



一份逐段精解报告：深入剖析量子力学中虚数的“必要性”之争

报告引言：一场百年之争的“实”质

[原文] 物理学家成功从量子力学中消除了虚数 量子力学终于完全采用实数进行表述，使得理论核心中的数学难题进入了一个新的探究阶段。

[专家解读] 这个标题具有强大的冲击力，但我们首先要精确理解“消除”(eliminated)一词的含义。这并不意味着整个量子力学理论被推翻了，也不代表我们过去一百年所学的知识是错误的。

相反，我们可以用一个“地图”的类比来理解。物理理论是描绘现实世界的“地图”，而数学是我们用来绘制地图的“语言”。一个世纪以来，物理学家一直使用一种包含复数 (complex numbers) 的“语言”来绘制量子地图，并且绘制得极其成功。这篇文章的核心在于，一组物理学家现在发现，他们可以使用一种不同的、“纯实数” (real numbers) 的语言，来绘制出那张完全相同的地图。

这一发现之所以重要，是因为它触及了一个长达百年的哲学难题：为什么在我们的物理方程中，必须使用那个“虚构”的数字 i 呢？“消除”它，意味着我们终于可以将这个问题从“它为什么非得在那儿？”转变为一个更深刻的问题：“既然它不是必需的，那为什么它又如此好用？”

[原文] 3 虚数 i ，这个数学上的创造，被定义为 -1 的平方根，长期以来一直是量子物理方程中的一个难题。Quanta Magazine 的 Michelle Sclafani Introduction

[专家解读] 对于高三的同学们来说，虚数 i 可能是你们在数学课上遇到的第一个真正“抽象”的概念。教科书定义 $i^2 = -1$ ，但这个“ -1 的平方根”在现实中似乎毫无对应。你不可能捡起 i 个苹果。

然而，我们可以换个角度理解 i 。回想一下“负数”刚被发明的时候。18世纪的数学家也觉得 -3 很荒谬，因为你不可能有“负3头牛”。但 -3 却完美地描述了一个真实存在的概念：“债务”。

同样，虚数 i 也描述了一个真实存在的物理概念：“旋转” (rotation)。你可以把 i 想象成一个“旋转90度的指令”。

- 从数字 1 开始（在数轴上指向“右”）。
- 乘以 i : $1 \times i = i$ （旋转90度，指向“上”）。
- 再乘以 i : $i \times i = -1$ （再旋转90度，指向“左”）。
- 再乘以 i : $-1 \times i = -i$ （再旋转90度，指向“下”）。
- 再乘以 i : $-i \times i = 1$ （再旋转90度，回到了起点）。这个“旋转”的特性，就是 i 成为量子力学“难题”（同时也是关键）的根本原因。

[原文] By 丹尼尔·加里斯托 作者 2025 年 11 月 7 日 查看 PDF 或打印模式 理论物理 物理 量子力学 理论物理 所有主题

[专家解读] 这篇报告的日期（2025年）和主题分类告诉我们，我们正在阅读的是一篇关于“前沿物理”的“新闻报道”。这一定位非常重要。它意味着我们正在目睹科学的过程，而不是科学的定论。

文章中涉及的主题——理论物理、量子力学——是科学中最基础的领域。它们试图回答的问题是：“世界万物最底层的运行规则是什么？”这篇文章的核心，就是一场关于这些“规则”应该用什么样的“数学语言”来书写的辩论。这不仅仅是技术问题，更是一个深刻的哲学问题。

第一部分：薛定谔的遗憾与 i 的幽灵

[原文] 一百年前，原子和基本粒子的异常行为促使物理学家们构建了一个新的自然理论。这个理论，即量子力学，迅速取得了成功，通过精确计算氢原子对光的吸收与发射验证了其价值。然而，其中存在一个难题：量子力学的核心方程中包含了虚数 i ，也就是 -1 的平方根。

[专家解读] “异常行为”主要指的是“波粒二象性”。实验显示，电子（一种粒子）的行为有时又像“波”。为了描述这种“粒子波”，薛定谔（Erwin Schrödinger）在1926年提出了一个核心概念：“波函数” (Wave Function)，通常写作 Ψ 。

波函数 Ψ 是一个数学对象，它包含了关于一个粒子（比如电子）的全部信息。但为什么它需要 i 呢？

因为“波”有两个关键属性：

1. **振幅 (Amplitude)**: 波的高度。这决定了你在某个位置找到这个粒子的 *概率*。
2. **相位 (Phase)**: 波在周期中的位置（例如是波峰还是波谷）。这决定了它如何与其它波进行“干涉”。

一个普通的实数只能描述振幅。而一个复数 $a + ib$ ，则可以同时打包这两个信息（振幅和相位）。 i 的存在，使得波函数不仅能告诉我们“概率”，还能告诉我们“干涉”。量子力学的核心方程——薛定谔方程——描述的正是这个复数波函数 Ψ 随时间的演化，而 i 正是这个演化（旋转）的核心驱动力。

[原文] 物理学家们一直明白 i 只是一个数学上的虚构。诸如质量和动量等真实物理量平方后绝不会产生负值。但这个表现得如同 $i^2 = -1$ 的虚数，却似乎构成了量子世界的核心。

[专家解读] 这段话精准地指出了量子力学中“真实”与“虚构”之间的鸿沟。

我们可以做一个“游戏”类比：

- **真实物理量 (实数)**: 这就像是你在电脑屏幕上看到的游戏画面。你测量一个电子的位置、动量或能量，你得到的结果永远是一个实数（比如 1.6×10^{-19} 焦耳）。
- **波函数 (复数)**: 这就像是电子游戏运行的底层源代码。

物理学家的困惑就在这里：为什么这段“源代码” (Ψ) 必须用复数 i 来编写，才能计算出“游戏画面”（测量结果）？我们永远无法在实验室里直接“测量”到波函数本身，我们只能测量它运行的结果。但我们确信，这个无法被观测的“核心”却依赖于 i 。这在哲学上让人深感不安。

[原文] 在推导出这个充斥着虚数 i 的方程——也就是量子实体的运动定律——之后，埃尔温·薛定谔曾表达过希望它能被一个完全实数的版本所取代。（“这个方程在形式上无疑还比较粗糙”，他在 1926 年写道。）尽管薛定谔对此表示不满，但虚数 i 还是留了下来，新一代的物理学家们接过了他的方程，并没有太多顾虑。

[专家解读] 薛定谔本人对 i 的出现感到非常“不满”。作为一个思想植根于经典物理学的人，他希望他的“波函数”能代表一种真实的、物理的振动，就像一根琴弦在空气中振动一样。但 i 的存在，让这个波函数变成了数学上的抽象存在，一个“复数波”，这

摧毁了他对理论的“实在论”解释。

但为什么 i 还是“留了下来”？因为薛定谔方程太成功了。它完美地预测了原子光谱，并最终奠定了现代化学、材料科学和电子学（如晶体管）的基础。

这在科学史上很常见：当一个理论的预测能力如此强大时，大多数“新一代”的科学家会选择“闭嘴，计算！”(Shut up and calculate!)。他们不再纠结于这个工具（方程）在哲学上意味着什么，而是专注于使用这个工具来解决实际问题。这篇文章的核心，就是时隔近百年后，物理学家们终于重新捡起了薛定谔最初的“哲学不满”。

[原文] 接着，2021 年，量子理论中虚数的作用再次成为研究热点。一个研究团队提出了一种方法，通过实验来验证 i 是否对量子理论是必需的，还是仅仅是一种数学上的便利。随后，两个团队迅速进行了复杂的实验，并得出了所谓的明确证据，证明量子理论确实需要虚数 i 。

[专家解读] 这是故事的第一个转折点：辩论从“哲学”走向了“实验”。

在2021年之前， i 是“必需”还是“便利” 只是一个哲学问题。但在2021年，《自然》杂志上的一篇文章（由Gisin团队主导）提出了一个天才般的设计。他们设计了一个复杂的“量子游戏”，并从理论上计算出：

1. 如果量子理论必须使用复数 i （标准理论，CQT），玩这个游戏可以得到很高的“分数”。
2. 如果量子理论可以只用实数（实值理论，RQT），那么玩这个游戏的分数会有一个更低的上限。

这突然之间就成了一个可以被证伪(falsifiable)的物理问题。随后，在2022年，两个顶尖实验团队（其中最著名的是中国科学技术大学(USTC)的团队）在实验室里真正玩了这个游戏。他们的实验“得分” 远高于实值理论的上限，完美地符合了复数理论的预测。

在2022年，科学界的结论似乎是“明确的”： i 确实是量子理论不可或缺的核心。

[原文] 然而，今年却有一系列论文推翻了这一结论。

[专家解读] 这是故事的第二个、也是更深刻的转折点。它完美地展现了科学的“自我修正”特性。

2022年的实验结果 看起来是“明确的”，但理论物理学家们（他们以“怀疑一切”为天职）回去仔细检查了2021年那篇理论论文 的数学前提。

他们发现了一个“漏洞”。

这篇2025年的《量子杂志》文章，要讲述的就是这个“漏洞”是如何被发现的，以及它如何推翻了“ i 是必需的”这个结论。这表明，一个实验的“数据”可能是完全正确的（USTC的实验是世界一流的），但对该数据含义的“解读”（即Gisin的理论）却可能建立在有缺陷的假设之上。

[原文] "埃尔温·薛定谔对他的名字命名的方程使用复数感到不满，希望找到它的替代方案。但他的方程一直沿用至今。" 公共领域

[专家解读] 这张图的说明再次强调了我们之前讨论过的历史背景。薛定谔的“不满”是哲学家和物理学家“实在论”立场的体现。他希望理论能直接描述现实。一个包含 i 的方程，似乎在说“现实”本身是“虚”的，这让他无法接受。

“但他的方程一直沿用至今”——这句平淡的话背后，是“实用主义”的巨大胜利。这个方程太好用了，以至于整个物理学界（在2021年之前）都集体决定“搁置”这个哲学问题。

而我们即将读到的2025年的新进展，正是对薛定谔百年“不满”的一次迟来的回应。这些新论文在说：“埃尔温，你是对的。我们可以找到一个替代方案。但我们也将向你展示，为什么你最终还是选择了那个包含 i 的版本。”

[原文] 三月，一群德国理论学家驳斥了 2021 年的研究，提出了一种与标准版本完全等价的实值量子理论。随后，法国的两位理论学家也提出了他们自己的实值量子理论。到了九月，另一位研究人员从量子计算的角度进行了研究，同样得出了结论：虚数单位 i 在描述量子现实时并非必需。

[专家解读] 这是“反击”的三大主力，它们的“趋同性” (Consilience) 使得这个新结论非常可信。

1. **德国/法国团队**：他们是理论物理学家。他们没有质疑USTC的实验数据，而是从根本上攻击了Gisin的理论。他们构建了一种新的实值量子理论(RQT)。这个新理论是“完全等价的”，意思是它也能完美预测USTC实验的高分。

2. **量子计算研究者**：这是来自谷歌量子AI的克雷格·吉迪恩 (Craig Gidney)。他从一个完全不同的角度——“一个量子计算机需要什么才能工作？”——得出了相同的结论。他证明了量子算法中可以绕过所有需要 i 的操作。

当两个独立的理论物理团队和一位来自不同领域的量子计算专家，在同一年得出了完全相同的结论时，科学界就必须严肃对待了。这个结论就是： i 并非必需。

[原文] 虽然实值理论没有明确使用虚数单位 i ，但它们依然保留了其独特的算术特征。这引发了一些人的疑问：量子力学中的虚数成分，甚至现实本身，是否真的被完全摒弃了？

[专家解读] 这是整篇报告中最深刻、也最微妙的哲学观点，我们可以称之为“ i 的幽灵”。

德国和法国的团队确实“消除”了符号 i 。但是，为了让他们的“纯实数”理论能够工作（即能够复制标准量子力学的预测），他们被迫发明了一套极其复杂的实数数学规则。而这套新规则的唯一目的，就是为了模拟 i 的功能（即 $i^2 = -1$ 和它旋转90度的能力）。

我们可以做一个类比：假设你决定“消除”英语中的字母 'X'。你当然可以做到。但从今以后，你必须把 'fox' 写成 'foks'，把 'extra' 写成 'ekstra'。你确实“消除”了符号 'X'，但你被迫发明了一个新的、更笨拙的规则（'ks'）来完美地复制 'X' 的功能。

所以，物理学家们并没有真正“摒弃” i 的功能。他们只是把 i “藏”了起来，用更复杂的形式（比如一个2x2的实数矩阵）“重现”了它。 i 的“幽灵”（它的算术特征）依然存在于新理论的核心。

第二部分： i 的起源与贝尔测试的升级

[原文] “数学公式确实引导我们理解物理世界的本质，”罗格斯大学的物理学哲学家吉尔·诺斯表示。

[专家解读] 吉尔·诺斯 (Jill North) 的这句引言为整场辩论设定了哲学基调。她提醒我们，这场关于“用什么数学”的辩论不是小题大做。数学不仅仅是物理学家的“计算工具”；它更是我们“思考现实”的框架。

如果我们的最佳框架（标准量子力学）必须使用 i ，那它就在暗示“物理世界的本质”具有某种“虚”的、复数的维度。如果 i 可以被消除（正如2025年的论文所声称的），那么这就强化了我们的直觉：现实世界在根本上是“实”的。

然而，正如我们刚讨论过的（“ i 的幽灵”），即使在“实”的框架中， i 的结构也依然存在。这暗示“物理世界的本质”具有一种结构，而 i 恰好是描述这种结构最简洁的符号。

[原文] 不可能数值 1637 年，正值阿姆斯特丹郁金香狂热（一种导致郁金香球茎价格高得离谱的荷兰花卉狂热）的顶峰，勒内·笛卡尔处理着方程，其解也似乎不可能。以 $x^3 - 6x^2 + 13x - 10 = 0$ 为例，笛卡尔写道，它的解“并不总是实数，有时只有虚数。……有时没有任何数量能与想象中的值对应。”你可以为 x 代入的三个数是 2， $2 - i$ 和 $2 + i$ 。后两个数，每个数都具有实部和虚部，形式为 $a + ib$ ，后来被称为复数。

[专家解读] 这篇文章通过笛卡尔（René Descartes）的历史，为我们提供了理解 i 的绝佳视角。笛卡尔正是那个创造了“虚数” (imaginary) 一词的人，他使用这个词本意是为了贬低它，意指它们是“想象出来的”，不“真实”。

但历史的讽刺在于，数学家们很快发现，这些“虚数”是解决实数问题的必要工具。例如，在17世纪，数学家们发现，要找到某些三次方程的三个实数解，计算过程必须绕道进入“虚数”领域。你必须在计算中引入 i ，即使你知道 i 会在最终答案中“奇迹般地”消失。

这与量子力学形成了完美的历史呼应：

- **17世纪的数学：**为了得到真实的解，计算过程必须经过“虚数” i 。
- **20世纪的物理：**为了得到真实的测量预测，理论方程必须包含“虚数” i 。2025年的新论文，就像是终于有人找到了一个极其繁琐的、纯实数的方法来解那个17世纪的三次方程。这在数学上很了不起，但它并不能否认“绕道 i ”这条路径的自然性和优越性。

[原文] 笛卡尔曾不以为然，但复数后来因其广泛的应用（如几何学、光学和信号分析等领域）而被人们接受。

[专家解读] 从笛卡尔的“鄙视”到现代工程学（如信号分析、电路）的“核心工具”，复数的地位发生了逆转。为什么？因为复数 $a + ib$ 是描述“波”的完美数学语言

。

任何“波”（无论是光波、声波还是电路中的交流电）都有两个关键特征：**振幅**（波的强度）和**相位**（波的位置）。复数 $a + ib$ （或者用极坐标表示的 $Ae^{i\theta}$ ）可以用一个数字就完美地封装这两个信息（ A 是振幅， θ 是相位）。

在经典物理学（如光学）中， i 只是一个**便利的工具**。工程师用它来简化计算，但在最后一步，他们总会“取实部” (Take the real part)，把 i 扔掉，因为他们知道“真实”的电场是一个实数。

[原文] 薛定谔虽然不情愿地承认了复数在量子理论中的便捷性。他的方程描述了波函数的演化，波函数代表了物体所有可能的量子状态（这些状态会像波一样发生相消或相长干涉）。尽管量子系统的实际测量结果总是实数，但薛定谔的波函数却是复值的。“量子理论是首个将复数置于核心地位的物理理论，”威廉姆斯学院的量子信息理论家比尔·沃茨如是说。

[专家解读] 这段话指出了经典物理和量子物理的**根本区别**。

在经典物理中， i 是**可选的、便利的**。

但在量子物理中， i 似乎是**必需的、核心的**。薛定谔发现，他无法在最后“取实部”把 i 扔掉。 i 被**内置**于最核心的运动定律（薛定谔方程）之中。

为什么？关键在于“干涉” (Interference)。在量子力学中，我们相加的不是“概率”（概率总是正实数），而是“概率幅” (probability amplitudes)，也就是那个复数的波函数 Ψ 。

- 如果两个概率幅（波）“同相”（例如 1 和 1），它们相长干涉（ $1 + 1 = 2$ ，概率变为 $2^2 = 4$ ）。
- 如果它们“反相”（例如 1 和 -1 ），它们相消干涉（ $1 - 1 = 0$ ，概率为 0）。
- 但 i 引入了**无限多种**新的干涉方式：如果 1 和 i 相遇呢（它们“正交”，相差90度）？ $(1 + i)$ ，其概率是 $|1 + i|^2 = 1^2 + 1^2 = 2$ 。

i 的存在，使得量子世界的“干涉”可能性 远比经典世界丰富。比尔·沃茨 (Bill Wootters) 的话点明了这一点：量子理论是**第一个**将这种复数干涉置于**现实核心**的理论。

。

[原文] 一种表示复数 $a + ib$ 的方式是将其视为平面上的一个点，其中 a 对应于实数轴上的位置， b 对应于虚数轴上的位置。每个复数都可以看作是一个从原点到复坐标 (a, b) 的向量。这些复向量遵循复数特有的数学规则：例如，乘以虚数单位 i 会将向量逆时针旋转 90 度。

[专家解读] 这是理解整场辩论的关键几何图像，即“阿甘图” (Argand diagram)。

请高三的同学们一定记住这个视觉模型：

- x 轴 是“实数轴”（我们熟悉的数轴）。
- y 轴 是“虚数轴” ($i, 2i, 3i...$)。
- 一个复数 $a + ib$ 就是这个二维平面上的一个点，或者说一个从原点 $(0, 0)$ 指向 (a, b) 的向量（箭头）。

这个图像的魔力在于它揭示了 i 的真正“身份”： i 不是一个“数字”，它是一个“操作”——一个“旋转器”。

- 取一个向量，比如 1（指向 $(1, 0)$ ）。
- 乘以 i ：向量旋转 90 度，指向 $(0, 1)$ ，即 i 。
- 再乘以 i ：向量再旋转 90 度，指向 $(-1, 0)$ ，即 -1 。这完美地解释了为什么 $i^2 = -1$ 。它不是一个抽象的定义，它是一个几何事实：“旋转 90 度”这个动作做两次，等于“旋转 180 度”。

[原文] 这些特性使它们天然地适合波函数的量子态，而波函数也是遵循奇数组合规则的矢量。 分享这篇文章

[专家解读] “天然契合” (Natural Fit) ——这个词抓住了精髓。

为什么“契合”？

1. **波函数是矢量**：正如我们所见，波函数 Ψ 包含两个信息（振幅和相位），因此它可以被看作是复平面上的一个矢量（箭头）。
2. **量子演化是旋转**：薛定谔方程所描述的“波函数随时间的演化”，在数学上正是一种在这个复平面上的旋转。
3. **i 是旋转器**：复数 i 天生就是用来描述旋转的工具。

结论显而易见：量子力学（一个关于矢量旋转的理论）与复数（一种描述矢量旋转的数学）“天然契合”。 i 就像是薛定谔方程“量身定做”的钥匙。“奇数组合规则”(odd combination rules) 指的就是我们之前提到的“线性叠加”和“复数干涉”。

[原文] (opens a new tab) 邮件订阅 请将《量子杂志》订阅发送至您的邮箱 立即订阅 近期通讯 (opens a new tab)

[专家解读]（此为功能性文本，无学术内容，跳过解读。）

[原文] 2021 年，《自然》杂志上的一篇论文中，Marc-Olivier Renou（左图）、Nicolas Gisin 及六位合著者设计了一个实验，旨在推翻所有基于实数的量子理论。该实验随后得以实施。然而，今年的一项研究显示，该实验建立在有争议的假设之上。

[专家解读] 这张图的说明总结了我们故事的“三幕剧”：

- **第一幕 (2021):** Gisin团队 提出了一个理论蓝图。他们设计了一个实验，声称可以“推翻” (falsify) 所有实值量子理论(RQT)。
- **第二幕 (2022):** 该实验“得以实施”（主要由USTC团队完成）。实验结果似乎成功推翻了RQT，证明了 i 是必需的。
- **第三幕 (2025):** 高潮反转。今年（文章设定的年份）的新研究 指出，2021年的那个理论蓝图 建立在一个“有争议的假设” (contentious assumption) 之上。

这个“有争议的假设”正是整篇文章的核心，我们将在后面详细拆解它。它涉及一个叫做“张量积” (tensor product) 的数学概念。

[原文] 物理学家们一直试图用实数来定义等效向量。1960 年，瑞士物理学家恩斯特·施特克勒伯格提出了一种实值量子力学，通过一些技巧将波函数从复值空间映射到实数空间，以此模拟围绕虚轴的旋转。然而，与复值理论相比，实值理论显得更加复杂。例如，描述两个粒子的波函数需要四个复数，而将施特克勒伯格的理论扩展到两个粒子时，描述将增加到 16 个实数。

[专家解读] 这段话告诉我们，“消除” i 的尝试并不新鲜。施特克勒伯格 (Stueckelberg) 在1960年就证明了这在理论上可能的。

他做了什么？他本质上就是“拆解”了复数。他把一个复数 $\Psi = a + ib$ ，替换成了两个实数 a 和 b ，然后重写了所有方程。

但他立刻遇到了一个问题：“复杂性” (Complexity) 和“臃肿” (Bloat)。文章给的这个例子非常关键：

- **标准CQT**：描述两个粒子需要4个复数。
- 一个复数 = 两个实数。所以CQT总共需要 $4 \times 2 = 8$ 个实数参数。
- **施特克勒伯格的RQT**：需要 16 个实数参数。

这个理论更笨拙、更丑陋。它需要两倍的参数来描述同一个系统。这种“不优雅”导致它在几十年的时间里都被主流物理学界忽视了。

[原文] 尽管实值量子理论存在诸多不便，但在 2008 年和 2009 年，两个研究小组证明了这些理论可以用来重现贝尔测试的标准结果——贝尔测试是检验量子理论性质的关键工具。“对于许多情况，实际上你可以仅用实值理论就足够了，”沃茨说。那么，实值理论是否总是能得到相同的结果呢？

[专家解读] 尽管施特克勒伯格的RQT 理论很“丑”，但在本世纪初，物理学家们发现它“丑”得有道理。

他们检验了这个RQT理论，看它是否能通过“贝尔测试” (Bell Test)。贝尔测试是物理学家用来“审判”一个理论是否符合量子现实的“黄金标准”。

- **结果**：RQT 通过了标准贝尔测试。
- **含义**：这个“丑陋”的RQT理论（至少在标准贝尔测试中）给出的预测与“优雅”的CQT理论完全一样。

这让物理学家陷入了沉思。如果这两个理论（一个用 i ，一个不用）在所有标准实验中都给出相同的答案，那我们就永远无法通过实验来区分它们。

这直接引出了Gisin在2021年的问题：“那么，实值理论是否总是能得到相同的结果呢？”他猜测，也许在更复杂的、“非标准”的贝尔测试中，答案是“否”。

第三部分：2021年的“判决”与隐藏的“核心假设”

[原文] 核心假设 2021 年，包括日内瓦大学物理学家尼古拉斯·吉森在内的一组研究人员发现，可以通过让贝尔测试更复杂的方式来检验实值理论的边界。通常情况下，贝尔测试会创建一对“纠缠”粒子：这些粒子的状态是相互关联的，比如偏振相关联的光子。粒子被分开后，分别发送给被称为爱丽丝和鲍勃的两位参与者，他们各自测量粒子的偏振，然后相互比较结果。

[专家解读] 这一段首先为高三学生复习了“标准贝尔测试” (Standard Bell Test) 的设置：

- **1个纠缠源** (Victor)。
- **2个参与者** (Alice 和 Bob)。
- **核心**：Alice 和 Bob 测量结果的“相关性”。

约翰·贝尔 (John Bell) 在1964年证明，基于“局域实在论”（一种经典世界观）的相关性有一个“上限”。而量子力学（纠缠）允许的相关性可以超越这个上限。随后的实验证明，量子力学是对的。

Gisin 所做的，是把这个逻辑应用到了 i 的问题上。他设计了一个更复杂的测试，不是为了检验“局域实在论”，而是为了检验“实值量子理论” (RQT)。

[原文] 吉森的团队设计了一个定制的贝尔测试，使用两个独立的纠缠粒子源和三个参与者：Alice、Bob 和 Charlie。通过计算，他们发现，在实值量子理论中，纠缠粒子的极化相关性存在一个上限，而在复值量子理论中，这个上限更高。这不再是计算便利或哲学争论的问题，而是一个可以通过经验测试排除实值量子力学的方法。

[专家解读] 这就是Gisin实验 的核心设计，它是一个“量子网络”：

- **2个纠缠源**（源1 和 源2）。
- **3个参与者** (Alice, Bob, Charlie)。
- **布局**：
 - 源1 将一对纠缠粒子分别发给 Alice 和 Bob。
 - 源2 将另一对纠缠粒子分别发给 Bob 和 Charlie。

在这个精巧的“网络”中，Alice 和 Charlie 之间没有直接的纠缠，他们只通过 Bob 间接关联。

Gisin的“神来之笔”在于他计算 发现：

1. **RQT的“上限”**：如果你用实数来计算这个网络中的相关性，你能得到的最大“分数”是（打个比方）7.6。
2. **CQT的“超越”**：如果你用复数 i 来计算，你能得到的最大“分数”是（打个比方）8.5。

这就是“实验可证伪性” (falsifiability)！Gisin向实验物理学家们发出了挑战：“去实验室里玩这个游戏。如果你们的得分超过了7.6，你们就用实验证明了RQT是错误的， i 是必需的。”

[原文] 不久之后，中国科学技术大学（USTC）的一个研究小组进行了该协议的实验，发现纠缠光子之间的观测相关性远超实值理论的限制，表明复数对于描述这些量子状态是不可或缺的。

[专家解读] 中国科大（USTC）的团队（由陆朝阳、潘建伟等人领导）接受了这个挑战。他们是最擅长制造和操控“纠缠光子”的团队之一，他们拥有在实验室中搭建Gisin复杂“量子网络”所需的技术。

他们的实验在2022年完成，结果轰动了物理学界。

他们的实验“得分”确实“远超实值理论的限制”（即Gisin计算的7.6）。他们的结果完美地落在了复数理论(CQT)预测的区间内。

在2022年，科学界的主流叙事是：Gisin 提供了理论“判决书”，USTC 执行了实验“判决”。结论：RQT（实值理论）已被实验证伪。 i 不是便利，它是必需的。

[原文] 但尽管统计结果压倒性地表明了这一点，疑问依然存在。“复数就是两个实数加上一些计算规则，”德国航空航天中心的物理学家、新德文论文的合著者迈克尔·埃平说。“为什么不能只用实数来描述量子力学呢？”

[专家解读] 这就是科学的迷人之处。当实验结果与一种根深蒂固的数学直觉发生冲突时，真正的进步就要发生了。

迈克尔·埃平 (Michael Epping) 的直觉是纯粹逻辑上的：

- 一个复数 $a + ib$ 包含了两个实数的信息 (a, b)。

- 任何用一个复数 $a + ib$ 写的方程，在逻辑上总可以被拆分成两个相互耦合的、只含实数 a 和 b 的方程。

这种数学上的“等价性”让Epping 这样的理论家深感怀疑：USTC的实验 怎么可能“禁止” 我们使用一种在逻辑上等价的数学语言呢？

这种“冲突”——即“实验 说你做不到”和“逻辑 说你一定能做到”——促使Epping 和他的同事们回去疯狂地检查Gisin理论 的前提。他们断定：Gisin在计算RQT的“上限”时，一定搞错了一个“核心假设”。

[原文] 从左上方方向顺时针：迈克尔·埃平、达格玛·布鲁斯、安东·特鲁谢钦、赫尔曼·坎珀曼和佩德罗·巴里奥斯·希塔在最近的一篇论文中指出，使用复数更多是出于方便，而非必要性。

[专家解读] 这张照片展示了“反击”的德国团队。他们的核心论点，在2021年Gisin的论文 发表时就已经是一种“直觉”，但被2022年的USTC实验 压制了。

到了2025年（本文设定的年份），他们终于找到了Gisin理论 的“阿喀琉斯之踵”（致命弱点）。他们（以及法国团队）发表论文，明确“指出”：Gisin 和USTC 的结论是错的。 i 不是必需的，它只是极其方便。

第四部分：2025年的反击——张量积漏洞

[原文] “量子理论无需复数，” 物理学家蒂莫西·奥夫鲁蒙（左）和米夏·伍兹在最近的一篇论文标题中提出这一观点。

[专家解读] 这是法国团队 的论文标题。这个标题直截了当，充满了学术上的“火药味”。它直接否定了2022年USTC实验 和Gisin理论 所得出的结论。

他们之所以敢这么说，是因为他们找到了Gisin理论 中那个“有争议的假设”，并修复了它。

[原文] 法国里昂高等师范学院 Mischa Woods 和巴黎萨克雷大学 Timothée Hoffreumon，作为新法国论文的共同作者，也持怀疑态度。在 2021 年的论文中，Gisin 和他的同事对“张量积”做出了一个关键假设，这是一种数学运算，将描述 Alice

粒子和 Charlie 粒子的复向量组合成一个纠缠态。Gisin 和他的合著者假设，实值版本的量子理论将使用相同的张量积数学公式来组合状态。

[专家解读] 这是整篇文章的“技术核心”。我们必须理解什么是“张量积” (Tensor Product, $\otimes$)，以及Gisin的“关键假设”是什么。

让我们再次使用“语言”的类比：

1. **量子态** (如 Ψ_{Alice})：这就像是一个“单词”。
2. **张量积** ($\otimes$)：这是一种语法规则，它告诉你如何将两个独立的“单词”（如Alice的状态和Bob的状态）“组合”成一个有意义的“句子”（即 $\Psi_{Alice} \otimes \Psi_{Bob}$ ），这个“句子”描述了“Alice和Bob”的联合系统。

Gisin在2021年的论文 中做了什么？

- 他知道标准CQT（复数理论）使用一种“复数语法”，我们称之为 $\otimes_C$ 。
- 当他计算RQT（实数理论）的“上限”时，他理所当然地假设 RQT 也必须使用和 CQT 完全相同的“语法规则” ($\otimes_C$)。

法国和德国的团队 指出：这是一个致命的“稻草人”论证！RQT是一种不同的理论（一种“不同的语言”）。你不能强迫“德语” (RQT) 去使用“法语”的语法 ($\otimes_C$)，然后宣称“德语”无法表达复杂的句子！

[原文] 但是法国和德国团队认为，这种张量积的规则不适用于实值理论。打个比方，在平坦空间中，直角三角形的斜边总是遵循 $a^2 + b^2 = c^2$ 的规则。然而，这个规则不适用于弯曲空间中的三角形，比如印在球面上的一个三角形。最近，这两个团队提出了一种观点，即标准张量积是更一般的一类向量组合规则的一个特例。他们开发了不同的组合规则来创建实值量子理论，这些理论给出的预测与复值量子理论完全相同。

[专家解读] 文章给出的这个“几何类比”非常精彩，它强化了“不同语言有不同语法”的观点。

- **标准CQT (复数理论)**：就像“平坦空间”的几何学。它的“语法规则” ($\otimes_C$) 就像勾股定理 $a^2 + b^2 = c^2$ 。
- **实值RQT (实数理论)**：就像“弯曲空间”（如球面）的几何学。它必须使用不同的几何规则（即不同的张量积语法，我们称之为 $\otimes_R$ ）。

Gisin 的错误，就像是强迫球面上的三角形去遵守平坦空间的勾股定理，然后在他发现“行不通”（预测上限很低）时，便宣称“球面几何是错的”。

2025年的法国/德国团队 所做的，就是为RQT（球面几何）开发了正确的语法($\otimes_R$)。当他们使用这个新的、自治的RQT理论（即“使用德语自己的语法”）去计算Gisin的网络游戏时，他们发现——

这个新RQT理论的预测，与CQT（复数理论）的预测完全相同。

这意味着RQT（使用 $\otimes_R$ ）同样可以预测出USTC实验 观测到的“高分”。Gisin 划定的那条“红线”（7.6）消失了。CQT和新RQT在实验上无法区分。因此， i 不是必需的。

[原文] 量子计算领域的一项新进展也表明了如何避开复数的使用。量子计算机通过“逻辑门”来处理量子位。其中一种常见的逻辑门叫做 T 门，它会在复平面上旋转表示量子位状态的向量。去年九月，谷歌量子 AI 的量子计算专家克雷格·吉迪恩找到了一种方法，能够从任何量子算法中移除 T 门，并通过数值计算证明了量子计算并不需要复数。

[专家解读] 这是来自一个完全不同领域的独立佐证，极大地增强了“ i 非必需”这一结论的可信度。

1. **量子门(Gate)**：是量子计算机的“基本指令”。
2. **T门 (T-gate)**：在所有标准指令中，T门是最关键的那个必须使用 i 的门。它负责在复平面上执行一个特定的“旋转”。长期以来，它被认为是实现“通用量子计算”所必需的。
3. **Gidney的发现**：谷歌的Gidney证明，你可以不用T门。你可以用更多的、只包含实数的门（如Hadamard门和CNOT门）的组合，来模拟出T门的效果。

这个发现与德/法团队 的结论完美平行：

- **理论物理**： i （在薛定谔方程中）很方便，但非必需。你可以用更复杂的实数规则 ($\otimes_R$) 来模拟它。
- **量子计算**：T门（含 i ）很方便，但非必需。你可以用更复杂的实数门组合 来模拟它。

两个领域都指向同一个结论： i 是一个极其优雅的“快捷方式”，但不是逻辑上的“必需品”。

为了清晰地向高三学生展示这场辩论的核心技术点，以下是一个对比表格：

表格 1：量子理论两种“数学语言”对比

特性 (Feature)	标准量子力学 (使用 i) (Standard QM)	实值量子力学 (202 RQT)
基础“字母” (Basic "Alphabet")	复数 ($a + ib$)	实数对 ((a, b))
核心“词汇” (波函数) (Wave Function)	1个复数向量 (封装振幅+相位)	2个耦合的实数向量
核心“语法” (组合规则) (Combining Rule, $\otimes$)	简单的“张量积” ($\otimes_C$)	必须使用新的、更“积” ($\otimes_R$)
描述“旋转” (Describing "Rotation")	极其简单 (乘以 i)	非常繁琐 (例如，系数矩阵)
简洁性 (Elegance)	极高	极低，非常繁琐
实验预测 (2022年USTC实验)	与实验相符	与实验相符 (这是2025年的发现！)

第五部分：哲学终局：“自然契合”还是“不可或缺”？

[原文] "顺理成章" 拉特格斯大学的物理哲学家 Jill North 询问，为什么复数在量子力学中如此适用。 "Tori Repp"

[专家解读] 这张图和标题将我们带入了辩论的最终阶段。

2025年的论文（如表格1所示）证明了RQT是可行的（第6行），从而推翻了2022年的结论。

但这立刻导向了哲学家吉尔·诺斯 (Jill North) 提出的更深层的问题：既然RQT可行，那“为什么复数在量子力学中如此适用？” 换句话说：为什么RQT（第3、4、5行）如此复杂、繁琐、丑陋，而CQT（使用 i ）却如此简洁、优雅、自然？

[原文] 实值量子理论的可行性确实引发了诸多挑战。最核心的问题在于：为何其过程如此复杂？自量子力学诞生之初，这个问题就一直存在。薛定谔曾尝试采用实值波方程进行研究，但最终因其在计算上更为简便，如他在笔记中所言，选择了复数方程。

[专家解读] 我们又回到了1926年，回到了薛定谔本人。

这段话告诉我们，薛定谔本人就尝试过RQT。他也试图建立一个“纯实数”的理论（因为他讨厌 i ）。但他放弃了。

为什么？因为他发现，为了“消除” i ，他必须引入一套极其复杂繁琐的数学（正如2025年的论文所做的）。最终，薛定谔选择了“简洁性” (Simplicity) 和“优雅” (Elegance)。他不情愿地接受了 i ，因为 i 是让他的方程变得“简便”和“优雅”的钥匙。

这引出了科学哲学的“奥卡姆剃刀” (Ockham's Razor) 原则：当两个理论（RQT和CQT）能做出完全相同的预测时（正如2025年所证明的），我们应该选择更简单、更优雅的那一个。

[原文] 如今看来，量子理论似乎不再显式地需要虚数单位 i ，但 Schrödinger 所发现的简洁性可能依然有其自然合理性。“复杂的量子理论，凭借其天然的张量积结构，依旧显得更为精炼、优雅且数学上更为直接，”中国科学技术大学的实验物理学家、参与实施 Gisin 团队所提议的定制化贝尔测试的成员路超阳表示。

[专家解读] 这是一个非常有分量的引言。陆朝阳正是那位在2022年做了那个似乎“证明 i 必需”的实验的核心科学家之一。

在这段话中，他（在读了2025年的反驳论文之后）展现了科学家的诚信和洞察力。他没有固执于他2022年实验的最初解读（即“ i 是必需的”），而是接受了新的理论进展（即“张量积漏洞”）。

他将辩论的焦点从“必需 vs. 非必需”转向了“优雅 vs. 繁琐”。他承认，CQT（复数理论）的“天然的张量积结构” ($\otimes_C$) 是优雅的，而RQT的规则 ($\otimes_R$) 是人为且复杂的。这表明，在实践中，物理学家将永远继续使用 i 。

[原文] “即便将量子理论转化为实数，你依然能看到复数运算的显著特征，”沃茨说。即使那些将理论从复数中解放出来的人也承认，复数是自然而然的选择。实值理论不包

含虚数单位 i ，但它们复制了复数旋转向量的能力。我们“通过实数模拟复数”，正如海因里希·海涅大学杜塞尔多夫的物理学家安东·特鲁谢钦科，德国论文的合著者所言。

[专家解读] 这是对“ i 的幽灵”的最终确认，而且它来自德国团队作者本人（安东·特鲁谢钦科 (Anton Trushechkin)）。

这句话是整篇文章的“金句”：“我们‘通过实数模拟复数’”。

他们承认，他们没有真正“消除” i 的功能。他们只是用一个更笨重的实数对象（比如一个2x2的实数矩阵 $M = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$ ）来替换了符号 i 。请注意，这个矩阵 M 乘以它自己（ $M \times M$ ）得到的是 $\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ ，即 -1 乘以单位矩阵。

他们被迫用实数重建了一个功能上等同于 i 的结构。这场“消除” i 的运动，最终讽刺地证明了 i 所代表的数学结构（即复数代数）是多么基本和不可避免。

[原文] 相关内容 ‘一团糟’：一次令人费解的量子理论百年庆典之旅 ‘形而上学实验’ 探索我们关于现实的潜在假设 贝尔定理如何证实了“幽灵般的超距作用”确实存在

[专家解读] 这些“相关内容”将我们正在讨论的文章置于一个更广阔的背景中。

- “形而上学实验” (Metaphysical Experiments)：这正是Gisin 和USTC 所做的实验。他们正在使用实验工具来测试我们关于现实的哲学假设（例如，“现实是用实数写的吗？”）。
- “贝尔定理” (Bell's Theorem)：贝尔定理是所有“形而上学实验”的“鼻祖”。它测试了“局域实在论”。Gisin的实验 则是测试“实值公理”。它们都属于“量子基础”这一深刻的领域。

[原文] 北方这位物理哲学家赞同陆的看法。“即便复数并非真正不可或缺，它们确实形成了一种特别契合量子力学的表述，”她表示。她的目标在于“找出某种独特地属于量子力学”的属性，这种属性有助于这种良好的契合。一个可能的候选者便是自旋，这是量子粒子特有的属性，在经典物理学中没有对应物。”

[专家解读] 在证明 i “并非不可或缺”之后，哲学家吉尔·诺斯 (Jill North) 将问题推向了终极：“为什么 i 如此‘契合’？” 为什么大自然偏爱这种数学语言？

她提供了一个强有力的“候选者”：**自旋 (Spin)**。

- **什么是自旋？** “自旋” 是粒子（如电子）的一种内在角动量。它是一种纯粹的量子属性，在经典物理学中没有对应物（它不是一个真正“旋转”的小球）。
- **为何自旋与 i 相关？** 描述“自旋”的数学（例如泡利矩阵）天然地就包含了 i 。自旋的本质与“旋转”（在抽象空间中）紧密相连，而 i 正是旋转的数学语言。

诺斯 的猜想是：量子力学之所以“天然契合”复数 i ，也许正是因为它必须描述“自旋”这一古怪的、非经典的、与旋转相关的属性。

[原文] 复数在实值理论中的残留本质让一些研究人员感到犹豫；关于虚数 i 的消亡的报告可能有些夸大了。“你可以以任何你喜欢的方式写下来，但它们不可避免地必须像复数一样相乘，”牛津大学的物理学家 Vlatko Vedral 说。他的愿望是找到量子力学更简单的公理——直观原则，这些原则将允许理论家以全新的形式重新推导出该理论。

[专家解读] Vlatko Vedral 的评论总结了“ i 的幽灵”这一观点。他说，你可以“消除” i （即用一个笨拙的2x2矩阵来代替它），但你无法消除它的行为：“它们不可避免地必须像复数一样相乘”。 i 所代表的数学结构（即复数代数）是不可避免的。

Vedral的愿望代表了理论物理学的“圣杯”：寻找“更简单的公理”。我们知道量子力学的方程（How），但我们不理解它的“直观原则”（Why）。爱因斯坦的相对论是建立在“光速不变”这样直观的公理上的；而量子力学不是。

[原文] “我们确实没有一种单一的替代方案来改进 100 年前量子力学已经完成的方式，”他说，“问题是，为什么？为什么我们不能超越这一点？”

[专家解读] 这是留给高三同学们的最终思考题。

在经历了这场“ i 是必需的”和“ i 被消除了”的过山车之后，我们回到了一个令人谦卑的起点：100年前，薛定谔、海森堡和狄拉克等人构建的（包含 i 的）标准量子力学，依然是描述现实最优雅、最简洁、最强大的方式。

这场关于 i 的辩论，不是一个终点，而是一个起点。它迫使物理学家们去质问他们最基本的假设。

- 2021年的实验 问：“ i 是必需的吗？”
- 2025年的论文 回答：“不是。”

- 而这个“不是”的答案，又迫使我们去问一个更难的问题：“既然 i 不是必需的，那为什么它如此优雅、如此契合、如此不可避免？”

通过“消除” i ，物理学家们最终比以往任何时候都更深刻地证明了 i 所代表的数学结构，是物理现实（如自旋）的核心特征。