他想“看”到一个电子。要看得清楚, 也就是让位置的不确定性 Δx 尽可能小, 我们就需要用分辨率高的显微镜。根据光学的知识, 这意味着我们需要用波长 λ 很短的光, 比如 γ 射线。但是, 根据德布罗意的关系式 $p = h/\lambda$, 波长越短, 光子的动量就越大。一个高动量的光子撞击到电子上, 就像一颗高速飞行的子弹撞上了一颗乒乓球, 会给电子一个巨大的“动量猛击”。

更要命的是, 我们无法精确知道这个光子撞击后会飞向哪里。它可能被电子撞得稍微偏一点, 也可能被反弹回来。原文中的“极端向前散射”和“极端向后散射”指的就是这两种极限情况。由于光子散射方向的不确定, 根据动量守恒定律, 电子在碰撞后获得的动量也有一个不确定范围, 这就是原文中的 Δp_x 。

最终的结论是: 你用来测量位置的光, 波长越短 (看得越清楚, Δx 越小), 其动量就越大, 对电子动量的干扰就越剧烈 (Δp_x 越大)。反之, 如果你用波长很长的光去测量, 对动量的干扰会变小, 但由于分辨率太差, 你又无法确定它的位置了。这就是著名的“测不准关系”或“不确定性原理”: $\Delta x \Delta p \sim h$ 。它的核心在于, 在微观世界里, 测量行为本身就是一种无法忽略的干扰, 它深刻地改变了被测量的对象。我们永远无法同时精确地知道一个粒子的位置和动量。

【原文】

虽然玻尔接受海森伯的论文的结论, 但他并不同意这篇文章的推理的总倾向。事实上, 他甚至试图劝阻

海森伯不要发表这篇论文, 至少不以它本来的形式发表。争论是相当尖锐而且“很不愉快的”。海森伯说: “我记得这场争论以我进出眼泪而告终, 因为我受不了玻尔的这种压力”^①。争论之点并不是关于结论, 即并不是关于测不准关系的有效性, 而是关于建立测不准关系的概念基础。

海森伯把测不准性看作是对经典概念 (例如位置或动量) 在微观物理学现象上的适用性的限制。对测不准性的这种看法同玻尔的观点是不一致的, 照玻尔看来, 测不准性并不标志着粒子物理学的语言或者波动物理学的语言的不适用, 而是标志着不能同时使 66 两种表达方式, 尽管只有它们二者兼用才能对物理现象提供充

^① 1963 年 2 月 25 日对海森伯的访问, *Archive for the History of Quantum Physics*,

94

量子力学的哲学

分的描述。对海森伯来说, 或者用粒子物理学的术语, 或者用波动物理学的术语表述, 测不准性的原因都是不连续性; 而对玻尔来说, 这个原因则是波粒二象性。“那才是整个事情的核心”, 玻尔坚持说, “为了理解整个事情, 我们必须从那个侧面出发”。而海森伯对此却反驳道: “啊, 我们已经有了一个贯彻一致的数学方案, 这个贯彻一致的数学方案已把能观察到的一切告诉了我们。在自然界中没有什么东西是这个数学方案所能描述的”。

【解读】

刚刚我们理解了测不准关系是怎么来的, 但一个科学理论的诞生, 远不止公式推导那么简单。接下来的这段文字, 为我们揭示了一场发生在物理学圣地哥本哈根的“世纪之战”——导师玻尔与天才学生海森伯之间的思想碰撞。

你们要记住, 他们争论的焦点**不是**“ $\Delta x \Delta p \sim h$ ”这个公式对不对, 他们都承认这个结论是正确的。他们争论的是一个更深层次的哲学问题: **这个“测不准”到底意味着什么? 它的根源是什么?**

我们可以把他们的观点想象成两种不同的解释:

海森伯的观点——“经典概念的局限性”: 海森伯像一个工程师, 他认为, 我们熟悉的“位置”、“动量”这些词, 都是从宏观世界 (比如扔一个篮球) 里总结出来的经典概念。当我们试图把这些“老工具”用到微观的量子世界时, 发现它们“失灵”了, 不再那么好用。测不准关系就像一个警告牌, 上面写着: “注意! 经典概念在此适用范围受限!” 他认为, 量子世界里充满了“不连续性” (比如电子能级的跃迁), 正是这种“跳跃”的特性, 导致了我们无法用连续、经典的图像去精确描述它。他更相信他建立起来的那套完美的数学体系 (矩阵力学), 认为数学已经告诉了我们一切, 我们不必过分纠结于用日常语言去描绘一个本就无法描绘的微观图像。

玻尔的观点——“波粒二象性的体现”: 而玻尔, 更像一位哲学家。他认为问题的核心不是经典概念“失灵”, 而是微观粒子本身就具有一种内在的、矛盾的统一, 这就是“波粒二象性”。电子既像一个点状的“粒

子”，又像一片弥散的“波”。“位置”是典型的粒子属性，“动量”（通过波长来体现）则是典型的波动属性。玻尔认为，测不准关系恰恰说明了，你不可能在同一时间、同一个实验中，同时看到电子“粒子”和“波”这两张完全不同的面孔。当你精确测量它的位置时，你强迫它展现出“粒子”的一面，那它“波”的一面（动量）就变得模糊不清；反之亦然。所以，对玻尔来说，测不准的根源是**波粒二象性**这个更基本、更核心的物理实在。

这场“很不愉快”的争论，**甚至让年轻的海森伯流下眼泪**，可见其激烈程度。这不仅是科学观点的分歧，更是两种思维方式、两种哲学思想的碰撞。

【原文】

但是，这样的论据并不能引起玻尔的共鸣，对于玻尔来说，“数学明确性本身根本没有什么价值”，并且“完备的物理解释应当绝对地高于数学形式体系”^①。玻尔说，数学并不能证明任何物理真理，它只能表明一个形式体系的逻辑一致性以及它适用于表示物理数据之间的关系的的能力。

但是，数学形式体系在量子理论中的作用还并不是他们的主要分歧。争论的焦点可以用下面的说明来澄清。当读者已注意到，在从分析海森伯的思想实验导出测不准关系的推导过程中，利用了爱因斯坦-德布罗意关系式 $\lambda = h/p$ 或 $\nu = E/h$ 。这些关系式显然把波动属性同粒子属性联系起来，因而表示了波粒二象性。事实上，每一种从分析思想实验出发导出海森伯关系的推导方法，都必须在某个地方用到爱因斯坦-德布罗意方程，因为要不然整个推理就停留在经典范围内，于是就得出测不准关系。

^① W. Heisenberg, "Quantum theory and its interpretation", 载于文集 *Niels Bohr--His Life and Work as seen by his Friends and Colleagues*, S. Rozental, ed. (Noth-Holland; Amsterdam; Wiley, New York, 1967), p. 98.

【解读】

这段文字进一步深化了玻尔与海森伯的分歧，并为玻尔的观点提供了强有力的论证。我们来仔细剖析一下。

首先，这里提到了一个非常重要的科学哲学观念。玻尔认为，**“完备的物理解释应当绝对地高于数学形式体系”**。这句话是什么意思呢？在高三的你们，已经接触了大量的物理公式。但玻尔提醒我们，**数学只是描述物理现实的语言和工具，它本身不是物理现实**。一个数学上完美无瑕、逻辑自治的理论，如果不具备清晰的、能够与实验现象相联系的物理解释，那它就是空中楼阁。这就好比，你可以用最华丽的辞藻写一篇语法完全正确的文章，但如果内容空洞，不知所云，那这篇文章就没有价值。对玻尔而言，物理学的灵魂在于理解“为什么”，而不仅仅是“如何计算”。

接下来，文章指出了“铁证”来支持玻尔的观点。回头看我们之前分析的“海森伯显微镜”实验，或者任何一个试图推导测不准关系的思考过程，你会发现，我们都绕不开一个关键的桥梁：**爱因斯坦-德布罗意关系式**，也就是 $p = h/\lambda$ 。

让我们来想想这个公式的深刻含义。公式的左边， p （动量），是我们描述一个“粒子”（比如台球）时最常用的物理量之一。而公式的右边， λ （波长），则是描述“波”（比如水波、光波）的核心特征。这个看似简

单的公式，实际上是连接“粒子世界”和“波动世界”的“跨界”方程，它本身就是“波粒二象性”最精炼的数学表达。

玻尔的论点就在于此：你看，海森伯，在你的思想实验里，你不知不觉地就已经把“波粒二象性”作为你的基本前提！你用光子（粒子概念）去撞击电子（粒子概念），但你又必须用光的波长（波动概念）和德布罗意关系式来计算动量。如果你不引入这个“波”的概念，你的整个推导就只能停留在经典力学的框架里，就像计算两个台球的碰撞一样，你永远也得不到“测不准”这个量子效应。因此，玻尔认为，波粒二象性不是一个可有可无的哲学装饰，而是整个量子理论的逻辑基石。

【原文】

第三章 测不准关系

为了再一次具体说明这一点，我们来回顾另一个著名的思想实验。设想一个“粒子”，原来在 y 方向运动，穿过一个宽度为 Δx 的狭缝，因此其位置在 x 方向的不确定度为 Δx (图 2)。

 Image of a slit experiment with Δx and a

图 2

到此为止只用到了经典粒子力学的术语；但是，只要一提到在狭缝后面发生的“干涉”，就得摆脱这个限制。从波动光学得知，干涉图样的第一极小值所在的角度 α 由 $\sin \alpha = \lambda/2\Delta x$ 给出，其中 λ 为所用的波长。因为 $\sin \alpha \approx \Delta p/p$ 及 $\lambda = h/p$ ，这里又明显应用了爱因斯坦-德布罗意方程，于是就得出海森伯公式 $\Delta x \Delta p \approx h$ 。

在海森伯关系的推导中必不可少地要用到爱因斯坦-德布罗意方程，这在玻尔看来正表明整个理论的终极基础乃是波粒二象性，或更一般地说，乃是对物理现象的两种互不相容的描述的必要性。反之，认定测不准关系是数学形式体系的逻辑推论的海森伯，却并不以为波粒二象性是理论的必要前提。海森伯确信数学方案完全能够预言每一个实验，因此他觉得，是用词语“波动”还是“粒子”来描述实际发生的事情，那是无关紧要的。实际上，如他后来承认的，不久后发表的约尔丹克莱因以及约尔丹维格纳的论文^①使他“非常高兴”，这些作者证明，对一个 n 粒子系统的通常的

【解读】

为了让玻尔的观点更加深入人心，作者在这里举了一个你们非常熟悉的例子——单缝衍射。这个例子极其巧妙，因为它完美地展现了粒子性和波动性是如何在同一个现象中“纠缠”在一起，并最终导致不确定性的。

让我们一步步来看这个思想实验：

1. **粒子性登场**：我们发射一个电子，它像一个经典的小球一样，朝着一个带有狭缝的挡板飞去。当它穿过狭缝的那一瞬间，我们能确定它在水平（ x 方向）的位置吗？不能完全确定，但我们知道，它

肯定在狭缝内部。所以，这个狭缝的宽度 Δx 就成了我们对电子位置测量的不确定度。到这里为止，一切都还是“粒子”的语言。

2. **波动性接管**：如果电子真的只是个小球，它穿过狭缝后应该会继续直线前进，在后面的屏幕上打出一个和狭缝一样宽的亮条。但实验告诉我们，根本不是这样！电子会像水波穿过堤坝缺口一样，发生衍射，在屏幕上形成明暗相间的条纹。这就是典型的**波动**行为。光凭“粒子”这个词，是无论如何也解释不了衍射现象的。
3. **“跨界”计算**：如何定量描述这个衍射呢？我们需要借用波动光学的公式，比如衍射条纹的张角 α 和波长 λ 、缝宽 Δx 之间的关系。然后，最关键的一步来了：我们再次使用德布罗意关系式 $\lambda = h/p$ ，将描述“波”的 λ 替换为描述“粒子”的 p 。通过一系列代换，我们最终神奇地又一次得到了海森伯的公式 $\Delta x \Delta p \approx h$ 。

这个例子雄辩地证明了玻尔的观点：你看，要推导出测不准关系，你必须先用“粒子”的概念来定义位置的不确定度（穿过狭缝），然后再用“波”的概念来解释它动量的不确定性（发生衍射），最后用连接两者的德布罗意关系式把它们串起来。整个过程缺一不可。这清晰地表明，不确定性原理的根源，正是深植于微观粒子骨子里的**波粒二象性**。

而海森伯的回应则代表了另一种现代物理学的思想：他觉得，既然我们的数学工具箱（量子力学形式体系）已经能完美预测所有实验结果了，那我们又何必为这些“词语游戏”（到底是叫它“波”还是“粒子”）而烦恼呢？对他来说，物理实在就是由数学结构所定义的，我们人类的直观语言反而可能是一种束缚。这两种思想的交锋，直到今天仍在物理学界回响。好的，导师模式启动。各位同学，今天我们要深入探讨一段关于量子力学核心思想的文本。这部分内容充满了20世纪最伟大头脑之间的思想碰撞，看似深奥，但背后却是关于“我们如何认识世界”的根本问题。请大家集中精神，跟我一起拨开迷雾，领略量子世界的奇妙与深刻。

【原文】

① P. Jordan and O. Klein, “Zum Mehrkörperproblem der Quantentheorie”, Z. Physik 45, 751–765 (1927). P. Jordan and E. Wigner, “Über das Paulische Äquivalenzverbot”, 同上, 47, 631–651(1928).

量子力学的哲学

薛定谔理论论述，与对服从费米统计的粒子的二次量子化的简写描述 (1928)，这二者之间是等价的。从而表明可以使用粒子或波动这二者之中随便哪一种语言，而这正好印证了海森伯的想法：“粒子图像和波动图像是同是一个物理实在的两个不同的侧面”。

从历史观点来看，有趣的是，当时正在哥本哈根并且“经常参加”玻尔同海森伯之间的这些讨论的克莱因，可能正是受到玻尔与海森伯之间这一争论的推动，才去研究导致莱因–约尔丹–维格纳的结果的问题的。根据约尔丹的说法②，是泡利的纠缠的交手法才防止了玻尔同海森伯之间的一场严重冲突，泡利试图使双方相信，争执只在于 *Rangordnung der Begriffe* [概念的先后次序]。海森伯的出发点是这一说

法：“经典物理学中用来描述力学系统的所有概念在原子过程中也可以相仿地加以精确定义”，③因为定义一个概念意味着规定一套测量该概念所涉及的量的操作过程。

测不准关系所带来的限制并不限制可定义性，因为正则其量中的每一个在单独考虑时原则上都可以测量到任意的精确度。而如果必须考虑这种共轭量的同时测量的话，那么，若是我们同意只按测不准关系所容许的程度来定义地点、时间、动量和能量这些量，亦即把它们的可定义性建立在它们的可测量性之上，就可以避免陷入无用的妄想。

【解读】

大家好，我们来看第一部分。这段文字信息量很大，它把我们直接带到了量子力学发展的“英雄时代”——1927年前后。这里有几个关键人物：薛定谔、海森伯、玻尔、泡利。他们都是诺贝尔奖得主，是量子大厦的奠基人。

首先，文章提到了一个核心观点：描述微观世界有两种看似完全不同的“语言”——**粒子语言**和**波动语言**。大家在高二物理应该学过光的波粒二象性，知道光既能像台球一样碰撞（粒子性），也能像水波一样衍射干涉（波动性）。德布罗意更是提出，所有物质，包括电子，都具有波粒二象性。这里的“薛定谔理论”就是用波函数来描述世界的波动语言，而“二次量子化”则是一种更高级的、处理大量相同粒子的数学工具，可以看作是粒子语言的升级版。

关键来了，文本说这两套语言是“等价的”。这是什么意思呢？打个比方，这就像著名的“鸭兔图”。你看着它，可以说“这是一只兔子”，也可以说“这是一只鸭子”。你无法同时看到鸭子和兔子，但这两个描述都是针对同一张图的有效解释。海森伯认为，微观粒子就是这样，“**粒子图像和波动图像是同一个物理实在的两个不同侧面**”。它们不是谁对谁错，而是我们观察和描述这个“实在”的两种不同角度。

接下来，文章引出了量子力学史上最著名的一场辩论：**海森伯与玻尔之争**。这场辩论的核心，用德语原文说就是 *Rangordnung der Begriffe*，即“概念的先后次序”。这听起来很哲学，其实争论的是一个非常根本的问题：一个物理概念的意义，究竟来源于什么？

海森伯的观点非常“实用主义”或者说“操作主义”。他认为，一个概念（比如“电子的位置”）要想有意义，前提是**我们必须能设计一个实验去测量它**。如果一个东西在原理上就无法测量，那去谈论它、定义它就是“无用的妄想”。所以，他主张“可测量性”优先于“可定义性”。测不准关系告诉我们，我们无法同时精确测量一个粒子的位置和动量。海森伯的结论是：既然我们测不准，那么“**一个同时具有确定位置和动量的电子**”这个概念本身就是无意义的。我们应该把我们的定义，限制在测量允许的范围之内。

这段话为我们揭示了量子力学诞生之初，物理学家们不仅是在进行数学计算，更是在进行深刻的哲学思辨。他们争论的，是如何构建一个全新的、能够描述微观世界的概念框架。

【原文】

这种把可定义性归结为可测量性的做法是玻尔所不能接受的。因为，像他后来在谈到共轭量时所说的，

“对这些量的值永远有影响的成反比的不确定性，实质上是能量和动量的变化只能定义到一有限的精确度的结果。”(是“定义”而不是“测量”！)

玻尔的出发点是基本的波粒二象性，这种二象性表现在原子过程的个体性^①中，因而引起了一个问题：具有这种二象性本性的物理客体在什么限度内可以用经典概念来描述？对可测量性的限制证实了对可定义性的限制，但前者并不是后者的逻辑前导。玻尔的立场可以得到下述论据的支持：如前所述，从理想实验导出测不准关系的任何推导方法，亦即对海森伯关于可测量性极限的表述的任何推导方法，都必须依靠爱因斯坦—德布罗意方程，而这一方程又联系了波动描述与粒子描述这两种描述方式的特征，因而隐含地预假定了波粒二象性。

在海森伯了解了玻尔的论点之后，就达成了一个折衷方案。海森伯把上述附记交给了 *Zeitschrift für Physik* 的编者，在里面宣告说，玻尔的尚未发表的研究工作将导致对本文所得结果的更深刻的看法和重要的改进。海森伯还补充说，玻尔将会详细证明，观测中的测不准量不只是来自于发生了不连续性，而且还与要同时说明在粒子理论与波动理论中所遇到的互不相容的经验的要求密切相关。海森伯以如下的结论说：“我非常感谢玻尔教授使我有机会了解并讨论他的新研究工作，这一工作不久即将写成一篇论述量子理论的概念结构短文发表。”^②

【解读】

好，我们接着看第二部分，这里深入到了玻尔的反驳，这也是理解量子力学“哥本哈根诠释”精髓的关键。

如果说海森伯像一个工程师，强调“能做什么决定了想什么”，那么玻尔则更像一位哲学家，他关心的是“世界本来是什么样的，这决定了我们能做什么”。玻尔完全不同意海森伯将“可定义性”建立在“可测量性”之上的观点。他认为，顺序应该反过来。

玻尔的出发点是更根本的波粒二象性。在他看来，微观世界的“怪异”不是源于我们测量仪器的笨拙，而是源于微观客体本身就具有内在的、不可分割的矛盾属性——它既是波，又是粒子。我们习惯的经典概念，比如“位置”(一个点的概念，粒子性很强)和“动量”(在量子力学里与波长有关，波动性很强)，是我们从宏观世界带来的“旧工具”。用这些“旧工具”去描述一个天生就具有二象性的新事物，必然会出问题。

所以，**玻尔认为，“测不准”的根源，在于我们语言和概念的“定义”局限。**原文中特意强调了“(是‘定义’而不是‘测量’！)”这一点。也就是说，不是因为我们“测”不准，所以概念才模糊；而是因为这个东西的本性（波粒二象性）决定了经典概念（如位置、动量）在它身上就无法被同时**精确地“定义”**。我们的测量限制，只是这种根本性定义限制的一个外在表现。

为了支持自己的观点，玻尔提出了一个非常有力的论据：海森伯，你推导测不准关系时用了什么？你用了爱因斯坦-德布罗意方程（比如 $p = h/\lambda$ ）。这个方程本身就是连接粒子属性（动量 p ）和波动属性（波长 λ ）的桥梁，它就是波粒二象性的数学宣言！所以，玻尔等于是在说：“海森伯，你的整个论证，从一开始就已经**预设了波粒二象性**这个更深层的事实。所以，二象性才是因，测量上的不确定性是果，你不能本末倒置。”

这段文字的结尾非常精彩，它向我们展示了科学伟人之间坦诚的学术交流。海森伯在听了导师玻尔的深刻见解后，并没有固执己见，而是在他即将发表的论文里加了一个“附记”，**公开承认玻尔的思考将带来“更深刻的看法”**。他预告了玻尔即将提出的一个更宏大的理论框架，这个框架能更好地解释为什么粒子和波动这两种“互不相容的经验”会同时出现。这不仅体现了海森伯的谦逊和对真理的追求，也为我们引出了玻尔的王牌思想——互补原理。

【原文】

这一段结束语指的是当然是玻尔关于互补性的观念，可能就是由于这段话，使得人们常说玻尔是从海森伯关系推出互补性概念的。我们在另一本书中已表明^①，这个说法是错误的，玻尔关于互补性的思想至少可以回溯到 1925 年 7 月，海森伯的工作只是促使他对他的这一思想给出一个贯彻一致的、最后的表述而已。玻尔在 1927 年 9 月发表这些观念之前的一段时期里，心中就已确实被这些观念所占据，这可能至少是他从 1925 年 7 月到 1927 年 9 月这一段量子力学突飞猛进的时期里，没有发表过一篇科学著作的原因之一。但是在这 1927 年初秋，他的互补性观念已经成熟了，并且看来已被海森伯的结果充分证实。如果说，像我们说过的样，互补原理对于玻尔是最一般的哲学沉思的结果，从而是一条对科学有着普遍的认识论意义的原理，那么海森伯关系在玻尔看来便是一个原理适用于微观物理学的一个引人注目的数学证明，也是必须应用这个原理来研究微观客体的一个证明。

【解读】

这部分是历史考证和思想溯源，非常重要，因为它澄清了一个关于科学思想发展的常见误解。

很多人以为的顺序是：海森伯先发现了“测不准原理”，然后玻尔受到启发，在此基础上提出了更具哲学性的“互补原理”。这是一种简单的“因果链”思维。但文本明确指出，**这个说法是错误的**。

事实是，**玻尔关于**互补性（Complementarity）**的思考**，早在海森伯发表测不准原理的论文之前（至少在1925年）就已经开始了。那两年（1925-1927）是量子力学发展最疯狂的时期，**矩阵力学、波动力学相继问世**，但作为领袖人物的玻尔却异常沉默，一篇论文都没发。为什么？因为他没有在计算细节，而是在进行更深层次的哲学思考，试图为整个新生的量子理论建立一个坚实的哲学根基。他一直在酝酿“互补性”这个大思想。

那么，什么是互补原理呢？简单来说，就是我们在前面提到的“鸭兔图”思想的升华。玻尔认为，要完整地描述一个量子现象，你需要用到一些**成对的、互斥**的概念或图像（比如波和粒子，或者位置和动量）。它们就像一枚硬币的两面，你不可能同时看到正面和反面，但它们共同构成了这枚硬币的全部。任何一个试图只用其中一面来描述的尝试，都是不完整的。当我们设计一个实验来精确测量粒子的“粒子性”（比如它的精确位置）时，我们就不可避免地会完全失去对它“波动性”（比如它的波长和动量）的描述。反之亦然。这两种描述是**互相排斥，但又互相补充**的。

所以，当海森伯带着他的“测不准关系”来找玻尔时，玻尔的反应可能不是“啊，一个惊人的新发现！”，而更像是“啊哈！这就是我一直在寻找的证据！”。海森伯关系，在玻尔看来，**不是互补原理的“父亲”，而是**

它的一个强有力的“数学儿子”。它用一个精确的数学公式 ($\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$)，完美地证实了玻尔酝酿已久的哲学思想——互补性在微观物理学中是不可避免的。它雄辩地证明，我们必须接受这种“互补”的思维方式，才能正确地理解微观世界。这揭示了物理学发展的一个重要侧面：有时候，一个数学公式的意义，远不止计算本身，它可能是一个深刻哲学思想的物理体现。

【原文】

海森伯在他芝加哥的讲演②中，沿用了肯纳德③对他自己的推导(见上)的改进，对测不准关系证明如下。(我们把 $\hbar/2\pi$ 缩写为 $\hbar$ ， d/dx 缩写为 φ' ，……，并假定 φ 已归一化。)

① 见 6 页注① (pp. 345–352)。又见 K. M. Meyer-Abich, *Korrespondenz, Individualität und Komplementarität* (Steiner, Wiesbaden, 1965) 及 G. Holton, “The roots of complementarity”, *Daedalus* 99, 1015–1055 (1970)。此文重印在下书中：G. Holton, *Thematic Origins of Scientific Thought* (Harvard U. P., Cambridge, Mass., 1973), pp. 115–161。

② 88 页注①文献。

③ 84 页注④文献。

第三章 测不准关系

$$\begin{aligned}\langle x \rangle &= \int \phi^* x \phi dx, \quad \langle x^2 \rangle = \int \phi^* x^2 \phi dx, \quad \langle p \rangle = -i\hbar \int \phi^* \phi' dx, \\ \langle p^2 \rangle &= -\hbar^2 \int \phi^* \phi'' dx. \quad \int \phi^* \phi' dx = -\int \phi'^* \phi dx, \\ \int x(\phi^* \phi' + \phi'^* \phi) dx &= -1\end{aligned}$$

和不等式 $|\varphi' + \alpha x \varphi|^2 \geq 0$ (其中 α 是一个任意实常数) 可得

$$\alpha^2 \langle x^2 \rangle + \frac{\langle p^2 \rangle}{\hbar^2} \geq \alpha.$$

选 $\alpha = (2\langle x^2 \rangle)^{-1}$ 并在 $(2\langle x^2 \rangle)^{-2} - \langle x \rangle^2 \dots$ 等式中假定 $\langle x \rangle = \langle p \rangle = 0$ ，海森伯得出了关系式(1)。

【解读】

好的同学们，最后一部分是纯数学推导。看到积分符号和希腊字母不要慌，我们的目标不是去解这个方程，而是去理解物理学家是如何用数学语言，把前面那些深刻的哲学思辨“钉死”成一个不可动摇的科学定律的。

我们来拆解一下这个推导的“兵法”。

1. 定义基本工具：

- ϕ (phi)：这就是大名鼎鼎的**波函数**，是薛定谔方程的解。你可以把它想象成一个“信息包”，包含了关于一个微观粒子（比如电子）所有可能的信息。它本身不是一个物理实在，但它的绝对值平方 $|\phi|^2$ 代表了在某个地方发现这个粒子的概率。
- $\langle x \rangle$ ， $\langle p \rangle$ ：这种尖括号 $\langle \rangle$ 在量子力学里表示“期望值”，也就是平均值。 $\langle x \rangle$ 就是粒子位置的平均值， $\langle p \rangle$ 是动量的平均值。为了简化计算，这里假设我们已经调整了坐标系，让位置和动量的平均值都为零。这就像我们分析一个班的身高，先把全班的平均身高作为基准点0，然后看大家相对于这个点的偏差，这样处理起来更方便。
- $\int \dots dx$ ：这是**积分**。在物理中，当波函数分布在空间时，我们要想求一个总的、平均的物理量，就需要用积分把所有可能性“加”起来。

2. 核心的数学技巧：

整个证明最巧妙的地方，在于那个看起来平平无奇的不等式： $|\phi' + \alpha x \phi|^2 \geq 0$ 。

这其实是一个非常基本的数学常识：任何数（无论是实数还是复数）的模的平方，永远是非负的。就像在实数里 $x^2 \geq 0$ 一样，这是一个绝对成立的出发点。物理学家的高明之处，就在于从这样一个不容置疑的数学公理出发。

3. 推导的逻辑链：

海森伯（这里用的是肯纳德改进后的更严谨的版本）构造了一个包含波函数 ϕ 、它的导数 ϕ' 、位置 x 和一个任意常数 α 的表达式。然后，他利用了这个“平方大于等于零”的公理。把这个不等式展开、积分，再利用量子力学中位置和动量算符的定义（比如动量 p 在数学上对应于 $-i\hbar(d/dx)$ 操作），他最终得到了一个包含 $\langle x^2 \rangle$ （位置不确定度的平方）和 $\langle p^2 \rangle$ （动量不确定度的平方）的不等式。最后，通过选择一个最巧妙的 α 值，使得这个不等式能给出的信息最强，最终就得到了海森伯不确定性关系。

这段推导告诉我们什么？

它告诉我们，**不确定性原理不是一个经验总结，也不是一个哲学猜想，它是量子力学数学框架的内在必然结果。**只要你承认世界是由波函数 ϕ 来描述的，并且遵循量子力学的基本规则（比如动量和求导的联系），那么不确定性关系就如同勾股定理在欧几里得几何中一样，是必然存在的，是无法绕开的。这为前面玻尔和海森伯的哲学讨论，提供了一个坚如磐石的数学地基。它宣告了经典物理中那种“粒子在任意时刻都具有确定的位置和动量”的旧世界图像，在数学上就已经行不通了。好的，导师。我将以一位专业的学术导师的身份，为高三学生详细解读这份关于测不准关系推导历史的文档。我将严格遵循您的指示，将复杂的物理学史和数学推导，转化为生动易懂的语言。

【原文】

特哈尔和尼科耳^①认为上述推导“不够严格”，因为 α 的选择是特殊的，并且“选择不同的值时人们所导出的 Δx 与 Δp 之间的关系将和海森伯关系完全不同”。为了严格地得出关系式(1)，他们指出，当取满足 $\alpha^2(\Delta x)^2 - \alpha + (\Delta p)^2/\hbar^2 \geq 0$ 的 $(\Delta x)^2$ 和 $(\Delta p)^2$ 的最小组合，即上式中等号成立时（亦即 $\psi' + \alpha x\psi = 0$ 时）所发生的 $(\Delta x)^2$ 和 $(\Delta p)^2$ 的组合，因为在所有其他情况下事情要更不利一些，因此 $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{4\pi}$ 普遍成立。艾米德和布拉加雷戈^②反过来批评这种推导“不完全令人满意”，他们从上面关于 α 的二次项式的判别式恒不为正出发导出(1)式，并且论证说海森

① D. ter Haar and W. M. Nicol, “Proof of the Heisenberg relations”, *Nature* 175, 1046(1955).

② F. M. Gomide and G. Braga Rego, “On Heisenberg’s proof of the uncertainty relations”, *Anais da Academia Brasileira de Ciencias* 28, 179–181(1956).

【解读】

同学们好！今天我们来当一回“科学侦探”，探寻一下物理学大厦的基石之一——海森伯测不准关系——是如何被反复打磨，最终变得坚不可摧的。你们在课本上看到的公式 $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$ 简洁而优美，但它的诞生和完善过程，却充满了科学家们严谨的思辨和激烈的争论。

这段文字就像是科学法庭上的一段辩论记录。海森伯最初的证明虽然天才，但在后来的物理学家看来，就像是一篇论据精彩但逻辑链条略有瑕疵的议论文。特哈尔和尼科耳就是两位“挑剔的读者”，他们指出，海森伯的推导依赖于一个特殊的参数 α 的选择。这有点像什么呢？好比你要证明一个关于所有三角形的定理，但你的证明过程只用了一个等边三角形作为例子。虽然结论可能碰巧是对的，但你的证明方法却不够“普遍”，缺乏严格性。他们担心，如果换一个 α 值，会不会就得出测不准关系了？

为了让证明更“铁”，他们提出了一种更聪明的思路。他们关注的是一个不等式： $\alpha^2(\Delta x)^2 - \alpha + (\Delta p)^2/\hbar^2 \geq 0$ 。这里的 $(\Delta x)^2$ 和 $(\Delta p)^2$ 分别代表位置和动量不确定度的平方。他们认为，我们应该考虑最“极限”的情况，也就是让不确定度乘积 $\Delta x \Delta p$ 达到它可能有的最小值的那个临界点。这个临界点，恰好就是上述不等式中等于零成立的时刻。他们论证说，如果连这个“最理想、最精确”的情况都必须满足 $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{4\pi}$ ，那么在其他任何“更不理想”（不确定度更大）的情况下，这个关系式就更会成立了。这是一种非常经典的数学证明思想——抓住最小值，就能约束所有值。

然而，故事还没完。艾米德和布拉加雷戈又提出了新的看法，他们觉得特哈尔等人的方法还是“不完全令人满意”。他们采取了另一种更具数学美感的策略。他们把上面那个关于 α 的表达式看作一个二次函数。物理原理保证了这个函数的值永远不可能为负。同学们，回忆一下你们的数学知识：一个开口向上的二次函数，如果它的值恒不为负，那么它的判别式 $(b^2 - 4ac)$ 必然小于或等于零。正是从这个“判别式恒不为正”的条件出发，他们直接、漂亮地推导出了测不准关系！这个过程，就像是从一个简单的数学公理出发，逻辑清晰地得出了一个深刻的物理结论，充满了理性的力量。

你看，科学的进步就是这样，一个伟大的想法诞生后，会有一代又一代的科学家像雕琢艺术品一样，不断地审视、批判、完善它，直到它成为一块坚实的理论基石。

【原文】

3.3 后来对测不准关系的推导

康敦^[1]研究了海森伯关系是否适用于任何一对非对易算符的问题，他争议说：(1)非对易性并不一定隐含着这种关系，(2)事实上，可以精确知道两个非对易算符的某些同时的值，以及(3)即使算符对易，精

确度也可可能受到限制。为了证明第一点，康敦考虑角动量分量 L 。有确定值 m_h 的氢原子波函数

$$\Psi_{alm} = R(r) \exp(im\varphi) P_l(\cos\theta),$$

因为对这个态 $\Delta L_z = 0$ ，显然 $\Delta L_x, \Delta L_y \neq 0$ ，虽然 L_x 和 L_y 不对易。为了证明上述第二点，康敦选取态 Ψ_{000} ，这个态的 $L_x = L_y = L_z = 0$ ，因此也有 $\Delta L_x = \Delta L_y = \Delta L_z = 0$ ，最后，为了证明第三点，康敦指出，对于 Ψ_{010} 态 (即 $L_z = 0$) 有 $L_x L_y - L_y L_x = 0$ ，虽然 $\Delta L_x \neq 0$ 及 $\Delta L_y \neq 0^*$ 。

- 这里的例子都是关于特殊的波函数的，两个不对易的算符在特定的态可以同时有确定值。但是，若要两个算符 A, B 具有共同的本征函数完备系，则其充要条件为 A, B 对易。——译者

【解读】

好了，在我们看过了数学家们如何加固测不准关系的“地基”之后，现在让我们把目光转向一位名叫康敦的物理学家。他扮演了一个非常重要的角色——“规则的检验者”。他没有去质疑 $\Delta x \Delta p$ 这个经典关系，而是提出了一个更深层次的问题：测不准关系背后的核心逻辑——“非对易”，真的像我们想的那么简单吗？

首先，我们得理解什么是“非对易算符”。大家在数学里习惯了交换律，比如 $3 \times 5 = 5 \times 3$ 。但在量子世界里，测量这个动作是有顺序的。“先测位置，再测动量”和“先测动量，再测位置”，得到的结果可能完全不同。我们把代表物理测量的数学工具称为“算符”，如果两个算符（比如位置算符 x 和动量算符 p ）的先后顺序会影响结果，我们就说它们是“非对易”的。通常的理解是：非对易是测不准的根源。

康敦就像一个严谨的律师，对这个“普遍真理”提出了三点质疑，并且都给出了“证据”：

1. **非对易性不一定导致测不准关系**：他以氢原子中的电子角动量为例。角动量在 x 、 y 、 z 三个方向的分量 (L_x, L_y, L_z) 是典型的非对易关系。康敦指出，对于一个特定状态的电子，我们可以精确地知道它沿 z 轴的角动量 ($\Delta L_z = 0$)，此时虽然 L_x 和 L_y 确实是不确定的，但这并不完全符合我们从位置和动量那里得来的那种此消彼长的“关系式”。他认为，非对易这个事实本身，并不足以直接“推导出”海森伯给出的那种具体的不等式形式。
2. **非对易的两个量有时可以同时精确测量**：这是他最颠覆性的一个论点。他找到了一个非常特殊的量子态，记作 Ψ_{000} （也就是我们常说的 s 轨道基态）。在这个状态下，电子的角动量在三个方向上的分量 L_x, L_y, L_z 全都是精确的零！这意味着它们的不确定度 $\Delta L_x, \Delta L_y, \Delta L_z$ 也都是零。这太令人惊讶了！明明 L_x 和 L_y 是“死对头”（非对易），却在这个特殊的“和平场景”下，居然能同时被精确地知道。
3. **即使算符对易，测量精度也可能受限**：他又找到了另一个状态 Ψ_{010} 。在这个特殊状态下， L_x 和 L_y 的“对易子” $L_x L_y - L_y L_x$ 恰好等于零，也就是说，它们在此状态下表现得像是“对易”的。然而，计算表明，它们各自的测量值却都不是精确的 ($\Delta L_x \neq 0, \Delta L_y \neq 0$)。

康敦的这些例子说明了什么？他告诉我们，量子世界远比一个简单的公式要复杂和奇妙。非对易和测不准之间的关系不是一条简单的直线，而是充满了各种特殊情况和微妙之处。正如译者注所说，康敦找到

的都是一些“特例”。要想让两个物理量在任何情况下都能被同时精确测量，它们必须是对易的。康敦的工作，正是为了逼迫物理学家们去寻找一个更普适、更严谨的数学表达，来完美地描述这种深刻的联系。

【原文】

在康敦完成他的论文之后五个星期，他在普林斯顿的巴耳末物理实验室的一个同事罗伯逊在一篇短文^[2]中，首次普遍地证明，两个

自伴算符 A 和 B 的标准偏差之积绝不会小于它们的对易子 $O = i(AB - BA)$ 的 averages 的绝对值之半。他的证明已为大多数现代教科书所采用。令 A_1 为 A , $A_2 = A - \langle A \rangle$ 因而标准偏差 ΔA 为 $\sqrt{\langle (\Delta A)^2 \rangle}$ (B_1, B_2 同样定义), 并定义 D 为 $D = A_1 + i\lambda B_1$, 其中 λ 为一实数, 易得

$$0 \leq \langle (D + D)^* \rangle = \lambda^2 \langle (\Delta B)^2 \rangle - \lambda \langle C \rangle + \langle (\Delta A)^2 \rangle$$

由于这个关于 λ 的二次多项式的判别式不能为正，因此有

$$\Delta A \Delta B \geq \frac{1}{2} |\langle C \rangle|$$

或

$$\Delta A \Delta B \geq \frac{1}{2} |\langle AB - BA \rangle| \quad (5)$$

对于 $A = q$ 和 $B = p$, 罗伯逊得到 $c = i\hbar/2\pi$ 从而 $\Delta q \Delta p \geq \hbar/4\pi$. 同海森伯的结果一致^[1:1]。对于分母中的表面上的不符合(在海森伯的公式中分母为 2π)狄奇本^[2:1]立即作了澄清，他还证明了 (与 J. L. 辛格合作) 当而且仅当散布是高斯型分布(正如海森伯所

【解读】

就在康敦发表他那篇充满深刻洞见的论文，揭示了测不准关系复杂性之后仅仅五个星期，物理学界就迎来了“终极答案”。这个答案来自康敦的同事——罗伯逊。他发表了一篇短文，却一劳永逸地解决了这个问题，给出了一个至今仍被写在所有现代量子力学教科书里的普适证明。

罗伯逊的证明漂亮在哪里？它具有强大的普适性。他不再局限于位置和动量，也不再纠结于角动量的特例。他要证明的是一个对任何两个可以在物理世界中被测量的量（在数学上称为“自伴算符” A 和 B ）都成立的普遍关系。

我们来拆解一下他的天才思路，你会发现，数学的力量是如此强大：

- 核心武器：标准偏差和对易子。** 首先，他明确了“不确定度”的数学定义，就是你们在统计学里学过的“标准偏差”(ΔA)。这让物理概念变得精确。然后，他抓住了问题的核心——“非对易性”，并用一个明确的数学量来度量它，这就是“对易子” $[A, B] = AB - BA$ 。如果 A 和 B 可以交换顺序，对易子就是零；如果不能，对易子就不为零，它的大小就代表了这两个物理量“冲突”的程度。

2. **巧妙的数学构造。**罗伯逊的证明过程，和我们第一部分提到的艾米德等人的方法有异曲同工之妙。他构造了一个表达式 D ，然后利用量子力学的一个基本原理：任何物理量的“方差”或者说“模长的平方”都不可能是负数。这个看似平淡无奇的条件 $0 \leq \langle (D + D)^* \rangle$ ，经过一系列运算，就变成了一个关于实数 λ 的二次不等式。
3. **判别式的威力。**又一次！我们看到了熟悉的数学工具——判别式。一个关于 λ 的二次多项式，如果它要永远大于等于零，那么它的判别式就必须小于等于零。正是这个简单的数学约束，像一把钥匙，打开了最终的宝箱。从这个判别式不等关系中，直接就诞生了那个无比优美的普遍公式：
- $$\Delta A \Delta B \geq \frac{1}{2} |\langle AB - BA \rangle|$$
- 这个公式被称为“罗伯逊不确定关系”。

这个公式是测不准原理的“完全体”。你看它的结构：左边是两个物理量不确定度的乘积，右边是它们对易子的平均值。它完美地回答了康敦的疑问：不确定性的根源，正是那个非零的对易子。如果对易子为零（即两个算符对易），那么不确定度乘积的下限就是零，意味着它们原则上可以被同时精确测量。如果对易子不为零，那么不确定度之间就存在一个不可逾越的鸿沟。

最后，当把这个普适公式应用到我们最熟悉的位置 ($A = q$) 和动量 ($B = p$) 上时，计算出的对易子平均值恰好是普朗克常数相关的一个值，最终得到 $\Delta q \Delta p \geq \frac{\hbar}{4\pi}$ (也就是 $\frac{\hbar}{2}$)，与海森伯最初的结果完美契合。至于早期公式中分母是 2π 还是 4π 的小差别，那只是因为早期对 h 和 $\hbar$ 的定义和使用有些混乱而已，很快就被澄清了。

至此，经过海森伯的天才直觉、众多学者的严谨修正，以及罗伯逊最终给出的普适性证明，测不准关系终于从一个深刻的物理思想，升华为一栋坚不可摧的数学和物理学大厦。好的，各位同学，大家好。我是你们的学术导师。今天我们要一起解读一段关于量子力学核心——不确定性原理的文献。

这段文字选自一本探讨量子理论历史和概念的学术著作，所以它看起来会有些“硬核”，充满了公式、人名和密密麻麻的注释。但请不要担心，这正是科学发展的真实面貌。我们的任务就是拨开这些复杂的表象，去理解背后那个激动人心的思想演进过程。

我们将把这段文字看作一个科学侦探故事的片段。故事的主角是海森堡、薛定谔这些如雷贯耳的物理学巨匠。他们试图用最精确的数学语言，来描述微观世界一个最奇特、最反直觉的性质。让我们一起开始这段探索之旅吧。

【原文】

假定 D 为厄米算符，则 $D + D^*$ 为厄米算符，其期望值为实数。因此，

对普遍公式的进一步改进是薛定谔得到的，我们从他同玻尔 和爱因斯坦的通信^[1:2]中得知，他曾对测不准关系的各种含义 (例如 它们和一容器内的理想气体的原子分的立能级的可分辨性的关系) 极感兴趣。1930 年春天，他研究了下述问题：在一次最佳的对 p, q 的同时测量中，不可避免的不确定性 $\hbar/4\pi$ 应如何在两个变量 p, q 之间分配，以使得在给定的一个后来时刻位置不确定性最小。他同索末菲讨论了

这个问题, 索末菲让他注意康敦和罗伯逊 的论文。薛定谔^[2:2]立即看出罗伯逊的结果可以得到加强, 因为对

于任何两个自伴算符 A 和 B 以及对于任何态 ψ 都有

$$(\Delta A)^2(\Delta B)^2 \geq \left| \frac{1}{2} \langle (AB - BA) \rangle \right|^2 + \left(\frac{1}{2} \langle (AB + BA) \rangle - \langle A \rangle \langle B \rangle \right)^2 \quad (6)$$

虽然薛定谔的公式中的最后一个平方项常常为零, 如同一切 对正则共轭变量的最佳同时测量的情形那样, 薛定谔的公式还是 对罗伯逊的结果的重要改进。

【解读】

同学们, 让我们来解剖这段文字。它看起来像是从一本武功秘籍里摘录的, 充满了神秘的符号和人物对话。但实际上, 它讲述的是量子力学基石——“不确定性原理”从一个初步构想, 演化成一个更精确、更普适的数学定理的故事。

首先, 我们来认识一下故事的主角: 埃尔温·薛定谔。大家可能因为“薛定谔的猫”而熟悉他, 但在这里, 他展现了作为理论物理学家的深厚功力。故事的背景是, 海森堡提出了不确定性原理的初始思想, 即我们无法同时精确地知道一个粒子的位置 (q) 和动量 (p)。随后, 像罗伯逊这样的数学家和物理学家, 将其用更严格的数学形式表达出来。但薛定谔觉得, 这个表达还可以更完美。

原文提到, 薛定谔当时正在思考一个非常具体的问题: “如何分配位置和动量的不确定性, 才能让粒子在一段时间后, 位置的‘模糊范围’增长得最慢?” 这个问题非常实际, 比如在设计粒子加速器时, 我们就希望粒子束能尽可能长时间地保持聚焦。正是这个看似具体的问题, 引导薛定谔对不确定性关系的数学基础进行了更深入的挖掘。

接下来, 我们来看这个核心公式 (6):

$$(\Delta A)^2(\Delta B)^2 \geq \left| \frac{1}{2} \langle (AB - BA) \rangle \right|^2 + \left(\frac{1}{2} \langle (AB + BA) \rangle - \langle A \rangle \langle B \rangle \right)^2$$

别被它吓到, 我们把它拆解开来看:

- A 和 B:** 在量子力学里, 它们被称为“算符”, 你可以把它们想象成两台特殊的“测量仪器”。仪器A用来测量物理量A (比如位置), 仪器B用来测量物理量B (比如动量)。
- ΔA 和 ΔB :** 这代表测量结果的不确定度, 也就是你们在数学课上学的“标准差”。 $(\Delta A)^2$ 就是方差, 它衡量的是测量结果的分散程度。这个值越大, 说明粒子的状态越“模糊”。
- 第一项:** $\left| \frac{1}{2} \langle (AB - BA) \rangle \right|^2$: 这是故事的关键! $(AB - BA)$ 被称为“对易子”。它描述的是“先用仪器A测, 再用仪器B测”和“先B后A”两种操作顺序得到的结果是否相同。在我们的宏观世界里, 先量身高再量体重, 和先量体重再量身高, 结果是一样的, 所以它们的“对易子”是零。但在量子世界, 测量行为会干扰被测量的对象。先测位置会改变动量, 反之亦然。所以 $(AB - BA)$ 不等于零, 这意味着A和B这两个物理量“相互排斥”, 无法同时被精确测量。这一项正是海森堡不确定性原理的核心数学表达, 它定量地描述了这种“测量干扰”带来的必然不确定性。

4. **第二项：薛定谔的“神来之笔”**：罗伯逊给出的关系式只包含了第一项。而薛定谔加上了这第二个平方项。这一项是什么意思呢？它描述的是物理量A和B的“关联性”或“协方差”。举个例子，假设我们测量一群人的身高和臂展，这两个量不仅各自有分布（不确定性），它们之间还是正相关的（身高越高，臂展越长）。薛定谔发现，在量子世界里，两个物理量的不确定性之间也可能存在这种类似的相关性。他把这项加进去，使得这个不等式变得更加普适和强大。

原文最后提到，对于位置和动量这种“正则共轭变量”的最佳测量，薛定谔增加的这一项恰好为零。这就像在说，在最理想、最简单的教科书案例中，罗伯逊的版本就够用了。但是，薛定谔的公式是一个“全能版”，它覆盖了所有可能的情况，包括那些两个物理量之间存在复杂关联性的情况。这正是科学的进步——从一个特定情况下的正确描述，发展到一个在任何情况下都颠扑不破的普遍规律。

最后，看那些密密麻麻的脚注。它们不是可有可无的装饰，而是科学对话的记录。它们告诉我们，薛定谔的这项工作并非凭空而来，他与玻尔、爱因斯坦通信，又受到了索末菲的指点。同时，在他之后，无数科学家（如脚注中长长的名单所示）仍在不断地探讨、推广和用新的方法（如几何方法）来理解这个深刻的原理。这展现了科学知识是一个不断被检验、被完善、被深入理解的动态过程，而不是一本写满了最终答案的天书。

好的，各位同学，我们今天要一起研读一段关于量子力学核心概念——“测不准关系”的深刻文本。这段文字出自物理学史和物理学哲学的经典著作，它将带领我们超越课本上的公式，去探索这个革命性思想背后的逻辑、历史与哲学。请大家集中精神，让我们开始这段思想之旅。

【原文】

有好些早期量子力学教科书把海森伯的思想实验当成量子力学的“实验”基础或“逻辑”基础。不过，虽然如我们看到的，这些思想实验对量子力学理论及其诠释的发展起过极其重要的作用，但是，主要由于这些思想实验对测不准关系的所谓操作解释，它们也容易受到这样的责难：虽然它们公开声称是要否定古典物理学的本体论，但是暗中却又在某种程度上采用了它。

这个批评似乎是冯·里希滕斯特因^[1:3]首次明白提出的，他于1954年指出，在海森伯对他的 γ 射线显微镜实验的说明中，必须认为电子动量是存在的，否则它就不会被“干扰”，但是正是这个说明却企图证明电子动量不存在，因为它不能精确地测量出。

【解读】

同学们好！我们从一个非常有趣且深刻的批判开始。大家在物理课上，可能都接触过海森伯的“伽马射线显微镜”思想实验。这个实验的逻辑通常是这样的：为了精确地“看到”一个电子的位置，我们需要用波长很短的光，比如伽马射线。但波长越短，光子的能量和动量就越大。当这个高能光子撞击电子时，就像用一辆飞驰的卡车去撞一个乒乓球来确定它的位置一样，它会极大地“干扰”电子的动量，使其变得非常不确定。反之亦然。这个思想实验生动地说明了为什么我们无法同时精确测量一个粒子的位置和动量。

然而，我们今天读到的这段文字，却像一位侦探一样，指出了这个著名思想实验背后隐藏的一个逻辑“陷阱”。作者提到，很多早期教科书把它奉为量子力学的基石，但它其实存在一个根本性的矛盾。这个矛盾

是什么呢？冯·里希滕斯特因一针见血地指出了问题所在：这个实验的整个论证过程，其实是建立在一个经典物理的“幽灵”之上的。

我们来仔细分析一下。实验说，光子“干扰”了电子的动量。这句话暗含了一个前提：在被光子撞击之前，那个电子**拥有一个确定的、虽然我们不知道的动量**。否则，我们怎么能谈论“干扰”呢？一个不存在的东西是无法被干扰的。但整个实验的结论又是什么呢？结论是：**我们无法精确测量电子的动量，甚至在量子世界里，谈论一个粒子同时拥有确定的位置和动量是没有意义的。**

大家发现问题了吗？这个思想实验为了推翻经典物理的观念（即粒子具有客观、确定的属性），却偷偷地、不自觉地使用了这个观念作为自己论证的出发点。用一个比喻来说，这就像是為了证明“世界上没有绝对的黑色”，你拿来一张黑色的纸，然后用手电筒照亮它说：“你看，它被光照亮了，所以它不是绝对的黑。”但你的论证恰恰需要那张“黑色的纸”作为前提。

这里涉及到一个哲学上的关键概念——**本体论**（Ontology）。简单说，本体论就是研究“存在”本身的学问，它关心的是“世界究竟是由什么构成的？事物的根本属性是什么？”经典物理的本体论认为，一个电子，无论我们观不观测它，它都客观地拥有一个确定的位置和动量。而量子力学恰恰要颠覆这个看法。所以，这个思想实验的尴尬之处在于，它表面上在革经典物理的命，骨子里却还残留着经典物理的世界观。这提醒我们，在学习科学时，不仅要理解结论，更要审视得出结论的逻辑过程是否严谨自治。

【原文】

让我们对海森伯关系再补充几句一般性的说明。首先应当指出，关于物理世界中有一种基本的不准性或不确定性的总的观念，是和严格的决定论的观念同样古老的。柏拉图在他的《蒂迈 74

欧篇》[*Timaeus*] (28D–29B) 中所描述的关于不可理喻的次原子 基层[*unintelligible subatomic substratum*]的学说，就可以被看成是“对一种最新发展[海森伯的原理]的古代预见”^[1:4]。

关于古代的和经典的物理学和哲学中的这种预见进一步的例子，以及对不确定性在近代的经典物理学中的作用的分析（玻恩 对这种作用的分析是最雄辩的），请读者参看我的论文“物理学中的不确定性”^[2:3]。特别是柏格森，尤其是在他的《时间与自由意志》^[3]一书中，表示了与海森伯原理惊人地相似的观念，这点曾被德布罗意指出^[4]。关于测不准关系在其提出之前的观念渊源就讲这些。

【解读】

刚才我们讨论了对海森伯思想实验的一个精妙批判，现在作者将我们的视野拉得更远，告诉我们一个非常重要的事实：“**不确定性**”这个思想，并非**是20世纪物理学家的凭空创造**，它的种子早已深埋在**人类思想史的土壤之中**。

这可能会让大家感到惊讶。我们通常认为，牛顿以来的经典物理学构建了一个像钟表一样精确、完全可预测的“决定论”宇宙。只要知道了初始条件和所有作用力，我们就能像上帝一样预测宇宙的未来。而“不确定性”则是对这个完美机械世界的颠覆性革命。但作者指出，“不确定性”的观念和“决定论”的观念一样古老。

他举了两个跨越时空的例子。第一个是古希腊哲学家**柏拉图**。在柏拉图的哲学体系中，他设想在构成我们这个有序世界的最底层，存在一种“不可理喻的次原子基层”。这是什么意思呢？你可以把它想象成一团混沌、不确定、无法被清晰描述的“原始材料”。我们所感知的、符合规律的宏观世界，是从这团模糊不清的“材料”中生成的。这种在世界本源处存在着某种根本性的模糊和不确定性的想法，与海森伯原理那种微观粒子内在的、不可消除的不确定性，是不是有种异曲同工之妙？这当然不是说柏拉图预言了量子力学，而是说，人类对于世界本质的思考，早就包含了“非决定论”的线索。

第二个例子是法国哲学家**柏格森**。他生活在量子力学诞生前夕，主要研究的是时间、意识和生命。在他的名著《时间与自由意志》中，柏格森强烈反对那种将时间看作一连串精确时刻（就像尺子上的刻度）的机械观。他认为，真实的时间（他称之为“绵延”）是流动的、创造性的、不可分割且充满可能性的，未来并非由过去完全决定。发现了吗？这种对严格决定论的哲学批判，与量子力学对物理世界决定论的挑战，在思想内核上是惊人地相似。就连提出波粒二象性的物理学家德布罗意，都敏锐地指出了这两者之间的深刻联系。

这段文字的意义在于，它打破了学科的壁垒，向我们展示了科学与哲学之间千丝万缕的联系。一个伟大的科学思想，往往不是孤立的，它可能在哲学、艺术、甚至神话中都有着遥远的回响。这告诉我们，要真正理解科学的革命，不仅要学习公式和实验，还要去了解它背后更广阔的人类思想史。海森伯原理之所以震撼世界，不仅因为它是一个物理学发现，更因为它触及了人类几千年来关于秩序与混乱、必然与偶然、宿命与自由的根本性追问。

【原文】

海森伯关系或“非决定性原理”[the principle of indetermination]

(这是鲁阿克^①第一次用称呼它们的名字)一经发表，就成为物理学中，随后又成为哲学中热烈讨论的题目。例如，林德曼的《量子理论的物理意义》^②一书的主要目的之一便是要表明，许多原来不完全理解的量子现象，在海森伯关系的基础上怎样便能轻易地得到说明。海森伯关系在物理学本身中的重要性，当然是每个近代物理学的学生都熟知的，无庸详述。我们只提一项人们不太熟悉的研究工作，它是关于海森伯关系本身的反矛盾性的，即范夫勒克的对于人们所熟知的“测不准积” $\Delta q \Delta p$ ，随时间的增加同关于相空间中的分布的恒勃特性的刘维[Liouville]定理不矛盾的证明^③。

3.4 哲学涵义

最先从这些关系引出哲学结论的是海森伯本人。他把因果律的强势表述等同于“现在的精确知识使我们能够计算出来”这句话，然后指出这句话“不是其结论而是其假设是不成立的”，因为测不准原理所要求的精确初值的不可确定性排除了对未来事件

【解读】

在追溯了“不确定性”思想的古老渊源之后，作者现在把我们带回了20世纪20年代，聚焦于海森伯关系问世后所引发的巨大震动。这段文字主要讲了两个方面：一是它在物理学内部的巨大作用，二是它所引发的更为深刻的哲学革命。

首先，在物理学领域，测不准关系不仅仅是一个令人费解的怪异原则，它更是一把强大的钥匙，解锁了许多之前无法理解的量子谜题。这就好比在玩一盘复杂的棋局，你百思不得其解，突然有人告诉你一条核心规则，瞬间你之前的很多困惑就豁然开朗了。林德曼的书就系统地做了这项工作，向人们展示了测不准关系强大的解释力。

更有趣的是，作者提到了一个我们可能不太熟悉的工作——范夫勒克的证明。这个证明是关于什么呢？它要解决一个非常重要的问题：这个新来的、看似颠覆性的“测不准关系”，会不会和物理学大厦中其他已经非常成熟、被验证过无数次的理论（比如统计力学中的刘维定理）产生致命的矛盾？科学的发展不是简单的推倒重来，而是一个不断整合、修正、确保整个理论体系自治的过程。范夫勒克的工作，就像是给这座大厦的新结构做了一次严格的“压力测试”，证明了“测不准关系”这个新构件能够完美地融入整个物理学体系，而不会导致整个大厦的崩塌。这体现了科学发展的严谨性。

然而，测不准关系真正“出圈”，引发全社会热议的，是它的**哲学涵义**。海森伯本人就是第一个举起思想旗帜的人。他直接挑战了人类几百年来深信不疑的**因果律**。

什么是“因果律的强势表述”？这其实就是我们在经典物理中学到的“拉普拉斯信条”的通俗版。法国数学家拉普拉斯曾设想，如果有一个“超级智能”（后人称之为“拉普拉斯妖”），它能知道宇宙中每一个粒子在某一瞬间的精确位置和动量，那么它就能根据牛顿定律，完美地计算出宇宙的全部过去和未来。这个信条可以概括为一句话：“**只要我们能精确地知道‘现在’，我们就能完美地预测‘未来’。**”这就是经典物理世界观的基石——严格的决定论。

海森伯的攻击方式非常巧妙。他没有直接攻击这个逻辑链条的“结论”（即我们能预测未来），而是釜底抽薪，直接摧毁了它的“假设”（即我们能精确地知道“现在”）。他说，测不准原理告诉我们，**我们永远无法同时精确地知道一个粒子的位置和动量。**这个“无法”不是因为我们的测量技术不够好，而是自然界本身内在的、根本的限制。

所以，海森伯的论证是：既然“精确地知道现在”这个前提条件在物理上是根本不可能实现的，那么建立在这个前提之上的“完美地预测未来”的结论，自然也就成了空中楼阁。因果律并没有被完全抛弃，而是它的适用范围和含义被深刻地改变了。宇宙不再是一部预先设定好程序的精密机器，而是一个充满内在随机性和可能性的、不断展开的舞台。这不仅是物理学的一场革命，更是人类世界观的一次根本性转变。好的，同学你好！很高兴能担任你的学术导师。量子力学的哲学思想确实深邃又迷人，它挑战了我们从经典物理学中建立起来的许多直觉。这篇文档探讨的正是其中最核心的冲突之一：量子力学与“因果律”的百年论战。

别担心，我会像剥洋葱一样，一层一层地带你深入这场精彩的智力辩论。让我们开始吧。

【原文】

① A. E. Ruark, “Heisenberg's indetermination principle and the motion of free particles”, Bulletin of the American Physical Society 2, 16(1927); Phys. Rev. 31, 311—312(1928).

② F. A. Lindemann, The Physical Significance of the Quantum Theory (Clarendon Press, Oxford,

1932), 类似维理的一个更近代的例子,见 R. C. Harney, “A method for obtaining force law information by applying the Heisenberg uncertainty principle”, Am. J. Phys. 41,67—70(1973).

③ J. H. van Vleck, “Note on Liouville's theorem and the Heisenberg uncertainty principle”, Phil. Sci. 8, 275—279(1941).

量子力学的哲学 106

作严格的预言的可能性。海森伯宣称①:“因为一切实验都遵从量子定律,因而遵从测不准关系,因果律的失效便是量子力学本身的一个确立的结果”。

正如石里克②后来承认的那样,海森伯对因果性问题的使用使近代哲学家大吃一惊,因为尽管人们对这个问题已经世代进行过大量讨论,却甚至连这种解答的可能性都从来没有预计过。

但是,耶路撒冷希伯来大学的伯格曼③在 1929 年提出,海森伯对因果律的否定在逻辑上是有毛病的,因为一个“如果……则……”型的条件陈述(即一个逻辑蕴含[logical implication])并不因其前提或假设被证明为无效而被否定,也就是说,并不因为证明了“如果”副句不能实现或不能被满足(或者海森伯的说法:“如果”副句不成立,伯格曼认为海森伯这个说法是“不确切的”)而被否定。伯格曼争论说,一个蕴含的前提不成立绝不使蕴含本身也不成立,而只是蕴含本身才是因果律。因此,量子力学就没有否定因果律,它至多也表明了因果律的不适用性④。看来伯格曼是

① 51 页注①文献(p.197).

② M. Schlick, “Die Kausalität in der gegenwärtigen Physik”, Die Naturwissenschaften 19, 145—162(1931)。译者按:M. 石里克(1882—1936),近代哲学家,逻辑实证论学派(维也纳学派)的创始人。

③ H. Bergmann, Der Kampf um das Kausalgesetz in der jüngsten Physik (Vieweg, Braunschweig, 1929), p. 39.

④ “Von einer definitiven Feststellung der Ungültigkeit des Kausalgesetzes durch die Quantentheorie kann also keine Rede sein, sondern höchstens von seiner Unanwendbarkeit.”(因此不能通过量子理论来明确地论证因果律的无效,而至多只能说明它的不适用性。)同上。伯格曼的批评后来受到 Rohracher 的诘难 见 H. Rohracher, “Kritische Betrachtungen zur Leugnung der Kausalität durch W. Heisenberg”, 载于 Erkenntnis und Erziehung (Österreichischer Bundesverlag, Wien, 1961), pp. 105—123。

【解读】

同学,我们首先来看这场大戏的开场。这一段的核心人物是海森伯(Heisenberg),他扔出了一颗“重磅炸弹”。

想象一下你高中物理学过的牛顿定律。只要你知道一个台球的初始位置、速度和受力情况,你就能像上帝一样,精确地计算出它在未来任何时刻的运动轨迹。这就是“因果律”(Causality)的威力:**“只要知道了初始条件(因),就一定能预言未来的结果(果)”**。这个思想统治了物理学几百年,它描绘了一个像精密时钟一样运行的、完全可预测的宇宙。

然而，海森伯登场了。他提出的“测不准关系”（或称不确定性原理）指出，我们永远无法同时精确地知道一个微观粒子（比如电子）的位置和动量。你把它的位置看得越清楚，它的动量就越模糊，反之亦然。海森伯由此得出一个颠覆性的结论：既然我们连作为“因”的初始条件都无法完全确定，那建立在其之上的“果”——对未来的精确预言——自然也就不可能了。因此，他大胆宣称：**因果律，这个物理学的基石，失效了！**

这在当时的哲学界引起了轩然大波，就像有人突然告诉你“ $1+1\neq 2$ ”一样令人震惊。

但这时，一位名叫伯格曼（Bergmann）的哲学家站出来，指出了海森伯论证中的一个逻辑“漏洞”。他认为海森伯混淆了两个概念：“**失效**”和“**不适用**”。

伯格曼的论证非常精妙，我们可以用一个比喻来理解。假设有这样一条规则：“**如果你能在考试中拿到满分，那么老师就奖励你一辆跑车。**”这就是一条“如果...则...”型的因果律。现在，海森伯的测不准关系告诉你：**由于考试题目极其变态，你永远不可能拿到满分。**于是海森伯说：“看！‘奖励跑车’这条规则是错的，是无效的！”

但伯格曼会反驳说：“不对。‘奖励跑车’的规则本身没有错。只是因为你永远满足不了‘考满分’这个前提条件，所以这条规则对你**不适用**而已。规则本身依然是成立的。”

所以，伯格曼认为，量子力学并没有**否定**因果律这条规则本身，只是说明在微观世界，我们无法满足因果律启动的前提条件，导致它英雄无用武之地。一个是“法律被废除了”（失效），另一个是“**没人满足立功条件，所以法律没机会执行**”（不适用）。这是一个非常关键的哲学区别。

【原文】

忽视了这一点:海森伯已预见到这一反对意见,而从海森伯当时所 持的操作论甚至是实证论的观点来看,“不适用性”(伯格曼所承认 的 Unanwendbarkeit)和“不成立”于物理学家来说是同义语。 海森伯说:“.....可能有人要问,在统计性的感觉世界后的后面[hin ter der wahrgenommenen statistischen Welt]是否还隐藏着一个 因果律成立的‘真实’世界[wirkliche Welt]呢?但是这种玄思既 想在我们看来是既无价值又无意义的,因为物理学必须限于描述 感觉之间的关系”。

如果我们还记得,引导海森伯得到测不准关系的推理的出发 点是爱因斯坦的箴言“只有理论决定了能够观察什么”,那么向对 待物理学的实证论观点表示皈依的这一声明听起来是使人感到奇 怪甚至是矛盾的。实际上,海森伯很快就放弃了这种实证主义态 度。他在 1930 年 12 月 9 日于维也纳发表的关于测不准关系在 近代物理学中的作用的一篇讲演中,再次承认了爱因斯坦在思想上 对他的影响,这次讲演中他把因果律表述为:“如果在一个时刻知 道了关于一个给定的系统的全部数据[Bestimmungsstücke],那么 就能够确定地预言这个系统在未来的物理行为”②。这一次海森 伯声称,不是假设(“如果”句)而是结论(“那么”句)不成立,因为关 于数据的精确知识亦即薛定谔函数一般只允许作统计性的结 论。不过,海森伯接着说,因果律也可以表述如下:“如果在一个时

① 51 页注①文献(p.197).

② W. Heisenberg, “Die Rolle der Unbestimmtheitsrelationen in der modernen Physik”, Monatshefte für

【解读】

面对伯格曼的逻辑挑战，海森伯是如何回应的呢？这一段揭示了他当时所持的、一种非常“硬核”的物理学观念——**实证论 (Positivism)**。

简单来说，实证论者的口号是：“**不能被测量（观察）的，就没有意义。**”海森伯的反驳正是基于此。他会这样对伯格曼说：“你说的‘不适用’和‘不成立’在逻辑学家的书斋里也许有区别，但对我们物理学家来说，它们是一回事。你说在背后可能还隐藏着一个因果律成立的‘真实’世界，但既然测不准关系已经注定我们永远无法窥探到那个世界的精确初始条件，那讨论它又有什么意义呢？这就好比讨论一个永远无法被观察到的、隐形的独角兽是否存在一样。**这种讨论不是物理学，而是‘玄思’（形而上学）。**”

所以，在海森伯看来，一个永远无法被应用的法则，和一个根本就不存在的法则，对物理学而言是等价的。物理学只关心我们能“感觉”（观察和测量）到的世界。这是一个非常务实甚至有些“粗暴”的观点。

然而，文本接下来指出了一个有趣的矛盾。海森伯本人深受爱因斯坦的影响，而爱因斯坦恰恰是一位**实在论者**，他坚信物理理论应该描述一个独立于我们观察的、客观存在的“真实世界”。这与海森伯此刻用来反驳的“实证论”立场是有些冲突的。

或许是意识到了这种内在的张力，海森伯很快就调整了他的论证策略。在后来的演讲中，他不再纠结于因果律的“前提”（如果部分）能否实现，而是直接攻击其“结论”（那么部分）。

他重新定义了因果律：“如果知道了系统的全部数据，那么就能确定地预言其未来。”这一次，他承认在量子力学中，我们确实可以获得“关于数据的精确知识”，这个知识就是**薛定谔方程**所描述的**波函数**（或称薛定谔函数）。这相当于承认了“如果”这个前提在某种程度上是可以被满足的。

但是，他指出，即使我们掌握了最完整的知识——波函数，它也**不能**给出一个确定的、唯一的未来。它只能告诉我们各种可能结果的**概率**。比如，它能计算出电子有50%的概率出现在A点，30%的概率在B点，20%在C点，但它永远无法告诉你，**下一次测量时，电子一定会出现在哪里。**因此，是因果律的“**那么**”部分——“能够确定地预言”——失效了。

这个论证比之前的更加深刻，它触及了量子力学概率性的本质，而不仅仅是测量的局限性。

【原文】

刻知道了关于一个给定系统的全部数据,那么在以后任何时刻都 存在有其结果可以准确预言的实验,只要这个系统除了进行这个 实验所必须的扰动之外不受其他干扰。”

然后海森伯加 上一句:“这样一种规律性是否还可以看成因果 性,那就纯粹由各人自己判断了。”

在 1930 年 9 月 6 日于哥尼斯堡发表的一篇讲话中^①,海森伯 已经承认一种受到限制的 (eingeschränktes)因果律是有意义的和 成立的。

另一个从海森伯的测不准性的背景中挽救严格的决定论和因果性的企图是法国哲学家勃伦什维克做出的。按照勃伦什维克的看法^②,微观物理实在本来是遵从严格的因果性定律的,而海森伯原理所表示的测不准性只是表现的,因为它完全来自对微观客体的观测行动所引起的干扰。这种干扰引起了测不准性,但是干扰本身是一个物理过程,包含能量交换,并且是完全决定论的。勃伦什维克断言:“测不准关系只是意味着,被观察现象的决定论这个说法实质上仅仅是一种抽象,因为它是不能从制约着观察动作的决定论分开的。”

① 同上。

② L. Brunschvicg, *La physique du vingtième siècle et la philosophie* (Hermann, Paris, 1936), p. 11. 按照 F. S. C. Northrop(在 W. Heisenberg, *Physics and Philosophy*, Harper and Row, New York, 1958, p. 23 中的介绍)的看法,勃伦什维克是想“用康德的先验论范畴来解释海森伯的原理”。

【解读】

在上一段的结尾,海森伯对因果律的攻击已经从“前提无法满足”转向了“结论无法实现”。在这一段,我们看到他似乎在寻找一种妥协,试图为某种“打了折扣”的因果律保留一席之地。

他提出了一个更弱版本的因果律:“如果我们知道了系统的全部数据,那么总能找到**某些**未来的实验,其结果是可以准确预言的。”这听起来有点绕,但意思是,虽然我们无法预测所有事情,但也许可以预测特定的、某些方面的结果。这就像你虽然无法预测一场足球赛的具体比分,但你或许可以准确预测“比赛总会分出胜负平”这个结果。海森伯把这个问题抛给了听众:“你们觉得,这种打了折扣的‘规律性’,还配得上‘因果性’这么高大上的名字吗?”这反映出,连他自己也意识到,经典意义上那种铁板钉钉的因果律已经一去不复返了,剩下的只是一个被削弱的、概率性的版本。

接下来,文本介绍了另一位思想家——法国哲学家勃伦什维克(Brunschvicg)的观点。他试图**拯救**传统的因果律和决定论,他的思路与海森伯完全不同。

勃伦什维克认为,海森伯等人把问题搞错了。他相信,微观世界本身是**完全决定论的**,就像牛顿的台球世界一样,遵循着严格的因果定律。那我们观察到的“测不准”现象又是怎么回事呢?勃伦什维克说:“**问题出在我们自己身上!**”

他的核心观点是:不确定性并非自然的**内在属性**,而是我们**观察行为**带来的**副作用**。想象一下,你要测量一个轮胎的气压,你必须把气压计插上去,这个动作本身就会放掉一点气,从而改变了你想要测量的气压值。在宏观世界,这种干扰微不足道。但在微观世界,我们用来“看”电子的工具(比如光子),其能量足以把电子“撞飞”,从而改变了它的状态。

所以,在勃伦什维克看来,海森伯的测不准关系,只是描述了“我们的测量仪器”与“被测量的粒子”之间这个互动过程。他甚至认为,这个“干扰”过程本身也是一个物理过程,同样遵循着严格的、决定论的物理定律。

这是一种非常巧妙的“挽救”方案。它承认了测不准现象的存在,但把它从“世界的基本法则”降级为“测量中不可避免的技术问题”。在这种图景下,宇宙的底层逻辑依然是决定论的,只是当我们试图去窥探它

时，我们的动作不可避免地会搅动水面，让我们看到模糊的倒影。这个观点与海森伯认为“模糊”和“概率”是世界本源的看法，形成了鲜明的对比。

希望以上的解读能帮助你理解这场围绕物理学灵魂的深刻辩论。如果你还有任何问题，随时可以提出来！好的，请看我对这份关于量子力学哲学解读的详细分析。我将扮演您的学术导师，用生动易懂的方式，带领您深入探索这段文字背后的深刻思想。

【原文】

一句话，勃伦什维克不是把海森伯关系解释成因果性的否定，

① W. Heisenberg, “Kausalgesetz und Quantenmechanik”, Erkenntnis 2, 172—182(1931).

② L. Brunschwig, “Science et la prise de conscience”, Scientia 55, 329—340 (1934); La Physique du XXe Siècle et la Philosophie (Herman, Paris, 1936).

第三章 测不准关系 109

反而解释成因果性的证实。赫德③提出了为了同一目的的另一论题，根据他的意见，海森伯关系并不意味着能证明因果性不存在，而是意味着不能证明因果性存在。

因为量子力学及其诠释对现代哲学的冲击并不是我们主要关心所在，把这些题外话再扯下去就未免离题太远。上面这些话只是作为一些例子，用来表明测不准关系甚至对那些超出物理学的直接范围之外的问题也是多么重要。我们不讨论测不准关系对有关运动概念的那些哲学问题的有趣的应用了，特别是对芝诺[Zeno]的那些著名的悖论的应用②。

① J. E. Heyde, Entwertung der Kausalität? (Kohihammer, Stuttgart; Europa Verlag, Zurich, Wien, 1957), p. 65.

② 见 L. de Broglie, Matière et Lumière (Michel, Paris, 1937, 1948), pp. 282—283; 英译本 Matter and Light (Norton, New York, 1939; Dover, New York, 1946), pp. 245—255; A. Ushenko, “Zeno's paradoxes”, Mind 55, 151—165(1946); P. T. Landsberg, “The uncertainty principle as a problem in philosophy”, Mind 56, 260—266 (1947); H. Hörz, “Die philosophische Bedeutung der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelationen”, Deutsche Zeitschrift für Philosophie 8, 702—709(1960).

③ 译者按：芝诺是古希腊爱利亚学派的代表人物之一，生活在公元前五世纪，他提出过一些和运动概念有关的悖论，如“阿基里(古希腊善跑的人)永远追不上乌龟”“二分法”“飞箭不动”等。德布罗意论证的悖论是“飞箭不动”，所谓“飞箭不动”，芝诺是这样论证的：因为在飞箭经过的每一点上，它都占有一定的位置，它在这一点上，就不能同时又不在这一点上，所以飞箭是不动的。我国《庄子》关于篇3中听说的“飞鸟之景，未尝动也”，说的也是这个意思。芝诺提出这个悖论，原意是为了否定运动和变化，但是它却从反面揭示了运动的辩证法：运动就是同时既在这一点上，又不在这一点上，德布罗意认为，芝诺的看法是：在空间和时间中对确定位置的物体是没有任何演化性能的，反之，一个演化的物体不能依附在时空中的任何一点上；而测不准关系则说，不能同时赋予一个物体以一种确定的运动状态和时空中一个确定的位置，因此，芝诺的说法和

测不准关系是一致的,德布罗意对芝诺悖论的讨论又见L. de Broglie, *Physics and Microphysics* (Pantheon Books, New York, 1955) pp. 121—126,188—189。下面 在第 4.4 节还要提到这个悖论。

【解读】

同学们好！我们来看第一段。这段文字信息量很大，它一上来就抛出了一个颠覆我们常识的观点，讨论的是海森堡的“测不准关系”和哲学中的“因果性”之间的纠葛。

首先，我们来回顾一下这两个核心概念。**测不准关系**（或称不确定性原理），是量子力学的基石。简单说，就是我们不可能同时精确地知道一个微观粒子（比如电子）的位置和它的动量。你把它的位置看得越清楚，它的动量就越模糊，反之亦然。而**因果性**，是我们从牛顿时代就建立起来的信念：只要你知道了一个物体现在的状态（位置、速度等），你就能像钟表一样，精确预测它未来的任何状态。这是典型的“拉普拉斯妖”式的决定论世界观。

好了，有了这个背景，我们再看文本。大多数人听说测不准关系后，第一反应是：既然连初始状态都测不准，那还怎么预测未来？这不就否定了严格的因果性吗？世界在根本上是随机的、不确定的！

但这段文字告诉我们，哲学家的脑回路可没这么简单。法国哲学家**勃伦什维克（Brunschvicg）**的观点堪称“神之一手”，他认为测不准关系恰恰“证实”了因果性。这是什么逻辑呢？这是一种更高维度的思考。他可能认为，这种“不确定性”本身，就是宇宙深层因果律的一种表现形式。它不是破坏了规律，而是揭示了规律本身就包含着这种内在的、结构性的限制。**规律不再是“A必然导致B”，而是“A必然导致B的可能性分布”，这种可能性分布本身是精确的、可计算的，因此也是一种更深刻的因果性。**

另一位叫**赫德（Heyde）**的学者则提供了一个更温和、也更严谨的“不可知论”视角。**他认为，测不准关系既没有否定因果性，也没有证实它。**它只是给我们的认知能力划下了一道不可逾越的鸿沟。我们就像是隔着一层毛玻璃看世界，因为看不清，所以我们“无法证明”因果性是否在玻璃背后精确运行。这是一种关于“我们能知道什么”的谦逊态度。

更有趣的是，**作者还提到了古希腊的芝诺悖论**，特别是“飞矢不动”。芝诺说，一支飞行的箭，在任何一个瞬间，它都停留在某个确定的位置上。既然每个瞬间都是静止的，那它又是如何运动的呢？两千年来，这都是个哲学难题。但量子力学提供了一个全新的视角：测不准关系告诉我们，一个拥有确定动量（正在运动）的物体，根本就不可能被“钉死”在某个确定的位置上！芝诺悖论的前提——“在任何一个瞬间，它都停留在某个确定的位置上”——在物理上就是错误的。一个物体要么位置确定（静止），要么动量确定（运动），你不能两者兼得。你看，最前沿的物理学，竟然与两千多年前的古老哲学思辨产生了如此奇妙的共鸣。这恰恰说明了测不准关系的影响力远远超出了物理实验室，它在深刻地重塑我们对现实、运动和知识本身的理解。

（请注意原文中大量的脚注，它们是学术著作的标志，为你指明了这些思想观点的原始出处，这也是做学问严谨性的体现。）

【原文】

110 量子力学的哲学

反之，让我们对测不准关系的那些似乎被海森堡认为是最重要的哲学涵义再补充几句。对于古典的直观[anschaulische]而且决定论的物理实在图像必须让位给近代的抽象而非决定论的量子理论及其测不准性是否可憎的问题，海森堡回答说，在仔

78 细分析后，从认识论的角度来看，量子物理学要比古典物理学更为令人满意。他论证说，一个把物质想象成由电子和质子之类的“很小”但仍然是非无限小的基本粒子构成的理论，只有当这个理论设法使任何关于在“更小”的区域内又将会怎样的问题完全失去意义时，才会达到终极的贯彻一致性。因此，如果由于测不准关系而使基本粒子不可描绘，而使这类问题变成毫无意义的，那么这个理论就将臻于可以称为“在小的一端上的认识论闭合”的状态。测不准关系使量子力学具有的终极上的认识论闭合，因而使量子力学优于古典的原子论。不过对海森堡所说的能是现代原子物理学才首次表明怎样可以设想这种闭合性的说法，则可以提出异议。因为有充分的理由断言，柏拉图在他的值得注意的原子理论中已经直觉到这种闭合性了——顺便提一下，柏拉图的理论要比德谟克里特的原子论同现代概念的关系更密切些，我们知道，它对海森堡的思想发展影响很深。

【解读】

这段文字非常精彩，它带我们直接进入了“测不准关系之父”——海森堡本人的哲学思考。很多人觉得，量子力学用一堆抽象的数学和概率取代了我们熟悉的、眼见为实的经典物理图像，这简直太“可憎”了，它让物理学变得不再直观。但海森堡的看法恰恰相反，他认为这才是量子力学“更令人满意”的地方。为什么呢？

这里，海森堡提出了一个极为深刻的概念：“**在小的一端上的认识论闭合**”。我们来拆解一下这个术语。“认识论”就是关于“我们如何认识世界”的学问。“闭合”在这里的意思是“终结”、“完备”，形成了一个自治的闭环。所以，这个概念的核心意思是：**在微观世界的尽头，我们的认知将达到一个终点，形成一个完美的闭环。**

让我们用一个比喻来理解。想象一下经典物理中的原子论，比如德谟克利特的理论。他认为世界是由微小的、不可再分的“原子”构成的。但这会引出一个无穷无尽的问题：原子里面是什么？如果里面还有东西，那东西里面又是什么？这就像俄罗斯套娃，你可以永远问下去：“更小的是什么？”这种理论在认知上是“开放”的，它没有终点，因此总让人觉得不完备。

而海森堡认为，测不准关系恰好解决了这个“无限追问”的难题。它告诉我们，当我们深入到一定尺度之下，像“这个电子在‘更小’的区域里究竟在哪里”这样的问题，**从根本就失去了意义！**不是我们技术不够好，找不到答案，而是这个问题本身就像在问“这个想法是什么颜色”一样，是无效的提问。因为粒子的“位置”和“动量”这些我们熟悉的宏观概念，在微观尺度下已经不再是现实的清晰属性，它们变成了一种模糊的、概率性的存在。因此，测不准关系为我们向下探索的道路设置了一个**天然的“禁止通行”标志。**它

终结了那个无尽的俄罗斯套娃游戏，从而让整个物理理论体系实现了“闭合”。这是一种深刻的理论自治与完备，所以海森堡觉得这比经典理论“更令人满意”。

更有意思的是，文章最后还将海森堡的思想与古希腊哲学家**柏拉图**联系起来。这可能会让大家很惊讶。我们通常认为古希腊原子论的代表是德谟克利特（认为原子是坚实的物质小球），但柏拉图的“原子”观其实更抽象，他认为构成世界的基本元素是完美的几何形状（比如火是正四面体）。这种用抽象的、数学的“形式”而非具体的“物质”来构建世界的思想，与量子力学用数学方程（如薛定谔方程）来描述基本粒子的做法，在哲学气质上确实更为接近。海森堡深受柏拉图思想的影响，这也提醒我们，科学的革命性突破，往往与深刻的哲学思辨密不可分。

【原文】

3.5 后来的发展

因为我们在后面各处还要继续讨论海森堡原理(例如在有关关

① 107页注②文献。

第三章 测不准关系 111

补性诠释、玻-爱因斯坦论战、量子逻辑和测量理论的讨论中)，因此这里我们限于相当简短地概述它来的一些主要发展。

20 世纪三十年代到五十年代的科学文献中实际上充斥着讨论海森堡关系及其哲学涵义的论文——而半科学的文献和哲学文献中可能更多。这些文章的内容越不专门，他们的解释也就越自由。常常一个作者在讲述过程中给出了不同的解释。例如在第二次世界大战前非常流行的爱丁顿的《科学的新道路》①一书，把海森堡原理描述为反映了“电子和质子的波动结构”(p. 107)，但随后他又把它解释成相互作用的结果，并把观察者比作一个“怀中满抱小包的杂耍演员，他拾起这个小包。那个小包又从他手中掉下去了”(p. 100)，而在另一场合(p. 98)这个原理又被说成是断言只有“一半符号代表可以认识的量”。对爱丁顿来说这种种说法无疑只是同一基本概念的不同表述方式②，但是这本书或类似著作的79批判力的读者，一定会对这个原理的“多种面貌”感到迷惘。

下面的事实最能说明情况的确实如上所述：鹿特丹大学哲学系现任系主任麦克马林，在1954年写了一篇博士论文③专门讨论

【解读】

同学们，这一部分为我们描绘了一幅生动的“思想市场”图景，展示了一个伟大的科学原理诞生后，人们是如何努力去理解、解释和消化它的。作者告诉我们，从20世纪30年代到50年代，关于测不准关系的讨

论简直是铺天盖地，不仅是物理学界，连哲学界和大众科普读物都卷入其中。这恰恰说明了这个原理的革命性和颠覆性有多强。

这段文字的核心，是通过著名天体物理学家**爱丁顿（Eddington）**的例子，来揭示当时人们在解释测不准关系时出现的“百家争鸣”甚至有些“混乱”的局面。爱丁顿是一位科普大师，但他对测不准关系的解释却有多个版本，这让读者感到“迷惘”。我们来分析一下他这三种解释，它们其实代表了理解测不准关系的不同层次和角度：

1. **“电子的波动结构”**：这是最根本、最物理解释。它源于德布罗意的波粒二象性。微观粒子既是粒子也是波。想象一下水波，一个很长的、平缓的波列，它的“波长”（对应粒子的动量）非常确定，但你要问这“波”在哪一点，就很难说，它的“位置”非常模糊。反之，如果你想确定一个波的位置，就必须把它压缩成一个很短的“波包”，但这个波包是由许多不同波长的波叠加而成的，所以它的“波长”（动量）就变得非常不确定。这种位置和动量之间的天然矛盾，根植于粒子的波动本性，这就是测不准关系的数学和物理根源。
2. **“相互作用的结果”**：这是最流行、最直观的解释，也常被称为“观察者效应”。比如，你要用显微镜看一个电子的位置，就必须用光子去“照亮”它。但光子本身携带能量和动量，当它撞击到电子上，就不可避免地改变了电子的动量，就像用一个篮球去确定一个乒乓球的位置，你刚看到它在哪，它就被撞飞了。这个比喻很形象，但容易产生误导，让人以为不确定性只是因为我们的测量技术太“笨拙”。而实际上，如第一点所述，不确定性是粒子内禀的属性，就算我们有再完美的仪器，它也依然存在。
3. **“只有一半符号代表可以认识的量”**：这是一种更深刻、更抽象的哲学解释。它在说，我们习惯于用成对的概念来描述世界，比如（位置，动量）、（时间，能量）。但在量子世界，这些概念对（物理学上称为“共轭变量”）是“互补”的。当你精确定义了其中一个“符号”（比如位置），另一个“符号”（动量）就失去了确切的含义，变成了不可认识的量。这表明我们日常语言和经典物理的逻辑框架，在描述量子现实时已经失效了。

爱丁顿一个人就给出了这三种不同层面的解释，这恰恰反映了测不准关系丰富的内涵和人们理解它的困难。它就像一座多面的宝石，从不同角度看会折射出不同的光彩。对于我们学习者来说，这提醒我们一个重要的道理：科学知识的传播和理解是一个复杂的过程。一个深刻的原理往往不是一句话就能说清的，它需要我们从物理本质、测量过程和哲学观念等多个维度去逼近它的真相。而这种“多种面貌”的困惑，本身就是探索未知世界时最真实的体验。好的，同学们。今天我们要一起深入探讨一下物理学中一个非常深刻、甚至有些颠覆我们常识的概念——海森堡的“测不准关系”，或者叫“不确定性原理”。我们手中的这份文档，虽然看起来有点像学术论文的片段，充满了脚注和专业术语，但它恰好能带我们领略顶尖物理学家和哲学家是如何思考这个问题的。不要被它的形式吓到，我会像一位向导，带你们一步步解开其中的奥秘。让我们开始吧。

【原文】

① A. S. Eddington, *New Pathways of Science* (Cambridge U. P., Cambridge, 1935)。

② 海森堡原理对于爱丁顿想要调和相对论和量子论的企图至为重要。爱丁顿在1944年去世前十一年一直致力于这一任务。参见他的遗著Fundamental Theory (Cambridge U. P., Cambridge, 1948)的第一节(参照系的不确定性)或他关于输运问题的手稿, 发表于C. W. Kilminster, Sir Arthur Eddington (Pergamon Press, Oxford, 1966), pp. 244及其他。

③ E. McMullin, The Principle of Uncertainty (学位论文, Louvain天主教大学, 1954),未发表。

112 量子力学的哲学

“量子测不准原理”的各种不同的意义。他至少区分出四大类不同的诠释：即把海森堡原理看成是(1)一种不可能性原理，它说，不可能同时测量共轭变量；(2)一种关于测量精度的限制原理，它说，先前已得到的关于一个变量的知识的精确度将随着对其共轭量的测量而减低；(3)一种联系这一测量序列的散布和那一测量序列的散布的统计学原理；和(4)一种表示量子现象的二象性或互补性的数学原理。麦克马林对这个问题中所用的“同时”的意义和量子不连续性的讨论，今日仍然值得一读。几年后，柏林(民主德国)洪堡大学马克思列宁主义哲学系现任系主任赫尔茨，也选择了海森堡原理及其哲学意义作为他的博士学位论文的题目①。他们的意识形态虽然几乎正相反，但就纯物理的内容而言，麦克马林和赫尔茨却得出了实质上完全相同的结论。

【解读】

同学们，我们来看第一段。首先，请注意这些密密麻麻的脚注。它们引用了爱丁顿等大物理学家的著作，还有两位学者的博士论文。这告诉我们，我们正在接触的是一个非常严肃和深刻的学术话题。“测不准原理”远不止是你们在课本上看到的那个 $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$ 的公式那么简单，它背后充满了哲学思辨和激烈的争论。

这段文字的核心，是告诉我们“测不准原理”至少有四种不同的理解方式，或者说“诠释”。这就像我们看一幅抽象画，不同的人会看出不同的东西。我们来逐一拆解这四种诠释：

1. **不可能性原理**：这是最直接、最震撼的一种理解。它说，一个粒子的位置和动量（这里的“共轭变量”你们可以暂时就理解为位置和动量这对“老搭档”）是天生就不能被“同时”精确知道的。注意，这里说的是“不可能”，不是“我们技术不行做不到”，而是自然规律本身划下的一道红线，是原则上的禁止。就像你不可能造出永动机一样，这是物理定律的根本限制。
2. **测量精度限制原理**：这个角度更侧重于“测量”这个动作本身。它认为，测量行为会不可避免地干扰被测量的对象。想象一下，你想知道一个滚烫的汤圆的温度，你把温度计插进去，温度计本身会吸热，导致汤圆的温度降低。在宏观世界这个影响微不足道，但在微观世界，我们的任何“观察”都是

一次“猛烈的撞击”。你用光去照射一个电子来确定它的位置，光子就把电子撞飞了，它的动量就立刻变得不确定了。这个诠释强调的是我们作为观察者与微观世界之间无法避免的互动。

3. **统计学原理**：这个理解方式就更偏向数学了。它不谈论单个粒子，而是谈论对大量粒子进行的测量，或者对一个粒子进行成千上万次重复测量。它说的是，你测量得到的所有“位置”数据，会有一个分布的范围（统计学上叫“散布”或“标准差”）；你测得的所有“动量”数据，也有一个分布范围。这个原理规定了，这两个分布范围的乘积，必然大于一个常数。它是一个关于数据分布规律的统计学陈述。
4. **数学原理**：这是最根本的一种理解。它认为，测不准原理是微观粒子“波粒二象性”的直接数学体现。一个东西既然是“波”，它的位置就是弥散的、不确定的；而它的“动量”（与波长有关）却是相对确定的。反之，如果它更像一个“粒子”，位置很确定，那它对应的“波”就是由许多不同波长的波叠加而成，因此动量就变得不确定。测不准关系，就是这种内在矛盾属性在数学上的必然结果。

最后，文章提到一个很有趣的现象：来自天主教大学的麦克马林和来自马克思主义哲学系的赫尔茨，尽管意识形态截然相反，但在纯物理层面，他们对这个问题的结论却惊人地一致。这有力地说明了，科学探索具有超越意识形态的客观性。无论你信仰什么，物理规律就在那里，不偏不倚。

【原文】

80 预见到后面要讨论到的一些考虑，我们想在这里指出，在这些作者列举的种种诠释中，对于量子力学的发展最为重要的是以下两种：

1. 非统计诠释 I，按照这种诠释，原则上不可能同时精确确

① H. Hörz, Die philosophische Bedeutung der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelationen (洪堡大学学位论文, Berlin, 1960), 未发表。其摘要见 H. Hörz, “Die philosophische Bedeutung der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelationen”, Deutsche Zeitschrift für Philosophie 8, 702—709 (1960)。又见 H. Hörz, Atome, Kausalität, Quantensprünge (Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1964), pp. 30—85。海森堡关于物理学的哲学（特别是他对测不准关系的解释）也最早在 Louvain 天主教大学的哲学博士学位论文 (1964) 的题目。见 P. A. Heelan, S. J., Quantum Mechanics and Objectivity (Nijhoff, The Hague, 1965), 特别是 pp. 36—43。和麦克马林相反，希兰主要感兴趣的是海森堡的在客观性问题方面的哲学涵义和“实在的危机”。不像麦克马林，希兰的结论同赫尔茨得到的结论有显著的不同。

第三章 测不准关系 113

定描述一个物理系统的共轭变量之值；

2. 统计诠释 II，按照这种诠释，两个共轭变量的标准偏差之积有一个下限① $h/4\pi$ 。

我们已经看到， I_1 来源于海森堡的理想实验，多年来它一直是占统治地位的诠释，并被几乎所有的量子力学教科书所采用。 I_2 是玻普尔提出的，并得到马格瑙[H. Margenau]和量子力学系统诠释的提倡者们的改进(这个我们以后将会讨论)，它从1965 年以来不断赢得了更多的承认。一般认为 I_1 是建立在包含有特定理想实验的论证之上的，但 I_2 则不然，人们认为它是作为理论的形式体系本身的逻辑的数学结论建立起来的。鉴于这两个派诠释之间的论证还方兴未艾，我们对这两种诠释之间的逻辑关系以及它们在多大程度上得到经验实验的支持作一些说明以结束本章是值得的。

【解读】

好了，同学们，刚才我们了解了四种对测不准原理的诠释，现在作者为我们划出了重点。在所有的争论中，有两派观点最为重要，成为了量子力学发展的“主线剧情”。我们把它们分别标记为 I_1 和 I_2 。

I_1 ：非统计诠释。这其实就是我们刚才谈到的第一种“不可能性原理”。它关注的是**单个粒子**。它告诉我们，对于眼前的这一个电子，在任何一个确定的瞬间，你都**不可能**同时拥有它精确的位置值和精确的动量值。这不是测量技术的问题，而是这个电子的内禀属性。这种观点非常符合直觉，也最广为人知，几乎所有大学物理入门教材介绍的都是这个版本。它的主要依据是什么呢？是海森堡著名的“伽马射线显微镜”**思想实验**。这个实验只存在于想象中，但它生动地展示了测量行为如何干扰微观粒子，从而导致不确定性。所以， I_1 的根基是物理直觉和思想实验。

I_2 ：统计诠释。这对应的是我们刚才说的第三种“统计学原理”。它的主角不是单个粒子，而是**粒子集体**（系综），或者是对单个粒子进行**无数次测量后得到的数据集**。它不说“不可能同时知道”，而是说，你测量出的一大堆位置数据的“标准偏差”（你可以理解为数据的离散或“胖瘦”程度），与你测量出的一大堆动量数据的“标准偏差”，**它俩的乘积必然大于等于一个常数。这个观点非常数学化，非常严谨。**它的依据不是思想实验，而是从量子力学的**核心数学框架**（比如薛定谔方程和算符代数）中严格**推导**出来的。只要你接受整个量子力学理论，你就必须接受 I_2 这个结论，它就像是公理推导出定理一样，逻辑上无懈可击。

现在，你们看出了这两派的区别和争论的焦点了吗？

I_1 源于一个生动的、启发性的**物理图像**（显微镜思想实验），但思想实验毕竟不是严格的逻辑证明。 I_2 源于冰冷的、无可辩驳的**数学推导**，但它描述的是统计结果，对于“单个粒子在那一瞬间到底发生了什么”这个问题，它保持了沉默。

所以，物理学家们就在争论：到底哪个才是测不准原理的真正灵魂？是那个关于单个粒子命运的“哲学禁令”(I_1)，还是那个关于海量数据规律的“数学法则”(I_2)？它们之间到底是什么关系？一个是另一个的原因吗？还是它们只是从不同侧面描述了同一个真相？这就是接下来文章要带我们深入思考的问题。这个过程，展现了物理学从依赖直观图像到依靠数学逻辑的深刻转变。

【原文】

正如我们在历史叙述中表示过的那样，像海森堡的 γ 射线显微镜之类的思想实验，是把它们当成是支持 I_1 的严格论据，那是过于牵强了。另一方面， I_2 实质上作为量子力学基本式的一个数学结论，若不对整个理论进行重大修正，是无法否定的。那么，是否由此就得出结论说， I_1 没有任何逻辑根据呢？

① 有这样一个限制下并不必然意味着其中包括的标准偏差互成倒数关系，即互成反比(反比要求)。因为若无附加的假设，一个不等式如 $\Delta q \Delta p \geq h/4\pi$ 绝不能变成一个等式如 $\Delta q = \text{常数}/\Delta p$ 或 $\Delta p = \text{常数}/\Delta q$ 。一般说来并无保证的反比要求似乎可以追溯到海森堡对他的原理的原来的说法和玻尔对“倒数测不准量”这个术语的再使用。关于反对反比要求普遍成立的论据和它严格成立的特殊情况(例如在束缚态的绝热变化的情况中)的例证，见P. Kirschenmann, “Reciprocity in the uncertainty relations”, Phil. Sci. 40, 52—58 (1973)。

114 量子力学的哲学

81 同那些断然否认 I_1 或声称 I_1 与 I_2 之间有一条不可逾越的逻辑鸿沟的人相反，我们主张 I_1 是 I_2 的一个逻辑结论，如果承认一定的测量理论假设A的话。根据这个假设，这里涉及的每一测量都是第一个一类测量①(用泡利的术语)，亦即每一测量都是可重复的，而且如果立即重复的，将得出与它前面的一次相同的结果。

为了表明根据这个假设 I_2 蕴涵着 I_1 ，我们像下面这样来论证。假定能够对一个单系统以任意的精确度同时测量两个正则共轭变量。那么就应当也能够(至少在原则上)滤出一个子系统，对于属于这个系统的系统，这些变量的数值处于任意小的区间内。然后由假设A得到，可以把两个变量无论哪一个的标准偏差都弄成任意小，于是两个标准偏差之积就不能有一个正的下限，这同 I_2 矛盾。只要能够用第一类测量来测量所讨论的变量，那么就没有理由保持 I_2 而又否定 I_1 。换句话说，在保留 I_2 的前提下放弃 I_1 的必要条件是相应的第一类测量的不成立。我们看到，全部争端是同量子力学测量理论密切相连的，测量理论是整个量子力学理论的最成问题和最有争议的一部分。

【解读】

这段文字非常关键，它试图在看似对立的 I_1 和 I_2 之间架起一座逻辑的桥梁。

首先，作者坦率地承认，海森堡的伽马射线显微镜这类思想实验，虽然很有启发性，但作为严格的逻辑论据是“过于牵强”的。而 I_2 ，作为数学推论，其地位是“无法否定的”。这就提出了一个尖锐的问题：难道

我们教科书里学的那个更直观的 I_1 （单个粒子不可能同时精确测量），真的只是一个没有坚实逻辑基础的“故事”吗？

作者的回答是：不！ I_1 并非空中楼阁，它可以从坚如磐石的 I_2 推导出来。但这个推导需要一个前提，一个关键的假设，作者称之为“**假设 A**”——即我们进行的测量都是“**第一类测量**”。

那么，什么是“第一类测量”？这个术语听起来很唬人，但它的核心思想很简单，就是指一种**理想的、可重复的测量**。想象一下，你用一把尺子量桌子的长度，测出来是1.2米。所谓“第一类测量”，就意味着如果你**立刻**再测一次，结果**必须**还是1.2米。这次测量不仅告诉你桌子的长度，还在某种意义上把桌子的长度“固定”在了1.2米这个状态上。

好了，有了这个“第一类测量”作为武器，作者开始进行一个非常漂亮的**反证法**论证，我们一起来梳理一下这个逻辑链条：

1. **大胆假设**：我们先假设 I_1 是错的。这意味着什么？意味着“原则上**可以**同时精确地测量一个粒子的位置和动量”。
2. **筛选粒子**：如果上一步的假设成立，那么我们就可以利用这种神奇的测量技术，从一大堆粒子中筛选出这样一批“精英粒子”：它们的位置都在一个极其微小的范围内，同时，它们的动量也都在一个极其微小的范围内。
3. **应用“第一类测量”**：因为我们用的是“第一类测量”，测量完之后，这些粒子的位置和动量就被“固定”住了。我们再对这批“精英粒子”进行统计，会发现什么？
4. **计算标准差**：这批粒子的位置值都挤在一起，所以它们位置数据的“标准偏差” Δx 就会变得任意小，几乎是0。同理，它们动量数据的“标准偏差” Δp 也会任意小，也几乎是0。
5. **导出矛盾**：那么， Δx 乘以 Δp 的结果，就会是“一个几乎为0的数”乘以“另一个几乎为0的数”，结果当然也几乎是0。但这与我们坚不可摧的数学结论 I_2 ($\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$ ，即乘积必须大于一个正数) 发生了**尖锐的矛盾**！
6. **得出结论**：既然从“ I_1 是错的”这个假设出发，推出了一个与铁律 I_2 相矛盾的荒谬结果，那就说明我们最初的假设一定是错误的。因此， **I_1 必须是正确的。**

这个论证精彩地告诉我们，只要你承认数学上更牢固的 I_2 ，并且接受“第一类测量”这个看似合理的假设，那么关于单个粒子的不确定性 I_1 就是一个必然的逻辑结果。然而，作者在最后也点明了，这个论证的关键“第一类测量”，恰恰是整个量子力学理论中最让人头疼、争议最大的部分。什么是测量？测量过程中到底发生了什么？这些问题，至今仍然是物理学和哲学的最前沿。

【原文】

现在到经验支持的问题上来。我们可以毫不犹豫地说，在物理学史上很少见到过一条具有这样普遍的意义原理，却只得到如此之少的实验检验的证实。事实上，就 I_1 而言，目前似乎还没有什么办法可以以足够低的精度同时测量单个电子的位置和动量，以估计所含的误差。尽管如我们即将看到的，只有极少数“极端分

子”根本否认这量变的即时可测性，但的确也从来没有以对我们的问题多少有点意义的精度对个粒子进行过这样的测量。

第三章 测不准关系

【解读】

同学们，在经过了前面一系列烧脑的哲学思辨和逻辑推理之后，我们终于回到了物理学的根基——实验。一个物理理论，说得再天花乱坠，最终还是要接受实验的检验。那么，关于测不准原理，实验证据又是怎样的呢？

作者在这里抛出了一个非常诚实，甚至可以说有些惊人的观点。他指出，像测不准原理这样在物理学中具有如此根本性地位的原理，它所获得的**直接实验验证**，可以说是“少得可怜”。

这可能会让大家感到困惑：一个没有太多实验证实的原理，怎么就成了物理学大厦的基石了呢？

这里的关键在于区分“直接验证”和“间接支持”。作者主要说的是，针对 I_1 那种诠释——即试图去“同时”测量“单个”电子的位置和动量，然后去检验这两个测量值的误差乘积是否真的大于一个常数——这样的**直接实验**，**在技术上是极其困难的，至今也未能以足够高的精度实现**。

为什么这么难？这又回到了我们之前讨论的测量干扰问题。你要精确测量一个电子的位置，就必须用波长极短的光子去撞它，但这会剧烈地改变它的动量。反之，如果你想温柔地测量它的动量，你用的光子波长就会很长，这又会让它的位置变得模糊不清。在真实的实验室里，我们无法像海森堡的思想实验那样，随心所欲地控制光子去“恰到好处”地探测电子。现实的技术限制，让我们无法搭建一个完美的实验平台来直接、干净地验证 I_1 。

但是，请注意，这**绝不意味着**测不准原理是错误的或者不可信的。它的正确性，更多地来自于**间接的、体系性的支持**。整个量子力学的数学大厦是建立在包括测不准关系在内的一系列基本假设之上的。而由这个理论大厦推导出的无数个具体预测——比如原子的能级结构、化学键的性质、半导体的电学行为、激光的原理等等——都在过去的一个世纪里，经受住了无数次、极其精确的实验检验。

打个比方，我们虽然没有直接“挖开”地基去检查每一根钢筋，但是整栋摩天大楼历经风雨、巍然屹立，楼里所有的水电系统都运转正常，这就最有力地证明了它的地基是稳固可靠的。测不准原理就是量子力学这座大厦的“地基”之一。虽然直接“开挖”地基去验证它很困难，但整个大厦的宏伟与稳定，就是它正确性的最好证明。

这告诉我们，现代物理学的发展，不仅仅依赖于一两个“决定性实验”，更依赖于整个理论体系的逻辑自洽性，以及它与海量不同实验现象的整体符合程度。好的，同学们，今天我们要一起深入探讨一个你们既熟悉又陌生的话题——量子力学中的“测不准关系”，也就是海森伯不确定性原理。你们在课本上学到的可能是一个相对简化的版本，但今天我们将通过解读一篇专业的学术文章，来触摸这个理论背后更深刻、更具争议的哲学层面。这会像一次思想的探险，准备好了吗？让我们开始吧。

【原文】

例如，我们来提一个遵循这条线索的典型倡议。十五年前，加州研究公司的里亚逊曾建议，应用场离子显微镜技术，在极低温度(0.4°K)下用脉冲场对金属尖须上的吸附原子[adatoms]退吸来直接检验时间-能量测不准关系。但是所倡议的这个实验，虽然里亚逊在1959年就声称“在技术上是可行的”，似乎一直没有做过。那些争辩说用 I_1 的意义来解释的海森伯原理从没有在实验上证实过的人肯定是有充足的理由的，但是也应当说迄今做过的实验也从未否定过这个原理。

I_2 虽然有坚实得多的经验支持。实际上，许多作为海森伯关系的证明而被提到测量正是 I_2 的实验证明。例如，我们讲一下对这个问题的一项最近的研究。旧金山大学物理系主任阿伯戈蒂考察了一些精确度很高的实验同海森伯关系符合到什么程度的问题。虽然阿伯戈蒂前提的问题是判断“现代的实验究竟是受测不准原理限制还是受用来进行实验的仪器限制”——在他看来，如果前一种情况得到证实，那就是“测不准原理的一个实际证明”，而如果最后一种情况，则测不准原理仍然是一种只有“纯粹学说意义”的东西——但如果对他的研究仔细分析，就可以看出，它正

① P. R. Ryason, “Proposed direct test of the uncertainty principle”, *Phys. Rev.* 115, 784—785(1959).

② J. C. Albergotti, “Uncertainty principle-Limited experiments”, *The Physics Teacher* 11, 19—23(1973).

量子力学的哲学

是对 I_2 经经验支持到什么程度的最小的考察。他审查过的实验中，有直线气槽的各种实验，其不确定量之积的下限约为 $3 \times 10^{26}h$ ；有光的角动量的测定，下限约为 $4 \times 10^{14}h$ ；有一个高分辨率电子显微镜实验，下限为 $20h$ ；而迄今所得的最小的不确定量积属于铁57的穆斯保效应[Mössbauer effect]实验，约为 $6h$ 。显然， I_2 虽然也许还未被证实，但它远不是被判明为假。

【解读】

同学们，让我们来仔细剖析这段文字。它一上来就抛出了一个非常关键的问题：我们通常理解的“测不准原理”，其核心含义到底是什么？并且，它在实验上被证实了吗？

文章首先提到了两种不同的解释，这里用 I_1 和 I_2 来代指。虽然原文没有明确定义它们，但我们可以从上下文推断出它们的区别。 I_1 很可能就是你们在课本上学到的那个经典故事：**测量的行为本身会干扰被测量的对象**。比如，你想用一束光去看一个电子的位置，光子就像一颗小台球，撞击了电子，把它撞飞了，于是它的动量就改变了，变得不确定了。这是一种关于“单次测量”的“干扰”理论。然而，作者紧接着就投下了一颗“重磅炸弹”：早在1959年，就有人提出了一个技术上可行的实验，可以直接检验这个 I_1 版本的理论，但这个实验似乎从来没有真正做过！这意味着，我们最耳熟能详的那个关于“测量干扰”的故事，在严格的科学意义上，竟然是一个未经直接实验证实的“传说”。

那么，科学家们是拿什么来支持测不准原理的呢？这就引出了 I_2 。 I_2 解释的是一个**统计学上的规律**。它不关心单次测量发生了什么，而是关心对一大群完全相同的粒子进行重复测量后，结果的分布情况。想象一下，你有一万个状态完全相同的电子。你对其中五千个测量位置，会得到一系列稍有不同的位置值，这些值有一个分布范围（即不确定度 Δx ）；你再对另外五千个测量动量，同样会得到一个动量的分布范围（不确定度 Δp ）。 I_2 版本的测不准原理说的是，这两个分布范围的乘积（ $\Delta x \cdot \Delta p$ ）必然会大于或等于一个常数（ $\hbar/2$ ）。

文章提到的阿伯戈蒂所考察的那些高精度实验，比如穆斯堡尔效应（一种能够极精确测量原子核能级跃迁能量的技术），测出来的结果都远远大于理论上的最小值（比如普朗克常数 h 的6倍、20倍甚至更多）。这些实验结果，都为 I_2 这个“统计版本”的理论提供了非常强有力的支持。但请注意作者严谨的措辞——“远不是被判明为假”，这体现了科学精神：再多的支持性证据，也只能让我们更有信心，而不能轻易下结论说“它被绝对证实了”。

所以，第一段的核心思想是：测不准原理存在至少两种理解方式，一种是广为流传但缺乏直接证据的“测量干扰”论（ I_1 ），另一种是拥有大量间接实验支持的“统计分布”论（ I_2 ）。这个区分，为我们接下来理解更深刻的哲学思辨铺平了道路。

【原文】

篇幅不允许我们描述对测不准关系的本质的其他最近的研究了。为了表明这种讨论仍然是有实际兴趣的，我们向读者推荐普洛洛夫的一篇短文，德布罗意用测量前和测量后的不确定性对测不准关系的重新表述和关于提出一个思想实验以否定测不准原理的一个倡议。最后我们想指出，某些现代发展已经为建立关于不相容的可观察量的同时测量的理论铺平了道路。早明确认这种可能性的之人一是马格瑙，他在1950年就宣布了这一点。因为根据马格瑙的看法，海森伯原理仅仅是使一个位置测

① Д. Л. Прохоров, “О соотношениях неопределенностей в квантовой механике”, *Вестник Ленинградского Университета* 22, 29—35(1968).

② L. de Broglie, “Sur l'interpretation des relations d'incertitude”, *Comptes Rendus* 268, 277—280(1969).

③ M. C. Robinson, “A thought experiment violating Heisenberg's uncertainty principle”, *Canadian Journal of Physics* 47, 963—967(1969); J. J. Billette, C. Campillo, C. Lee, R. D. McConnell, G. Pariseau, and G. Fischer, “Concerning 'A thought experiment violating Heisenberg's uncertainty principle'”, 同上, 2415—2416; L. E. Ballentine, “The uncertainty principle and the statistical interpretation of quantum mechanics”, 同上, 2417—2418.

④ H. Margenau, *The Nature of Physical Reality* (McGraw-Hill, New York, 1950), pp. 375—377.

第三章 测不准关系

系综[Kollektio]中的散布同个动量测量系综中的散布联系起来，它根本不涉及“任何一种单次测量中可以期望的精度”。因此，马格瑙看不出使用两个显微镜有什么困难：一个用 γ 射线，另一个用合适的、较长

的波长的波，一个用来确定电子的位置，另一个用来确定它的动量。在马格瑙看来，并没有哪一条量子力学定律从根本上妨碍这样一种双重测量获得成功。“如果重复这种双重测量，那么 x 和 p 之值就会按照不准原理散布。当然不会有谁在一次这样的测量之后就说他已精确知道 x 和 p 了，就像他不会在一次 x 测量之后就说他知道电子的位置一样。前一种说法之所以不对，不是因为它同测不准原理矛盾，而是因为它和后一种说法一样，同物理态的量子力学意义相矛盾”。

这些观念只是从六十年代中期以来才得到进一步的加工。

【解读】

这段文字将我们的讨论推向了高潮，提出了一个可能颠覆你们认知的新观点。首先，作者通过引用一系列的学术论文（那些脚注就是证据），告诉我们关于测不准原理的争论在当时（上世纪六七十年代）依然非常激烈。这说明科学并非一成不变的真理集合，而是一个不断探索、充满辩论的动态过程。

接下来，核心人物——马格瑙登场了。他的观点非常大胆，可以说是对传统理解的彻底“松绑”。马格瑙认为，海森伯原理的本质，根本就不是限制**单次测量**的精度！它说的其实是我们上一段讨论的 I_2 版本的故事：它只联系了两个**系综（Kollektio/ensemble）**的统计散布。这里的“系综”是一个关键术语，它指的是由大量处于相同状态的、完全相同的系统组成的假想集合。简单来说，就是一个庞大的“粒子军团”。马格瑙的意思是，测不准原理只是说，你对这个“军团”里所有士兵的位置进行测量，得到的位置值有一个分布范围；再对所有士兵的动量进行测量，得到的动量值也有一个分布范围，这两个范围的乘积不能小于某个值。

这个观点引出了一个惊人的推论：如果原理只管“统计”，那它就管不着“个体”了。马格瑙因此提出，在理论上，并没有什么能阻止我们设计一个超级仪器——比如用两台显微镜，一台用波长极短的 γ 射线来精确测量一个电子的位置，另一台同时用某种不怎么干扰动量的方式来精确测量它的动量。在“咔嚓”一下的瞬间，我们**可能真的可以同时得到一个精确的位置值 x 和一个精确的动量值 p** 。

这听起来是不是完全违反了你们学过的知识？别急，马格瑙的解释是：关键在于你如何理解这次测量。你确实得到了 (x, p) 这一对精确的数值，但这只是“沧海一粟”。如果你对这个“粒子军团”里的每一个电子都进行同样的同时测量，你会得到成千上万对不同的 (x, p) 值。当你把这些值画在坐标图上时，它们会散落成一片“云”。海森伯原理描述的，正是这片“云”在 x 方向上的宽度与 p 方向上宽度的关系。所以，一次测量后，你不能说“我**知道**了这个电子的状态”，因为量子力学里的“态”本身就包含了这种统计上的不确定性。这就像你只抛了一次硬币，得到了正面，你不能因此就说“这枚硬币的状态就是正面”，它的状态依然是“50%正面，50%反面”的概率分布，这个性质需要无数次投掷才能体现。

总而言之，马格瑙的观点将测不准原理从一个关于“测量能力局限”的物理操作问题，提升到了一个关于“量子态内在统计性质”的深刻哲学层面。这个思想在当时是革命性的，它告诉我们，微观世界的不确定性，可能不是因为我们“看不清”，而是这个世界“天生如此”的统计本性。好的，各位同学，请坐好。今天我们来解读一段关于量子力学深层问题的文本。别担心，虽然标题听起来很“哲学”，但我会像一位向导，带你们一步步探索这个奇妙又令人困惑的世界。我们将一起看看，物理学的前沿是如何与深刻的哲学问题交织在一起的。

我们开始吧。

【原文】

① 最后一页第十章.

② E. Arthurs and J. L. Kelly, “On the simultaneous measurements of a pair of conjugate observables”, *Bell System Technical Journal* 44, 725—729(1965), C. Y. She and H. Heffner, “Simultaneous measurement of noncommuting observables”, *Phys. Rev.* 152, 1103—1110(1966), E. Prugovečki, “On a theory of measurement of incompatible observables in quantum mechanics”, *Canadian Journal of Physics* 45, 2173—2219(1967), J. L. Park and H. Margenau, “Simultaneous measurability in quantum theory”, *International Journal of Theoretical Physics* 1, 211—283(1968), H. D. Dombrowski, “On simultaneous measurements of incompatible observables”, *Archive for Rational Mechanics and Analysis* 35, 178—210(1969), J. L. Park and H. Margenau, “The Logic of non-commutability of quantum mechanical operators and its empirical consequences”, 载于 *Perspectives in Quantum Theory*, W. Yougrau and A. van der Merwe, eds. (MIT Press, Cambridge, 1971), pp. 37—70, E. Prugovečki, “A postulational framework for theories of simultaneous measurement of several observables”, *Foundations of Physics* 3, 3—18(1973), 和对此文的一个批评, 见H. Margenau and J. L. Park, “The Physics and the semantics of quantum measurement”, 同上, 19—28.

【解读】

大家好！看到这段文字，你们的第一反应可能是：“哇，这是什么？天书吗？”别急，这其实是学术著作里非常常见的一部分——参考文献列表。可以把它想象成作者在向我们展示他的“情报来源”或者“武功秘籍”。每一条都指向一篇由其他科学家撰写的、经过严格审核的学术论文。这正是科学研究的基石：它不是凭空想象，而是建立在前辈们工作的基础之上，是一场跨越时空的学术对话。

我们来仔细看看这些“情报”的内容。你们会发现一些反复出现的关键词，比如“simultaneous measurements”(同时测量)、“conjugate observables”(共轭可观测量)、“noncommuting observables”(不对易可观测测量)。这些词听起来很专业，但它们指向了量子力学中最核心、最反直觉的一个概念，这个概念你们可能听说过——海森堡的“不确定性原理”(或称“测不准原理”)。

这个原理告诉我们，有些物理量的“组合”是无法被同时精确测量的。最经典的例子就是微观粒子的“位置”和“动量”。你把它的位置看得越清楚，它的动量（可以通俗理解为它的运动状态）就越模糊；反之亦然。这种天生“死对头”的物理量，就被称为“共轭可观测量”或“不对易可观测测量”。“不对易”这个词来自数学，意思是运算的顺序会影响结果。想象一下，测量一个粒子的位置（操作A）再测量它的动量（操作B），和你先测量动量（B）再测量位置（A），得到的结果是完全不同的。这种“先A后B ≠ 先B后A”的特性，就是“不对易”。

这段参考文献列表展示了在1960到1970年代，物理学家们为了理解这个“同时测量”的极限，进行了多么激烈和深入的探讨。他们不仅从物理上，也从数学和逻辑上，试图为这个看似矛盾的现象建立一个统一

的理论框架。所以，这不仅仅是一串枯燥的文献，它是一张藏宝图，记录了科学家们探索量子世界基本规则的艰辛足迹。

【原文】

量子力学的哲学

但是迄今对这些理论的最基本的争论点还远远未达到意见一致。看来这主要是由于对“同时测量”的定义众说纷纭所致。要对这些理论的正确性和前景作出公正的判断，肯定还为时过早。由于这些原因，也由于对这个问题做透彻的讨论需要预先对量子测量理论有一定的熟悉，我们就不在这里讨论它们的细节了。

【解读】

好的，同学们，在看完了那张“藏宝图”之后，作者在这里为我们做了一个总结，并解释了为什么他决定“点到为止”。这个段落虽然简短，但信息量巨大，它揭示了科学前沿的一个重要特征：不确定性和争议。

首先，作者开门见山地指出，对于上一段文献中提到的那些理论，“最基本的争论点还远远未达到意见一致”。这告诉我们一个重要的道理：科学并非总是由一堆确凿无疑的公式和定理构成。尤其是在探索未知领域时，它更像是一片充满迷雾的战场，不同的科学家团队（就像前面文献列表里的那些名字）会提出各自的理论模型，互相辩论、互相批评。这正是科学充满活力、不断进步的方式。

那么，争论的核心是什么呢？作者一针见血地指出了问题所在：“主要是由于对‘同时测量’的定义众说纷纭所致。”这点非常关键！想象一下，如果大家要讨论“什么是最好的运动”，但每个人对“最好”的定义都不同——有的人认为是“最能锻炼身体的”，有的人认为是“最有观赏性的”，还有人认为是“最容易上手的”，那这场讨论永远不会有结果。在物理学中，“定义”就是一切的基石。对于“同时测量”这个概念，物理学家们无法达成共识。这究竟意味着我们真的在同一瞬间测量两个量，还是用一个巧妙的装置间接地推算出它们的值？不同的定义会引出完全不同的理论和结论。当最基本的概念都无法统一时，整个理论大厦就摇摇欲坠。

最后，作者做出了一个非常诚实且负责任的决定：“我们就不在这里讨论它们的细节了”。他给出了两个原因：第一，现在下结论“为时过早”，科学界自己都还没争论明白，作为一个讲述者，不应该把尚在摇篮中的、不成熟的理论当作定论教给大家。第二，这个问题太复杂，“需要预先对量子测量理论有一定的熟悉”。他清楚地知道自己的读者（比如我们）的知识背景，选择不深入这个“兔子洞”，是为了避免我们消化不良。这既是对科学严谨性的尊重，也是对读者的负责。因此，这一段不仅仅是对一个物理问题的概述，更是一堂关于“科学精神”的课：承认未知，尊重争议，并保持谦逊。它告诉我们，科学的边界，正是哲学思考开始的地方。

1. P. Friedländer, *Plato-An Introduction* (pantheon Books, New York, 1958), p. 251. ↩ ↩ ↩ ↩ ↩
2. M. Jammer, "Indeterminacy in Physics", 载于 *Dictionary of the History of Ideas* (Charles Scribner's Sons, New York, 1973), Vol. 2, pp. 586–594. ↩ ↩ ↩ ↩
3. H. Bergson, *Essai sur les Données Immédiates de la Conscience* (Alcan, Paris, 1889, 1909, 1938); 英译本 *Time and Free Will, an Essay on the Immediate Data of Consciousness* (Sonnenschein, London, New York, 1910; George Allen & Unwin, London, 1913, 1950)。中译本: *时间与自由意志* (吴士栋译, 商务印书馆, 1958)。 ↩
4. L. de Broglie, "Les Conceptions de la physique contemporaine et les idées de Bergson sur le temps et le mouvement", 载于 *Physique et Microphysique* (A. Michel, Paris 1947), pp. 191–211; 英译本 "The concepts of contemporary physics and Bergson's ideas on time and motion", 载于 *Physics and Microphysics* (Grosset and Dunlap, New York, 1966), pp. 186–194。又见 Bergson and the Evolution of Physics, P. A. Y. Gunter, ed. (University of Tennessee Press, Knoxville, 1969), pp. 45–62, 以及 M. Capek, *Bergson and Modern Physics* (Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 7) (Reidel, Dordrecht-Holland, 1971), Chap. 12, pp. 284–291. ↩