



雅科夫·阿哈罗诺夫访谈录《海森堡是对的，而我们忽视了他》：完整翻译与深度专业解读

引言

“关于量子力学，我们怎么可能在这么长的时间里错得如此离谱？”。这句振聋发聩的诘问，出自当代最伟大的量子物理学家之一，雅科夫·阿哈罗诺夫（Yakir Aharonov）教授。他并非无名之辈，而是与理查德·费曼（Richard Feynman）等巨匠同时代的传奇人物，师从另一位理论物理学巨擘大卫·玻姆（David Bohm）。这篇访谈录不仅仅是一次对话，更像是一份革命性的宣言，它挑战了近一个世纪以来被物理学界普遍接受的量子力学正统教义。

阿哈罗诺夫教授的学术生涯硕果累累，其贡献深刻地改变了我们对物理实在的理解。他与玻姆共同发现了著名的阿哈罗诺夫-玻姆效应（Aharonov-Bohm effect），首次揭示了电磁势在量子世界中的根本地位；他开创了弱测量（weak measurement）理论，为我们提供了一种“温柔”地窥探量子系统而不干扰其状态的方法；并以此为基础，构建了颠覆性的“双态矢量理论”（Two-State Vector Formalism, TSVF）。

本报告旨在为对物理学充满好奇心的高三学生，提供一份对这次重要访谈的完整呈现与深度剖析。报告将遵循独特的“三段式”结构：首先，我们将忠实地呈现访谈内容的**中文译文**，确保没有任何遗漏；紧接着，针对每一段译文，我们将提供一段篇幅相当甚至更长的**深度解读**。这份解读将运用生动的类比、清晰的逻辑和必要的背景知识，将阿哈罗诺夫教授深邃的思想转化为你能够理解和吸收的营养。

准备好，你对现实、时间、因果律的既有观念，即将受到一次根本性的挑战与拓展。这不仅是一次知识的学习，更是一场思维的探险。

第一部分：挑战正统——对标准量子力学叙事的批判

在本部分中，阿哈罗诺夫教授首先向量子力学的“标准故事”（主要基于哥本哈根诠释）发起了猛烈的攻击。他明确指出，我们被告知的关于量子力学的三个核心观念——内在随机性、测量必然干扰以及波粒二象性——是“完全错误的”。

1.1 无因随机性之谜

译文

我将告诉你人们通常讲述的那种关于量子力学的故事。他们会说这样的话。首先，他们说与经典物理学相反，量子世界不是决定论的。这意味着，即使我们知道了在一个给定系统（比如一个原子）所有应该知道的信息，我们也无法预测它何时会发射一个光子。一个原子可能在一秒后发射光子，而另一个完全相同、环境也完全一样的原子，却可能在一小时后发射光子，并且完全没有任何理由。

这就是让爱因斯坦勃然大怒的事情。他说：“我不相信上帝会掷骰子。”我不相信自然是反复无常或不讲道理的，因为在科学中我们一直认为，任何发生的事情都必须有其原因，而在这里，一个原子这样做，另一个那样做，却毫无道理。

所以人们谈论量子力学时会说，我们只能接受世界是“非决定论的”，而且“毫无理由”。我们只能把它当作一条公理来接受。而我的第一点是，这是不正确的。事实上，我们可以证明，恰恰因为自然是非决定论的，它才允许量子系统拥有在决定论自然中不可能拥有的属性。所以，这种非决定论背后是有原因的，我将会描述它。一旦你找到了原因，那么自然就不再是反复无常的了。它这样做是有其“活生生”的理由的。所以，这是人们告诉我们的关于量子力学的第一个错误观点：世界毫无理由地就是非决定论的。其实，它是有原因的。

深度解读 在标准的物理教科书中，量子力学的一个核心特征是其内在的、不可避免的“非决定论性”（Indeterminism）。这与我们日常经验中的经典物理世界截然不同。经典世界是决定论的：如果你知道一个台球的初始位置、速度以及所有作用在它身上的力，你就能精确地预测它在未来任何时刻的运动轨迹。然而，在量子世界，情况并非如此。

标准的哥本哈根诠释告诉我们，即使你掌握了一个放射性原子在当前时刻的所有信息，你也永远无法准确预测它将在哪一刻发生衰变。你只能给出一个概率，比如它在下一秒内衰变的概率是50%。正如阿哈罗诺夫所描述的，两个完全一模一样的原子，在完全相同的环境下，一个可能瞬间衰变，另一个可能等待数小时。这种差异并非源于我们知识的匮乏，而是被认为是自然界的一个基本事实：事件的发生存在一种纯粹的、无缘无故的随机性。这就像一枚被完美抛起的硬币，在它落地之前，其结果并非只是我们不知道，而是它真的没有确定的结果。

爱因斯坦终其一生都无法接受这种观点，他认为这种“随机性”只是表明我们的理论还不完备，背后一定隐藏着我们尚未发现的“隐变量”在作祟。他的名言“上帝不掷骰子”正是这种信念的体现。然而，几十年来的实验（如贝尔不等式的检验）已经极大地压缩了定域隐变量理论的生存空间，使得大多数物理学家接受了这种内在的随机性。

但阿哈罗诺夫提出了一个革命性的反驳。他并不试图回到爱因斯坦的决定论立场，而是对“随机性”本身提出了一个更深刻的问题：它为什么存在？他认为，这种非决定论并非自然的缺陷或怪癖，而是一个至关重要的“特性”，它存在是为了一个“活生生的理由”：为量子系统赋予在决定论世界中无法拥有的、更丰富的属性。

这里的逻辑是颠覆性的。阿哈罗诺夫实际上在说，标准诠释把因果关系搞错了。我们不应该将随机性视为一个需要被解释的“问题”，而应该将其视为一个实现更深层次现实的“解决方案”。这个更深层次的现实，就是他理论的核心——一个过去和未来共同决定现在的世界。如果过去完全决定了现在（即决定论），那么未来就没有任何“发言权”了。因此，标准量子力学中看似“毫无理由的随机性”，实际上是为未来的影响预留出的必要“空间”或“自由度”。两个原子衰变时间不同，并非“毫无理由”，其“理由”是它们共享了相同的过去，但可能被“后选择”到了不同的未来。这种看似随机的表象，恰恰是时间对称因果律得以运作的舞台。

1.2 破坏性测量之谜

译文

接下来，我们被告知的关于量子力学或量子领域的事情是，我们对量子系统进行的每一次测量都必然会干扰它。干扰之大，以至于我们无法说我们看到的就是测量之前那里的东西，因为你所看到的大部分内容，实际上是因为你测量方式的干扰所致。

这又是完全错误的。我发现了一种新的测量方式，我称之为“非干扰性测量”或“弱测量”——这种测量完全不干扰系统。然而，它仍然能告诉我们关于系统的所有需要的信息，前提是我们能有许多可供测试的样本。

我们将更仔细地讨论这一点，但其核心思想是，量子领域中并非没有实在性（reality）。实在性是存在的，但为了找到它，你必须进行正确的、不干扰这个实在性的测量。

深度解读 海森堡不确定性原理是量子力学的基石之一。它通常被通俗地解释为“观察者效应”：你无法在不影响它的情况下观察一个东西。例如，要“看到”一个电子的位置，你至少需要用一个光子去撞击它。这个光子携带着能量和动量，一旦撞上电子，就必然会改变电子的动量。因此，你越精确地测量它的位置（使用波长更短、能量更高的光子），你对它的动量干扰就越大，反之亦然。这种观念深入人心，导致了一种普遍的看法：量子实在是在测量行为中被“创造”出来的，而在测量之前，谈论一个粒子“真实”的位置或动量是没有意义的。所谓的“波函数坍缩”就是对这一过程的描述：一个弥散的、包含所有可能性的概率波，在测量的瞬间，突然“坍缩”成一个确定的现实。

阿哈罗诺夫再次宣称，这个“标准故事”是错误的。他的革命性贡献——“弱测量”理论，直接挑战了“测量必然剧烈干扰系统”的教条。

那么，什么是弱测量？我们可以用一个生动的比喻来理解。想象一下，你想测量一个游泳池的平均水温。

- **强测量 (Strong Measurement)**：这就像将一块烧得通红的巨大铁块扔进泳池。铁块周围的水会剧烈沸腾，温度计读数会瞬间飙升。你确实“测量”到了一个温度，但这个读数毫无意义，因为你的测量行为已经彻底改变了整个泳池的状态。这就是标准量子测量的方式——为了获得一个确定的、单一的信息，它粗暴地扰动了系统。
- **弱测量 (Weak Measurement)**：这好比用一个极其灵敏的微型温度计，轻轻地探入水中一瞬间再拿出来。这一次测量，你几乎得不到任何有用的信息，读数可能淹没在仪器的噪声中。但是，如果你有足够的耐心，在泳池的成千上万个不同位置重复这个“温柔的触摸”过程，然后将所有读数取平均值，你最终可以得到一个极其精确的泳池平均水温，而整个过程中，你几乎没有改变泳池的整体温度。

弱测量就是这样一种“温柔的”探测方式。在单次测量中，它只从量子系统中提取极少量的信息，作为交换，它对系统的扰动也微乎其微。通过对大量制备在相同初始状态的粒子进行弱测量，并结合“后选择”（即只分析那些在未来某个测量中得到特定结果的粒子），物理学家可以重构出系统在两次测量之间的“实在”状态。

这一发现的意义远不止于技术层面，它具有深刻的本体论 (Ontological) 意涵。如果标准观点是正确的，即“实在”只在强测量瞬间被创造，那么问“粒子在两次测量之间在做什么？”就是一个没有意义的问题。但阿哈罗诺夫的理论表明，一个持续的、虽然奇特的实在，在测量之间是存在的，而弱测量就是揭示这个实在的钥匙。这使得长期困扰物理学界的“测量问题”（即波函数坍缩的物理机制是什么）从一个根本性的悖论，降级为一个因使用了过于“粗暴”的测量工具而产生的人为问题。

1.3 波粒二象性与坍缩之谜

译文

我们被告知的关于量子力学的最后一个、也是最重要的错误观点是，像电子这样的量子粒子可以既是粒子又是波。他们说，例如在氢原子中，电子就像一团环绕着质子的波，而不是一个围绕质子旋转的粒子。

所以我们认为量子粒子就像经典意义上的波。但经典波有一个特性，即如果你观察波上某一点的强度，你不会改变其他地方的波。而电子的“波”却有这样一个特性：如果你在这一点观察并发现了电子，整个波就会神奇地消失，只剩下你发现电子的那个地方。

这是一种不合逻辑的行为，因为如果前一刻电子的电荷和质量还遍布在整个波中，然后你最终在一个地方发现了它，那么所有这些电荷都会非常迅速地坍缩到这一点，这将产生大量的辐射和扰动，而这些是你从未观察到的。所以，这不是一个正确的描述。

另一方面，人们说它必须是波，因为没有其他方式可以理解为什么我们能在单个电子上看到干涉现象。例如，你拿一个电子，让它穿过一个有两个开放狭缝的屏幕。如果只打开一个缝，你稍后放上感光板，一个接一个地收集电子，你会看到一个衍射图样，看到一团从那个缝出来的点。如果打开另一个缝，你会看到从另一个缝出来的波。但如果你同时打开两个缝，每个到达的电子都必须同时穿过它们俩，才能解释你看到的相消干涉——感光屏上突然出现了一些没有任何电子到达的点。如果两个缝都开着，这些点就没有电子，但如果只开其中任意一个，电子却会到达那里。所以人们说，正因如此，没有办法理解这种行为，除非我们说电子也可以是波。

我将证明，通过做我所说的那种新实验，我既可以看到干涉图样，之后又能做一个测量，告诉我粒子到底穿过了哪个缝。所以，对于干涉现象，必须有另一种不是基于波的解释。而我找到了那种解释。事实上，早在60年代我就已经找到了对这种新行为的解释。

深度解读 “波粒二象性”是量子力学中最著名也最令人困惑的概念。经典的双缝干涉实验是其最佳例证：当电子一个一个地发射，穿过两个狭缝时，它们在后面的屏幕上形成的图案并非两个独立的亮条，而是一系列明暗相间的干涉条纹。这种条纹是波的典型特征，就好像水波同时通过两个缺口后相互叠加一样。为了解释这个现象，标准诠释认为，单个电子在穿过双缝时，其行为像一个波，同时穿过了两个缝，并与自身发生干涉。然而，一旦你在屏幕上探测到它，它又变回一个点状的粒子。

这个“波函数坍缩”的过程充满了悖论。正如阿哈罗诺夫指出的，一个在空间中延展的“概率波”（携带电荷和质量）如何能在一瞬间坍缩到一个点，而不违反相对论（信息传播速度不能超光速）并且不产生巨大的能量辐射？这是一个长期悬而未决的难题。

阿哈罗诺夫提出了一个截然不同的图像。他认为，我们应该放弃这种将电子想象成一个物理波的直观但误导性的想法。在他看来，电子始终是一个粒子，它在任何时候都只通过了其中一个狭缝。那么，干涉现象如何解释呢？

答案在于“非定域性”（Non-locality）。阿哈罗诺夫主张，量子力学的基本运动方程是非定域的。这意味着，尽管电子这个“粒子”本身只走了一条路径，但它还拥有一个或多个其他的、非定域的变量。这个变量不像一个物理实体，它更像是一种“信息场”，能够瞬间感知到

整个实验环境的布局，包括另一条路径上那个狭缝是开着还是关着。当电子到达屏幕时，正是这个非定域变量“指导”它应该落在哪里，从而整体上形成了干涉图样。

这个想法听起来可能比波函数坍缩还要奇怪，但它在逻辑上是自洽的，并且避免了坍缩带来的物理难题。它将量子世界的奇异性从“一个东西同时在两个地方”（波粒二象性）转移到了“一个东西在一个地方，却能瞬间知道另一个遥远地方发生的事”（非定域性）。阿哈罗诺夫认为，后者才是量子力学真正深刻和根本的特性。

通过使用弱测量技术，他和他的合作者已经设计出实验，声称可以在不破坏干涉图样的情况下，判断出粒子究竟通过了哪条路径。这在标准诠释下是不可想象的，因为任何试图确定路径的“强测量”都会不可避免地破坏干涉。这一成就直接支持了他的观点：干涉并非源于“波”的叠加，而是源于粒子的非定域相互作用。这也呼应了他与海森堡的交流，暗示着物理学可能在早期选择了薛定谔那更直观但有缺陷的“波”图像，而忽视了海森堡那更抽象但可能更接近真相的数学框架。

第二部分：来自未来的线索——双态矢量理论与时间对称性

在批判了标准量子力学的叙事之后，阿哈罗诺夫开始构建他的替代方案。这一方案的核心，便是他于上世纪60年代与彼得·柏格曼（Peter Bergmann）和乔尔·列波维茨（Joel Lebowitz）共同提出的“双态矢量理论”（Two-State Vector Formalism, TSVF），也被称为ABL理论。这个理论的核心思想是，要完整地描述一个量子系统在某一时刻的状态，仅有来自过去的信息是不够的，我们还需要来自未来的信息。

2.1 两个边界的故事

译文

我重新阐述了量子力学，指出为了描述现在，情况是这样的：在经典物理学中，要完全描述现在，只需要知道过去的初始条件就足够了。而在量子力学中，为了完全描述现在，你必须做两个实验。一个在之前，它给了你一个过去的边界条件——你之前发现的波函数传播到现在。然后，你之后再做另一个实验，对于一个系统和另一个系统得到了不同的结果。那个不同的结果给了你另一个边界条件，而那个被抛弃的新东西，则从未来传播回现在。

来自过去和未来的两方面信息——这只有在量子力学中才可能发生，因为在经典力学中，一旦你知道了过去，未来就不会有新的信息了。但在量子力学中，未来确实有新的信息，而且这两方面的信息在现在都是相关的，前提是你只用弱测量来探知它们。

深度解读 经典物理学的因果观是单向且线性的：过去决定现在，现在决定未来。这种时间上的不对称性深深地根植于我们的思维模式中。标准量子力学在很大程度上继承了这种观念：一个量子系统的状态由一个称为“态矢量”或“波函数”的数学对象来描述，它由过去的制备（或测量）所决定，并根据薛定谔方程演化向未来。未来是开放的、概率性的，在测量发生之前是不确定的。

阿哈罗诺夫的双态矢量理论 (TSVF) 彻底颠覆了这种时间不对称的图像。它主张，量子力学的内在结构是时间对称的。为了完整描述一个量子系统在 t 时刻的状态，我们需要两个态矢量，构成一个“双态矢量”： $\langle \Phi | | \Psi \rangle$ 。

1. **前向演化的态矢量 $|\Psi\rangle$** ：这与标准量子力学中的态矢量类似。它由系统在过去某个时刻 t_1 ($t_1 < t$) 的制备或测量（称为“前选择”，pre-selection）所决定，并根据薛定谔方程正常地向未来演化。它包含了所有来自过去的信息。
2. **后向演化的态矢量 $\langle \Phi |$** ：这是TSVF理论的革命性补充。它由系统在未来某个时刻 t_2 ($t_2 > t$) 的某次测量得到特定结果（称为“后选择”，post-selection）所决定。这个态矢量被认为是从未来 t_2 的结果“倒着”演化回现在时刻 t 的。它包含了所有来自未来的、关于这个特定演化历史的新信息。

为了更好地理解这个概念，让我们使用一个更生动的类比。假设你想全面了解某个人在30岁时的状态和人生意义。

- **标准量子力学的方法**：只进行“前选择”。你知道这个人出生在纽约（过去的边界条件 $|\Psi\rangle$ ）。基于这个信息，你可以预测他未来可能成为律师、医生、艺术家等等，每种可能性都有一定的概率。但你在30岁时无法确定他最终会成为谁。
- **双态矢量理论的方法**：同时进行“前选择”和“后选择”。你不仅知道他出生在纽约（ $|\Psi\rangle$ ），还通过某种方式得知，他在50岁时将成为美国总统（未来的边界条件 $\langle \Phi |$ ）。这个来自未来的信息，彻底改变了你对他30岁时状态的理解。他此时的某些行为、选择和特质，就不再是随机或偶然的了，而是通往那个确定未来的“命运”的一部分。

TSVF认为，量子系统在两次“强测量”（前选择和后选择）之间的演化过程，就是由这样一对来自过去和未来的边界条件共同决定的。在经典世界里，未来的信息是多余的，因为过去已经完全决定了一切。但在量子世界中，由于内在的非决定论性，过去并未锁死一切可能性，这为未来的边界条件留下了施加影响的空间。因此，一个量子系统在“现在”的完整描述，是过去和未来信息共同作用的结果。

2.2 一个新的现实框架

译文

两个矢量，以平等的地位，共同告诉了你关于现在的真实信息。这就是所谓的“双矢量表述”，是我在60年代早期发现的。

深度解读 双态矢量理论 (TSVF) 不仅仅是一个新的计算工具，它提供了一个全新的现实框架，对量子力学的核心概念进行了重塑。为了清晰地展示这一范式转移，我们可以将TSVF与标准的哥本哈根诠释进行直接对比。

关键概念对比：标准量子力学 vs. 双态矢量理论

概念	标准量子力学观点 (哥本哈根诠释)	双态矢量理论 (TSVF) 观点
状态描述	由单个态矢量 $ \psi\rangle$ 描述，它从过去向前演化。未来是概率性的。	$ \psi\rangle$ 描述，它从过去向前演化。未来是概率性的。
未来的角色	对于描述当前状态是无关的；过去完全决定了 $ \psi\rangle$ 。	$ \psi\rangle$ 。
测量	一个破坏性的事件，导致波函数发生不可逆的“坍缩”，随机地得到一个结果。	“坍缩”是使用“强测量”的假象。弱测量可以在不破坏系统的情况下，探测由双态矢量所描述的实在。
实在性	在测量之间是概率性的、模糊不清的。实在就是被测量到的东西。	在测量之间存在一个确定的（尽管奇特的）实在，它被双态矢量完整地描述。
因果律	时间不对称的：过去 $\rightarrow$ 现在。	时间对称的：过去 $\rightarrow$ 现在 $\leftarrow$ 未来。

这个表格清晰地揭示了两者在哲学和物理层面上的根本分歧。标准诠释描绘了一个由过去驱动、充满随机性的世界，其中观察者的行为扮演着创造现实的关键角色。而TSVF则描绘了一个时间对称的、由过去和未来共同塑造的“块宇宙”（block universe）图景。在这个图景中，现在是过去和未来之间的“交汇点”，它的属性由两个方向的边界条件共同协商决定。

这种视角的转变，使得许多量子悖论得到了全新的解释。例如，“测量问题”在TSVF中不再是一个问题，因为“坍缩”被看作是当我们只考虑前向演化的态矢量 $|\psi\rangle$ 时，因信息不完整而产生的一种错觉。当我们拥有了描述完整历史的双态矢量 $|\Phi\rangle| |\psi\rangle$ 时，系统在两次测量之间的行为虽然奇特，但却是确定的。

当然，这种“逆因果性”——即未来的事件影响过去——听起来非常违反直觉。但TSVF通过精巧的数学结构确保了它不会产生逻辑悖论。你无法利用未来的影响去改变过去的“强测量”结果，从而向过去发送信息。未来的影响只体现在对两次强测量之间系统属性的微妙修正上，而这些修正只能通过弱测量这种特殊的方式才能被揭示出来。这就像你知道了那位“未来总统”的命运，但这并不会改变他出生在纽约这个事实，只会让你对他30岁时的行为有了新的解读。

第三部分：温柔的触碰——弱测量如何揭示新实在

如果说双态矢量理论（TSVF）是描述量子新实在的“地图”，那么弱测量就是探索这片新大陆的“交通工具”。没有弱测量，TSVF所预言的许多奇特现象将永远停留在理论层面，无法被实验所证实。正是弱测量与TSVF的结合，才使得阿哈罗诺夫的理论体系变得完整和强大。

3.1 测量而不破坏

译文

我发现了一种新的测量方式，我称之为“非干扰性测量”或“弱测量”——这种测量完全不干扰系统。然而，它仍然能告诉我们关于系统的所有需要的信息，前提是我们能有许多可供测试的样本。

深度解读 正如之前用游泳池温度的比喻所解释的，弱测量的核心思想是用极小的耦合强度去探测一个量子系统，从而将测量过程对系统的反作用（back-action）降到最低。在标准的冯·诺依曼测量模型中，测量过程可以被描述为一个待测系统（如一个电子的自旋）与一个“指针”系统（如一个探测器的位置）的相互作用。

- 在**强测量**中，系统与指针的相互作用非常强。如果电子自旋向上，指针会明确地指向“+1”；如果自旋向下，指针会明确地指向“-1”。这种测量给出了一个明确无误的结果，但代价是系统与指针发生了深度纠缠，测完之后，电子的原始自旋叠加态就被破坏了，系统“坍缩”到了自旋向上或向下的本征态。
- 在**弱测量**中，系统与指针的相互作用极其微弱。如果电子自旋向上，指针的位置只会发生一个极其微小的、几乎无法察觉的偏移；自旋向下也是如此。单次弱测量几乎不能告诉你任何关于自旋方向的确定信息，因为指针的微小偏移完全淹没在其自身的不确定性（量子涨落或噪声）之中。然而，正是因为相互作用微弱，测量后的系统状态与初始状态相比几乎没有变化，其叠加性得以保持。

那么，这种几乎读不出信息的测量有什么用呢？它的威力体现在统计平均上。想象一下，我们制备了成千上万个处于完全相同初始态 $|\Psi\rangle$ 的电子。我们对每一个电子都进行一次弱测量，记录下指针的微小偏移。然后，我们进行“后选择”：只保留那些在未来的某次强测量中被发现处于特定末态 $\langle\Phi|$ 的电子，并把这些电子对应的指针偏移量收集起来。最后，我们将所有这些被“后选择”的指针偏移量进行统计平均。

惊人的结果出现了：这个平均偏移量不再是微小且随机的，而是会收敛到一个确定的值。这个值所揭示的，就是被前选择态 $|\Psi\rangle$ 和后选择态 $\langle\Phi|$ 共同描述的系统，在两次测量之间所具有的某种物理属性的“弱值”（Weak Value）。

3.2 弱值

深度解读（延伸概念） “弱值”是弱测量理论中最核心也最惊人的概念。一个可观测量 A 的弱值，对于一个被前选择于态 $|\Psi\rangle$ 并后选择于态 $\langle\Phi|$ 的系统，其数学定义为：

$$A_w = \langle\Phi|\Psi\rangle\langle\Phi|A^\wedge|\Psi\rangle$$

其中 $A^\wedge$ 是对应于可观测量 A 的算符。

这个公式揭示了弱值的几个奇特性质：

1. **复数形式**：与强测量的结果（必须是代表物理量的实数，称为本征值）不同，弱值通常是一个复数。其实部和虚部分别对应于对指针正则位置和正则动量的影响，两者都可以通过实验测量得到。
2. **奇异值**：弱值的大小可以远远超出该物理量本征值的范围。这是一个极度违反直觉的现象。例如，一个自旋为 $1/2$ 的粒子，其自旋在任意方向上的强测量结果只能是 $+1/2$ 或 $-1/2$ 。然而，通过巧妙地选择前选择态和后选择态，其自旋的弱值可以被测量为 100，-10，甚至任何你想要的数值。

这怎么可能？一个只有两个可能取值 ($+1/2, -1/2$) 的物理量，怎么会测量出 100 的结果？这并不意味着单个粒子的自旋真的变成了 100。弱值是一个统计概念，是大量弱测量结果的平均值。当后选择的末态 $\langle \Phi |$ 与前选择的初态 $|\Psi\rangle$ 近乎“正交”（即 $\langle \Phi | \Psi \rangle$ 的值非常接近于 0）时，上述公式中的分母会变得极小。这会导致一个“放大效应”，使得分子中微小的信号被放大成一个巨大的弱值。

这种奇异的弱值并非数学游戏，它已被大量实验所证实。它告诉我们，在由过去和未来共同定义的量子现实中，物理系统的属性可以表现出经典世界中完全无法想象的行为。标准量子力学很难自然地解释这些奇异值，常常将其视为一种统计上的巧合或数学上的奇观。但在 TSVF 的框架下，这些奇异的弱值是其理论的直接和自然的推论。它们是从那个由过去和未来共同编织的、隐藏在两次强测量之间的“新实在”中所发出的最强烈的信号。它们的存在，是支持 TSVF 世界观的最有力的实验证据之一。

第四部分：远方的幽灵——非定域性与阿哈罗诺夫-玻姆效应

在深入探讨了时间上的非定域性（未来影响现在）之后，阿哈罗诺夫将我们的视线拉回到了他科学生涯的起点——一个揭示了空间非定域性的著名思想实验，即阿哈罗诺夫-玻姆（AB）效应。这个效应不仅是现代物理学的一块基石，也是理解阿哈罗诺夫整个思想体系的逻辑起点。它雄辩地证明，量子世界的相互作用可以超越我们日常经验中的“接触”和“力”。

4.1 一切的开端：AB效应

译文

那是我思考量子力学中非定域性的开端。……我记得那时在英国，下午四点有喝茶的时尚，研究生和教授们在布里斯托尔坐在一起，我向大家讲述了这个想法。……当然，即使在今天，仍然有一些人认为这个效应有问题，因为它看起来非常奇怪，粒子能够感受到势而完全不受力的作用。但这无疑是一个真实的量子效应。那是我第一次意识到，量子力学的基本方程必须是非定域的。

深度解读 阿哈罗诺夫-玻姆（AB）效应是量子力学中最纯粹、最深刻的非定域现象之一。为了理解它，我们可以想象一个电子版的双缝干涉实验：

1. **设置**：电子源发射电子，穿过一个双缝挡板，最终到达一个探测屏。

2. **引入螺线管**：在双缝挡板和探测屏之间，我们放置一个无限长的、被完美屏蔽的螺线管（一个紧密缠绕的线圈）。当电流通过螺线管时，它会在其内部产生一个强大的磁场 **B**。关键在于，由于完美的屏蔽，这个磁场被严格限制在螺线管内部，在电子经过的所有区域，磁场强度都精确为零。
3. **经典预测**：根据经典电磁学，运动的电荷只有在有磁场的地方才会受到洛伦兹力的作用。既然电子的路径上没有任何磁场，那么无论螺线管内的电流是开是关，电子的运动轨迹都应该不受任何影响，探测屏上的干涉条纹也应该保持不变。
4. **量子结果**：然而，实验结果却令人震惊。当量子力学介入时，情况完全不同。当螺线管内的电流开启时，尽管电子从未“接触”到任何磁场，但探测屏上的干涉条纹却发生了整体的平移！。这个平移量的大小，正比于被电子两条路径所包围的螺线管内部的磁通量。

这个效应的惊人之处在于，电子似乎“知道”一个它从未进入过的区域里是否存在磁场。这是一种纯粹的量子“幽灵般的超距作用”，是典型的非定域性表现：一个局域的粒子，其行为受到了一个遥远区域物理条件的影响。这个效应在1959年被提出时，引起了物理界的巨大争议，许多人无法相信。直到后来，由日本物理学家外村彰（Akira Tonomura）等人完成的一系列精巧的实验，才无可辩驳地证实了AB效应的存在。

4.2 势与力：一个更深的实在

译文

我认为，我们用势来写出局域方程这个事实是具有误导性的。……因为我们总是可以通过规范变换，将粒子运动区域的势移除，但粒子最终仍然能感受到力的效应。所以，没有办法真正局域地描述力的效应。这是一种使用波的数学表述，但波和势都不是真实的。唯一你能真正观察到的是力，而我已证明，我们直接用波来描述是误导的。你必须用一个只在一条路径上运动的粒子来描述它，但它能以非定域的方式感受到力。

深度解读 AB效应的发现，迫使物理学家重新审视一个在经典物理中被认为是辅助工具的概念：**电磁势**。在经典电磁学中，物理学家更习惯于用力场（电场 **E** 和磁场 **B**）来描述电磁现象，因为它们是“真实”的，可以直接测量并产生力的作用。而电磁势（标量势 Φ 和矢量势 **A**）则被看作是一种数学上的便利，它们通过微分运算可以得到力场（例如 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ ），但它们本身并非唯一的，可以通过“规范变换”来改变，而不影响最终的力场。因此，人们普遍认为势不具备直接的物理实在性。

AB效应彻底改变了这一观念。它表明，在量子力学中，**势比场更为基本**。在AB效应的实验中，虽然电子路径上的磁场 **B** 为零，但矢量势 **A** 却不为零。正是这个矢量势 **A** 与电子的波函数发生了相互作用，给波函数附加了一个额外的相位，从而导致了干涉条纹的移动。这表明，即使在没有力的地方，矢量势 **A** 依然可以产生可观测的物理效应。

阿哈罗诺夫的整个学术生涯，可以看作是对这种非定域思想的不断深化和推广。AB效应揭示了**空间上的非定域性**：粒子的行为受到它所环绕的空间区域的拓扑性质（即内部是否存在磁通量）的影响。而他后来的双态矢量理论（TSVF）则将这种非定域性推广到了**时间维度**：粒子在现在的属性，受到未来某个测量结果的影响。

从这个角度看，AB效应是阿哈罗诺夫思想体系的逻辑基石。它像是在坚固的经典定域性大坝上打开的第一道裂缝，证明了“超距作用”在量子世界中是真实存在的。一旦物理学界被迫接受了这种空间上的非定域性，那么再去思考时间上的非定域性——即未来对现在的影响——就显得不那么天方夜谭了。AB效应是通往TSVF那片更广阔、更奇特的非定域现实的门户。它告诉我们，要理解量子世界，必须放弃“眼见为实”的定域观念，承认那些看不见、摸不着的“势”和“远方”的事件，可能正以一种深刻的方式塑造着我们眼前的现实。

第五部分：量子仙境——柴郡猫与其他奇异现象

基于双态矢量理论（TSVF）和弱测量的强大框架，阿哈罗诺夫和他的合作者们预言并证实了一系列堪称“匪夷所思”的量子现象。这些现象如同爱丽丝梦游仙境中的奇遇，彻底颠覆了我们的经典直觉。其中最著名的，莫过于“量子柴郡猫”。

5.1 没有猫的笑

译文

也许最有趣的现象是我称之为“量子柴郡猫”的。你知道刘易斯·卡罗尔写的《爱丽丝梦游仙境》里的故事，爱丽丝来到了这个美丽的世界，她能和动物说话。她遇到了一只猫，和它交谈。过了一会儿，猫生气了，然后消失了。但它以一种非常奇怪的方式消失：首先是尾巴消失，然后是身体消失，接着是脸消失，最后只剩下了一抹微笑。爱丽丝心想，她见过很多没有微笑的猫，但没有猫的微笑又算什么呢？这不合逻辑。

所以，每个读到这里的人，包括我在高中时读到它，都觉得作者刘易斯·卡罗尔疯了，才会谈论没有脸的微笑。但事实证明，量子力学告诉我们，这真的可能发生。

我所展示的是一个非常有趣的效应。你拿一个像中子这样的粒子，它有一个叫做“自旋”的属性。中子可以绕自身旋转并产生磁矩，这种旋转被称为自旋。结果是，我们可以做一个实验，你把中子送到一条路径上，而它的自旋却离开了中子，独自在另一条路径上移动，然后它们再重新汇合。所以，自旋就像那可以离开脸的微笑。尽管所有人都认为中子不可能没有自旋而存在，自旋也不可能没有中子而存在。

深度解读 “量子柴郡猫”效应的名字，完美地捕捉了其现象的诡异本质：一个物体和它的属性可以实现空间上的分离。在经典世界里，这是绝无可能的。一个旋转的篮球，它的“旋转”这个属性必然和篮球本身待在一起；一块磁铁的磁性，也绝不会离开磁铁独自去“旅行”。然而，在由过去和未来共同定义的量子现实中，这种分离却成为了可能。

这个效应的典型实验设置如下：

1. **主角**：中子（猫）和它的自旋磁矩（猫的微笑）。
2. **舞台**：一个中子干涉仪。一束中子进入干涉仪后，被一个分束器分成两条路径（路径A和路径B）。
3. **前选择（Pre-selection）**：进入干涉仪的中子被制备在特定的初始自旋状态。

4. **后选择 (Post-selection)**：在两条路径的末端，中子波函数会重新汇合。实验者只关注那些从某个特定出口射出、并处于某个特定最终自旋状态的中子。换句话说，他们只挑选那些经历了特定“命运”的中子进行分析。
5. **温柔的探测**：在两条路径的中间，物理学家对那些被成功“后选择”的中子系综进行两种不同的弱测量：
 - **测量猫在哪里**：用一个“弱吸收体”轻轻地探测路径A和路径B，看中子粒子本身更倾向于出现在哪里。
 - **测量微笑在哪里**：用一个“弱磁场”轻轻地探测路径A和路径B，看中子的自旋磁矩更倾向于出现在哪里。

实验结果令人瞠目结舌：弱测量显示，中子粒子本身（猫）只出现在了路径A上，而它的自旋磁矩（微笑）却只出现在了路径B上！。就好像中子在分束器处做出了一个决定：“我的身体走A路径，但我的灵魂（自旋）去B路径逛逛”，然后在终点重新合体。这一惊人的现象已经被多个实验团队在不同的物理系统中（包括中子和光子）所证实，它并非一个单纯的思想实验。

5.2 分离的意义

深度解读 量子柴郡猫效应究竟意味着什么？它雄辩地证明，在两次强测量（前选择和后选择）之间，我们关于“物体”和“属性”不可分割的经典观念是无效的。一个粒子的属性，可以被“剥离”出来，像一个独立的实体一样，沿着自己的路径传播和演化。

这个现象是双态矢量理论（TSVF）威力的终极展示。让我们来分析一下为什么：

- **标准诠释的困境**：在标准量子力学中，一个中子要么在路径A，要么在路径B，要么处于两者的叠加态。但无论如何，中子和它的自旋都应该在同一个地方。标准诠释很难解释这种属性的“脱体”现象，除非诉诸于复杂的数学解释，并认为弱值不代表物理实在。
- **TSVF的解释**：在TSVF的框架下，这个现象则显得非常自然。在两次测量之间，系统的状态由双态矢量 $\langle \Phi | | \Psi \rangle$ 完整描述。这个数学对象所描述的现实，远比我们想象的要复杂和奇特。在这个现实中，提问“猫在哪里？”和“微笑在哪里？”可以得到两个完全不同的答案。这之所以可能，是因为系统的行为不仅仅由初始状态 $|\Psi\rangle$ 决定，还受到了未来那个特定的后选择态 $\langle \Phi |$ 的“逆向”影响。正是过去和未来边界条件的巧妙组合，共同“编织”出了这样一幅粒子与属性分离的奇异图景。

量子柴郡猫效应也再次凸显了弱测量的关键作用。如果我们试图用“强测量”去确定中子的路径（比如在路径A或B放置一个高效率的探测器），那么这种精巧的“猫与微笑分离”的状态就会瞬间被破坏。强测量会迫使中子和它的自旋在同一个地方被发现，从而“坍缩”掉这个奇特的量子态。只有弱测量这种“温柔的触碰”，才能在不惊扰系统的前提下，窥见量子仙境中这不可思议的一幕。

这告诉我们一个深刻的道理：你所使用的观测工具，在很大程度上决定了你能看到的现实。要想看到由TSVF所描述的那个充满奇迹的量子世界，你就必须掌握弱测量这把独特的钥匙。量子柴郡猫不仅仅是一个有趣的物理现象，它更像一个寓言，提醒我们必须敢于放下根深蒂固的经典直觉，才能真正领略量子实在的深邃与奇妙。

第六部分：巨人的肩膀——与玻姆、海森堡和费曼的个人回忆

科学的进步不仅是冰冷的公式和实验数据，也充满了人与人之间的思想碰撞、传承与serendipity（意外的幸运）。在访谈的后半部分，阿哈罗诺夫分享了他与几位20世纪物理学巨匠——大卫·玻姆、维尔纳·海森堡和理查德·费曼——的个人交往故事。这些珍贵的回忆，为他革命性思想的诞生提供了温暖而深刻的历史注脚。

6.1 大卫·玻姆：导师与合作者

译文

我在技术学院的理学院学习，由著名的内森·罗森（Nathan Rosen）教我量子力学……我来到他的办公室说：“罗森教授，我想研究量子测量理论。”他说：“不不不，那个课题只适合像我这样的老人。你应该做一些真正的物理工作……”

我垂头丧气地走到走廊上，遇到了一位名叫Y的助教。他告诉我：“听着，有位新来的教授刚到技术学院，名叫大卫·玻姆（David Bohm）。去他的办公室，也许他能帮你。”……我向他介绍了自己，告诉他我和罗森的问题，他问我想做什么……我说了一些我感兴趣的问题，他说：“好的，我也感兴趣。你跟我一起工作吧。”……这就是我们开始合作的经过。

一年后他不得不离开以色列，去了英国的布里斯托尔，我也跟着他去了。我在那里读了博士，也是在那里我发现了所谓的阿哈罗诺夫-玻姆效应。……我认为麦卡锡主义唯一做的一件好事，就是玻姆不得不离开美国……他们吊销了他的护照，取消了他的公民身份，所以他无法返回美国，这就是他决定来海法的原因。所以，这是麦卡锡主义带来的唯一一件好事。

深度解读 这段故事生动地再现了科学史上一次关键的相遇。年轻的阿哈罗诺夫对量子力学的基础问题充满热情，却被传统学术权威（罗森教授，爱因斯坦-波多尔斯基-罗森佯谬的提出者之一）视为“哲学空谈”而拒之门外。这反映了当时物理学界的主流风气：专注于应用和计算，而回避根本性的诠释问题。

幸运的是，他遇到了大卫·玻姆。玻姆本人就是一位非正统的思想家。他曾与爱因斯坦共事，并对量子力学的哥本哈根诠释深感不满，后来发展出自己的一套隐变量理论（玻姆力学）。更重要的是，玻姆因其政治信仰在麦卡锡主义盛行的美国遭到迫害，被迫流亡海外，最终辗转来到以色列。这种被主流排斥的经历，可能使他更能理解和欣赏一个敢于挑战权威的年轻学生。

正是玻姆的开放和慧眼识珠，才为阿哈罗诺夫提供了成长的土壤。他们的师生关系迅速发展为紧密的合作关系，最终催生了现代物理学最重要的发现之一——阿哈罗诺夫-玻姆效应。这个故事告诉我们，科学的突破往往发生在思想的边缘地带，而一位开明的导师对于保

护和 nurturing（培育）创新的火花是何等重要。同时，它也揭示了宏大的历史事件（如麦卡锡主义）如何以意想不到的方式，深刻影响了个人的命运和科学的进程。

6.2 维尔纳·海森堡：“海森堡是对的”

译文

1964年，我来到慕尼黑，访问了马克斯·普朗克研究所，并被介绍给了当时还健在的海森堡。……当我进入他的房间，我们被介绍后，我问：“海森堡教授，您知道如何用您的语言来解释干涉现象吗？”……他说他不知道。于是我向他展示了我的新思路。

他变得非常兴奋，从那以后，任何来拜访他的人，据他的助手彼得·杜尔告诉我，他都会把那人带到黑板前，向他展示如何用他的方式理解干涉。……我认为干涉的方式是证明量子力学的基本运动方程是非定域的。

深度解读 这次与维尔纳·海森堡的会面，对于理解阿哈罗诺夫思想的核心至关重要。海森堡是量子力学的奠基人之一，他于1925年创立了“矩阵力学”，这是量子力学的第一个数学完备的表述。矩阵力学的特点是极其抽象，它完全抛弃了经典的轨道、波等直观图像，直接描述可观测物理量（如位置、动量）之间的数学关系（以矩阵形式表示）。

然而，仅仅一年后，埃尔文·薛定谔提出了“波动力学”，用一个更直观的“波函数”来描述电子的行为。由于波动力学在数学上更容易处理，并且提供了一个（尽管后来被证明是误导性的）物理图像，它迅速获得了比矩阵力学更广泛的欢迎。物理学界在很大程度上沿着薛定谔的道路走了下去，将波函数及其“坍缩”视为核心概念。

阿哈罗诺夫在访谈标题中断言“海森堡是对的，而我们忽视了他”，其深意就在于此。他认为，物理学界过早地拥抱了薛定谔的波函数实在论，从而陷入了“波函数坍缩”等一系列悖论中。而海森堡最初那种更抽象、更关注可观测测量之间关系的思路，可能才是更正确的方向。

当阿哈罗诺夫向海森堡展示他用非定域变量来解释双缝干涉时，海森堡之所以“非常兴奋”，很可能是因为他看到了一个自己理论框架的复兴和延伸。阿哈罗诺夫的方法，没有依赖于一个物理的“波”同时穿过两个缝，而是通过一个抽象的、非定域的变量来建立联系，这与海森堡矩阵力学的神内核高度契合。阿哈罗诺夫实际上为海森堡的理论补上了一块关键的拼图——如何在该框架下，直观地理解像干涉这样的核心量子现象。这不仅仅是一次学术交流，更像是一次跨越时代的思想共鸣。

6.3 理查德·费曼：一个美丽的想法

译文

当我们发表了关于AB效应的文章时，费曼给我们发回一封电报说：“多么美丽！我怎么自己就没想到呢。”……费曼还曾对某人说过，他认识的人中唯一比他聪明的就是玻姆。

深度解读 理查德·费曼是另一位量子力学巨匠，以其非凡的物理直觉、路径积分的创立以及“闭嘴，计算！”的实用主义哲学而闻名。他通常对量子力学的哲学争论不屑一顾，更关心理论是否能做出准确的预测。

在这样的背景下，费曼对阿哈罗诺夫-玻姆效应的由衷赞美（“多么美丽！”）就显得格外有分量。这表明AB效应的价值，并不仅仅在于其深刻的哲学意涵（如势比场更基本，自然是非定域的），更在于其数学上的简洁、优雅和物理上的惊奇。一个像费曼这样对物理之美有极致追求的人，能够立刻识别出这个想法的原创性和深刻性。这说明，阿哈罗诺夫的工作超越了不同诠释和哲学阵营的分歧，直接触及了物理学的核心。

此外，阿哈罗诺夫转述的费曼对大卫·玻姆的评价——“唯一比他聪明的人”——也从侧面印证了玻姆这位被主流学术界边缘化的物理学家的非凡才华。这为我们理解阿哈罗诺夫的学术血统提供了一个重要的视角：他师从于一位被费曼都敬畏三分的天才，这或许解释了他为何能拥有如此超凡脱俗的洞察力和挑战整个物理学界共识的勇气。这些来自巨人的肯定，无疑为阿哈罗诺夫在漫长而孤独的探索道路上，提供了宝贵的信心和支持。

结论：重新思考现实

雅科夫·阿哈罗诺夫教授的这场访谈，如同一场思想的风暴，系统性地挑战了我们对量子现实的传统认知。他的核心论点可以归结为一个清晰而颠覆性的宣言：过去七十多年来我们所讲述的关于量子力学的“标准故事”——一个充满无因随机性、测量必然带来破坏性坍缩、粒子与波纠缠不清的世界——是建立在一系列误解之上的。

阿哈罗诺夫为我们描绘了一幅全新的、截然不同的量子画卷。在这个由他的“双态矢量理论”（TSVF）所描述的世界里：

- **现实是时间对称的**：现在不仅由过去决定，也同样被未来所塑造。一个量子系统的完整故事，必须由其过去和未来的两个边界条件共同书写。看似毫无理由的“随机性”，正是为未来的影响所预留的必要空间。
- **现实是持续且可知的**：在两次强测量之间，量子系统并非处于一种模糊的、概率性的“叠加”状态，而是存在一个虽然奇特但却确定的实在。这个实在可以通过“弱测量”这种温柔的探测方式被揭示出来，而无需像传统测量那样将其粗暴地摧毁。“波函数坍缩”因此不再是一个根本性的物理过程，而更像是因为我们使用了错误的工具、获得了不完整信息而产生的假象。
- **现实是深刻非定域的**：无论是阿哈罗诺夫-玻姆效应中粒子感受到遥远区域的磁场，还是量子柴郡猫中粒子与其属性的空间分离，都指向一个共同的结论——量子实在的内在联系超越了经典的时空局域性。这种“幽灵般的超距作用”，并非量子世界的怪癖，而是其最基本的组织原则。

对于一位即将步入科学殿堂的高三学生而言，阿哈罗诺夫教授长达65年的学术生涯本身就是一个鼓舞人心的传奇。它雄辩地证明，科学的进步源于永不枯竭的好奇心和敢于向最根深蒂固的教条提出质疑的勇气。即使面对整个科学界的共识，只要逻辑和证据站在你这边，就应该坚持探索。

量子力学的故事远未结束。正如阿哈罗诺夫所展示的，这片最深邃的物理学领域依然充满了未知的奥秘和等待被发现的新大陆。他的工作为我们打开了一扇窗，让我们得以一窥一个更加奇妙、更加逻辑自洽、也更加美丽的宇宙。未来的物理学将走向何方，或许正取决于新一代的年轻思想家，是否能像阿哈罗诺夫一样，敢于重新思考现实本身。

This content was created by another person. It may be inaccurate or unsafe. [Report unsafe content](#)**Opens in a new window**
