
事实不是消失了， 而是失去了“上帝视角”

从 Proietti 的扩展维格纳朋友实验
到观察者物理学的形成

在量子世界中，可能不存在一个所有观察者
都能够共享的客观事实集合。

整理 · 排版：通用观察者理论系列综述
涵盖：591 递归困境 · 563 Epiplexity · 568 事件绝对性
576 Ruliad 观察者 · 639 退相干涌现世界 · 648 最小观察者

引言

2019 年，Massimiliano Proietti 等人在《Science Advances》发表了《Experimental test of local observer independence》。这篇论文最吸引眼球的一句话，大概就是：**在量子世界中，可能不存在一个所有观察者都能够共享的客观事实集合。**

如果只看到这里，很容易把它理解成一种极端哲学结论：现实不存在、世界是主观的、不同的人可以拥有不同的宇宙。

这其实不是论文真正证明的东西。它真正触碰的是一个更加精确、更深的问题：

如果观察者自己也是物理世界的一部分，那么不同观察者建立的事实，是否一定能够被放进一个统一的、与观察者无关的“全局事实表”里？

Proietti 的实验之所以重要，并不是因为它证明了“没有现实”，而是因为它第一次把维格纳朋友这个长期停留在思想实验和量子哲学中的问题，转换成了一个能够用实验数据检验的不等式问题。

如果把这篇论文和你网站现有的 591、568、576、639 以及最新的 648 放在一起看，就会发现它其实处于一条越来越清晰的理论演化线上：

维格纳朋友 → 观察者独立事实 → FR 悖论 → Bell-Wigner 实验 → Local Friendliness → Causal Friendliness → 广义观察者理论。

这条线最终问的已经不只是“波函数什么时候坍缩”，而是一个比传统测量问题更根本的问题：

物理学中的“事实”究竟是什么？

1 维格纳朋友真正制造的不是“意见分歧”，而是两个物理描述同时成立

先回到 1961 年的维格纳朋友思想实验。假定一个量子系统处于叠加态：

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle + |V\rangle). \quad (1)$$

朋友 F 待在一个完全封闭的实验室里，对它进行测量。朋友看到的是一个确定结果，比如 H。于是对于朋友来说：

$$|\psi\rangle \rightarrow |H\rangle. \quad (2)$$

事情已经发生了。他的仪器上出现了 H，他的大脑里形成了“我看到 H”的记忆，实验记录里也写下了 H。

如果我们把“事实”理解为一个物理记录，那么在朋友看来，“光子的偏振是 H”已经是事实。可是实验室外还有维格纳 W。如果维格纳不知道测量结果，而且整个实验室与外界完全隔绝，那么按照薛定谔方程，他没有理由在朋友进行测量的那一瞬间突然插入一次波函数坍缩。相反，他应该写成：

$$\frac{|H\rangle + |V\rangle}{\sqrt{2}} |F_0\rangle \rightarrow \frac{|H\rangle|F_H\rangle + |V\rangle|F_V\rangle}{\sqrt{2}}, \quad (3)$$

这里的 $|F_H\rangle$ 表示“朋友记录 H”， $|F_V\rangle$ 表示“朋友记录 V”。

也就是说，对于外面的维格纳来说，朋友并没有进入一个唯一确定状态，而是与光子发生了纠缠。这并不是“朋友认为 H，维格纳认为 V”。那只是普通的信息不完全。真正诡异的是：

朋友认为确定结果已经发生；维格纳却认为“朋友得到确定结果”这件事本身仍处于量子叠加。

而且原则上，维格纳可以通过一个精心设计的联合干涉测量，检验整个“光子 + 朋友记录”系统是否仍然保持量子相干性。

Proietti 论文正是从这里出发。作者明确指出，朋友的测量结果可以存进一个物理记忆中；从朋友视角，这是一个确定事实；从维格纳视角，“粒子 + 朋友记录”仍然可以处于纠缠态，而维格纳可以通过干涉实验验证这个状态。

所以维格纳朋友真正危险的地方，是把观察者从理论之外拉进了理论内部。传统科学有一个隐含结构：

$$\text{观察者}_1 \longrightarrow \text{观察世界}. \quad (4)$$

观察者本身默认站在方程之外。但是如果量子力学是普遍理论，那么必须允许：

$$\text{观察者}_2 \longrightarrow (\text{观察者}_1 + \text{被观察系统}). \quad (5)$$

于是观察者也成为量子系统。再进一步，还可以有：

$$\text{观察者}_3 \longrightarrow (\text{观察者}_2 + \text{观察者}_1 + \text{系统}). \quad (6)$$

这就是一种潜在的递归结构。

你网站 591 关于 FR 悖论的材料正好把这一点进一步推到极端：如果量子力学真正具有普遍性，它不仅应该描述光子和原子，也应该描述实验设备乃至使用量子力学进行推理的物理学家。你收录的材料把这一点概括为 FR 中的假设 Q，即“量子理论适用于一切事物”。

因此，维格纳朋友根本不是一个关于“意识神秘性”的边缘故事。它实际上是在追问：

物理理论能否无矛盾地描述正在使用这个物理理论的观察者自己？

2 Brukner 最关键的一步：把“事实有没有绝对性”变成概率论问题

单独一个维格纳和朋友，还很难形成真正的实验判决。因为面对两个描述，你总可以说：朋友使用自己的信息描述系统；维格纳使用自己的信息描述系统；他们不过是在使用不同的条件概率。那么到底什么东西可以被实验否定？

Časlav Brukner 的关键贡献，是把维格纳朋友结构和 Bell 实验结合起来。把实验复制成左右两套。左边有 Alice 和她的朋友 Charlie，右边有 Bob 和他的朋友 Debbie。Charlie 和 Debbie 首先各自测量一枚来自纠缠源的量子系统。

然后 Alice 和 Bob 各自可以做两种选择。第一种是直接读取朋友留下来的记录，这相当于问“你刚才到底看到了什么？”，称为

$$A_0, \quad B_0. \quad (7)$$

第二种选择完全不同。Alice 不把朋友记录当作一个已经完成的经典事实，而把“原光子 + 朋友的记忆”重新作为一个整体量子系统，对它进行联合干涉测量，这称为 A_1 ；Bob 同样可以选择 B_1 。于是我们得到四种“事实”：

$$A_0, A_1, B_0, B_1. \quad (8)$$

这里隐藏着一个非常深的变化。问题已经不再是“朋友和维格纳谁描述得对？”，而变成：

这四个可能的观察结果能否被认为同时属于同一个客观世界？

Brukner 将“观察者独立事实”形式化得非常明确：不同观察者的观察命题如果都是客观事实，那么它们应该能够共同组成一个布尔代数，并能够赋予统一概率。换句话说，我们应该能够同时谈论这些事实的真值，而不取决于最终选择了哪个测量。

这一步极其重要。因为“客观现实”这样一个听起来很哲学的词，突然被翻译成了数学：

$$P(A_0, A_1, B_0, B_1). \quad (9)$$

如果存在这样一个联合概率分布，就意味着虽然实验过程中不可能一次把四个量全部测出来，但理论上这四项都可以被看成同一份世界事实表中的不同栏目。

你可以把它想象成宇宙后台的一张 Excel 表：

Alice 朋友	Alice	Bob 朋友	Bob
A_0	A_1	B_0	B_1

你最后选择打开哪两列，并不重要。剩下两列虽然没有打开，也依然应该存在一个确定值。这就是这里所谓的 **Observer-Independent Facts**。它比“桌子客观存在吗”精确得多。

3 真正受到检验的是三个假设能不能同时成立

在观察者独立事实 O 之外，再增加两个 Bell 实验中非常熟悉的假设。

第一个是局域性 L ：Alice 选择怎样测量，不应该瞬间改变远方 Bob 的结果；反之亦然。第二个是自由选择 F ：Alice、Bob 选择 A_0/A_1 、 B_0/B_1 的过程，不应该事先和待测系统中的隐藏信息暗中串通。然后加上：

$$O = \text{Observer-Independent Facts}. \quad (10)$$

那么 $L + F + O$ 会推出一个 Bell 型约束。具体来说：

$$S = \langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_1 B_0 \rangle + \langle A_0 B_1 \rangle - \langle A_0 B_0 \rangle \leq 2. \quad (11)$$

Proietti 论文明确指出，如果存在统一联合概率 $P(A_0, A_1, B_0, B_1)$ ，并且满足局域性和自由选择，那么相关性必须服从这个 CHSH 型 Bell-Wigner 不等式。

于是一个原来像形而上学的问题突然获得了实验判据。如果实验得到 $S > 2$ ，那么逻辑上只能推出：

$$\neg(L \wedge F \wedge O). \quad (12)$$

也就是说：

局域性、自由选择和观察者独立事实，不可能全部同时成立。

这一句话应该作为理解整篇论文的核心。因为网上经常把这项实验传播成“科学家证明了客观现实不存在”，这是过度解读。真正严格的结果不是 $\neg O$ ，而是 $\neg(L \wedge F \wedge O)$ 。只有当你额外坚持 L 和 F 时，才能推导 $\neg O$ 。

作者自己的摘要也是这样表述：**如果坚持 locality 和 free choice，那么实验结果意味着量子理论应当以观察者依赖的方式理解**。因此综述第 30—31 行的表达其实是对的：只有“如果坚持 L 和 F ”，才能推出 O 需要被放弃。但把它进一步概括成“客观事实假设的破产”，哲学力度就略强了一点。

4 六个光子是怎样扮演四个“观察者”的？

实验最容易让人产生误解的第二点，是“朋友”到底是什么。很多新闻报道会让人感觉，实验室里真的坐了四个人，然后几个人看到了相互矛盾的现实。事实上不是。

Proietti 使用的是一个六光子系统。中央纠缠源 S_0 产生两个 1550 nm 偏振纠缠光子，分别送往 Alice 朋友和 Bob 朋友一侧。随后另外两个纠缠光子源 S_A 和 S_B 提供辅助光子。

最关键的问题是：**为什么一枚光子可以叫“朋友”**？作者干脆给出了一个极简观察者定义：

观察，就是从另一个系统提取信息并将其存储起来。

因此，只要一个物理系统能够“提取信息 $\rightarrow$ 存储信息”，它就满足这个实验所需要的 observer 定义。不要求意识、不要求语言、不要求能够理解量子力学，甚至不要求复杂计算能力。Proietti 特别强调，他们所检验的 no-go theorem 并不像 FR 那样要求“agent 使用量子理论进行推理”，这里只要求系统完成一次测量，并把结果记录在物理记忆中。

实验中，fusion gate 对来自 S_0 的光子进行非破坏性偏振测量，并把“看到 H 还是 V”的信息储存在另一个辅助光子的偏振状态中。于是辅助光子成为朋友的 memory。

之后 Alice 有两个选择。如果测量 A_0 ，她直接读取朋友的记忆，这等价于承认“朋友刚才已经建立了一个事实”。如果测量 A_1 ，她则把“原光子 + 朋友记忆”重新当成一个量子整体，进行纠缠基测量，这实际上是在问“这个整体是否仍保持量子相干？”Bob 一侧完全一样：Alice 和 Bob 可以直接读取朋友的存储器，也可以进行联合 Bell 态测量。

这里出现了量子测量问题最尖锐的版本：

同一个朋友记录，一方面被作为“已经发生的事实”读取；另一方面又必须保留足够的量子相干性，供超级观察者进行干涉。

5 实验结果：2 不是一个普通数字，而是“统一事实账本”的边界

这场实验非常困难。为了估算四项相关函数，团队测量了 64 种投影设置，总共运行约 360 小时，最后只得到 1794 个六光子符合事件。实验结果为：

$$S_{\text{exp}} = 2.416 \pm 0.075, \quad (13)$$

而观察者独立事实模型给出的边界是 $S \leq 2$ 。实验结果超过边界五个标准差以上。

补充材料中的另外两种验证方案也被放在一起：

方案	S 值	是否超过 2
标准方案	2.416 ± 0.075	是 ($\sim 5\sigma$)
一致性定义方案	2.407 ± 0.073	是
偏振器替代部分干涉方案	2.346 ± 0.110	是

其中后两个数值的意义尤其值得注意。研究人员实际上是在检查：“是不是我们对朋友记录的定义太特殊，才人为制造出了违背？”结果改变朋友记录的具体测量方式以后，不等式违背仍然存在；偏振器方案虽然统计显著度下降，但仍超过经典界限。

所以真正被击穿的不是某一个具体光路技巧，被击穿的是更抽象的结构：

$$P(A_0, A_1, B_0, B_1) \quad (14)$$

这种**所有观察事实都预先能够共存于同一联合概率空间**的想法。

这是这篇论文最值得理解的地方。经典世界观在很大程度上默认：世界有一份完整状态，观察只是读取其中一部分。而这里的实验暗示：**量子世界不同观察关系所产生的事实，未必能够全部嵌入同一个经典式全局状态描述**。这已经不仅是“不确定性”，它触碰的是**事实空间本身能不能全局拼接**。

6 它没有证明“现实不存在”，而是限制了一种特殊的客观实在论

到这里必须做一个非常重要的区分。假如今天 Alice 看见实验室桌子上有一个杯子，Bob 走进来通常也会看到那个杯子。Proietti 实验没有证明：Alice 可以看到杯子、Bob 可以看到一头大象，然后两种现实都同等有效。完全不是这个意思。

日常宏观世界有强烈退相干。环境中数以天文数字计的光子、空气分子、热辐射不断复制物体的信息。一个杯子的位置被空气记录、被光子记录、被桌面记录、被你的视网膜记录。这些信息形成大量冗余副本。因此宏观事实具有极强稳定性。

你网站 639 关于 David Wallace 和埃弗雷特诠释的文章正好强调了这一点：环境退相干使宏观分支迅速正交化，不同分支之间的干涉项变得极小，于是稳定的经典世界作为一种“真实模式”涌现出来。

所以实验真正攻击的不是普通意义上的现实主义，而是一种更强的要求：

无论观察者处于哪一个层级，无论是否还能对其记录进行量子干涉，无论不同测量是否互不相容，都存在一套已经确定的全局事实，能够同时赋值给所有观察者。

这是一种“上帝视角事实表”。Proietti 实验告诉我们的更准确结论是：**量子相关性拒绝这样一份简单的经典全局账本——至少在同时坚持局域性和自由选择时如此。**

所以，与其说“客观现实不存在”，不如说：

客观性可能不是底层世界预先写好的一组全局真值。

这两句话差别极大。

7 把它和 591 的 FR 悖论放在一起，真正的主题就显出来了

Frauchiger–Renner 悖论走的是另一条路线。Proietti/Brukner 路线关注联合概率，FR 关注的是多个观察者之间的逻辑推理。FR 大致要求三个条件：

Q = 量子理论普遍有效， C = 不同观察者的确定知识可以一致组合， S = 每次测量只有一个结果。
(15)

然后证明 $Q + C + S$ 不能同时成立。你网站 591 正是围绕这一逻辑展开，其中明确总结：FR 结果意味着无法同时保留“量子力学普遍适用”“观察者知识可无矛盾组合”和“测量只有单一结果”三项假设。

从这个角度看，FR 和 Proietti 极其相似。FR 问：**Alice 知道 Bob 知道 Charlie 知道某件事以后，这些知识能不能全部无矛盾合并？**Proietti 问：**Alice、Bob 及其朋友的观察结果能不能全部塞进一个统一联合概率分布？**前者是逻辑层面的“知识拼接”，后者是概率层面的“事实拼接”。

所以可以非常形象地概括：

FR 是维格纳朋友的逻辑版本；
Brukner–Proietti 是维格纳朋友的 Bell 版本。

二者共同攻击一个传统上非常自然的假设：如果每一个局部观察者都得到一个真实事实，那么这些事实最终一定可以从“上帝视角”无矛盾地合并。量子理论告诉我们：**这一步合并，并不是免费的。**这或许才是整个研究方向最深的地方。

8 2020 年的 Local Friendliness 把问题进一步收紧了

Proietti 实验并不是故事终点。2020 年，Bong、Wiseman、Cavalcanti 等人在《Nature Physics》发表了著名的 Local Friendliness no-go theorem。他们重新整理维格纳朋友结构，提出三项条件：**No-Superdeterminism**、**Locality**，以及 **Absoluteness of Observed Events (AOE)**。

AOE 的意思尤其关键：

一个已经被观察到的事件，是绝对发生的，而不是仅相对于某个观察者发生。

他们证明，只要量子演化能够控制到观察者尺度，这三项条件仍然不能全部保留，而且得到的约束在某些意义上比普通 Bell 定理更强。这时问题已经从“是否存在 observer-independent fact?” 被推进为：

已经发生的观察事件是否具有绝对性？

注意“绝对性”两个字。按照经典常识，一件事如果已经发生，就发生了。我们可以不知道、可以没有记录、甚至可以以后忘掉，但是“发生过”这个真值不应该改变。量子维格纳朋友场景却逼迫我们重新检查这个最基础的直觉。

9 568 实际上又把问题推进了一层：什么才算“真正发生”？

这里就连接到了你网站 568。这一方向后来出现一个非常漂亮的细分：并不是实验流程中所有中间“事件”都一定具有同样的本体论地位。

假设朋友的内部记录经过一段时间之后，可以被超级观察者通过精确的逆向么正演化完全擦掉。那么朋友中途那个所谓“结果”，究竟是什么？如果整个过程 U 之后还能够被 U^{-1} 精确反转，那么从整个封闭系统的角度看，原来的测量过程甚至可以像从未发生过一样恢复。

这就产生一个非常尖锐的问题：

一个可以被物理上完全反转、不给未来留下不可逆因果痕迹的“事件”，是否应该和最终留下稳定记录的事件享有相同的绝对事实地位？

你网站 568 收录的 Causal Friendliness 讨论正是在这里区分 **Truly-Observed Events** 和 **Pseudo Events**，并进一步把“绝对事件”拆分为真正观察事件的绝对性以及伪事件的绝对性。

这件事情非常重要。因为到了这里，“维格纳朋友问题”已经不再仅仅是量子诠释问题，它开始逼问一个更加底层的问题：

事件是什么？

经典物理中，我们几乎从来不用定义“发生”。事件就是时空中的一个点，或者系统状态的变化。但量子理论开始迫使我们区分：发生了一次相互作用；形成了一次相关；产生了一个内部记录；记录被环境放大；信息变得不可逆；多个观察者都可以访问——这些层次究竟哪一步才叫“事实已经发生”？

于是，“事实”本身从物理学默认使用的元概念，变成了需要物理理论解释的对象。这是一个非常大的变化。

10 而你网站最新的 648，恰好开始正面回答“什么叫观察者”

这也正是我觉得你网站今天的 648《迈向一种广义的观察者理论》和 Proietti 实验最值得连接的地方。Proietti 在 2019 年采用了一个极简观察者定义：

$$\text{提取信息} + \text{物理存储}. \quad (16)$$

因此一枚辅助光子也可以扮演朋友。但这个定义马上引出一个问题：如果只要产生相关和存储信息就算观察者，那么电子是不是观察者？原子是不是？石头是不是？恒温器是不是？神经网络是不是？人又和这些东西区别在哪里？

648 提出的“最小观察者”明显比 Proietti 定义更丰富。论文把最小观察者写成：

$$O = (X, Y, Z, f, g, B), \quad (17)$$

其中 X 是内部状态， Y 是输入空间， Z 是行动空间， f 是状态更新， g 是输出函数，而 B 是观察者和环境之间的边界。换句话说，一个观察者至少具有这样的循环：

$$\text{环境} \rightarrow \text{感知} \rightarrow \text{内部状态更新} \rightarrow \text{行动} \rightarrow \text{环境}. \quad (18)$$

该文甚至把恒温器当作最简单的例子：感知温度、更新 ON/OFF 内部状态、控制加热器，从而形成反馈回路。

这个框架与 Proietti 之间存在一个非常有趣的张力。Proietti 只要求“记录”，648 要求的不仅有记录，还有**边界和反馈闭合**。按照 648 自己的标准，单独电子甚至不一定算观察者，因为普通物理相互作用并不自然具有传感器—内部状态—执行器这种闭合结构。

这意味着 Proietti 实验最大的哲学争议——“一枚光子究竟算不算朋友”——其实可以被重新表述为：

究竟应该采用多强的 observer 定义，Bell-Wigner 结论才具有我们想赋予它的哲学含义？

这也是未来观察者理论必须解决的问题。

11 更有意思的是：648 几乎直接给出了维格纳朋友的操作性解释

648 讨论关系量子力学时，几乎直接重构了一次 Wigner’s Friend。对于观察者 Alice 而言，只要外部信息穿过边界 B_A 进入她的内部状态 X_A ，并在那里形成记录，那么这个结果已经成为**相对于 Alice 的事实**。

但是维格纳具有另外一条边界 B_W 。在维格纳尚未与 Alice 实验室发生交互以前，信息并没有跨越 B_W 更新 X_W 。因此同一个事件可以表现为：

Fact relative to Alice,
但还不是 Fact relative to Wigner。

648 明确用维格纳朋友举例：Alice 测得电子自旋后，她的内部状态已经编码这个事实；但对尚

未与实验室交互的 Wigner 而言，结果仍不确定。直到 Wigner 跨越自己的边界读取 Alice 记录，这个结果才成为相对于他的确定事实。

这实际上给 Proietti 论文中“observer-dependent fact”提供了一种操作性语言。不是说“Alice 有她的宇宙，Wigner 有他的宇宙”，而是：

$$\text{事实} = \text{系统状态} + \text{观察者边界} + \text{交互历史} + \text{内部记录}. \quad (19)$$

这比一句“现实是相对的”精确得多。

12 这也解释了为什么关系量子力学和 QBism 会受到重视

Proietti 结果自然让 Rovelli 的关系量子力学显得很有吸引力。RQM 的基本思想并不是世界不存在，而是：**物理量的确定值不是系统孤立拥有的属性，而是在系统之间发生关系时定义的**。就像速度一样，一个物体没有脱离参考系的“绝对速度”。那么 RQM 进一步问：为什么量子状态一定必须具有一个脱离观察关系的“绝对状态”？

648 对此的表达非常直接：当输入穿越观察者边界并修改其内部记录以后，这件事情才成为相对于该观察者的事实；另一位尚未发生相互作用的观察者可以仍然描述整个复合系统为叠加态。

QBism 走得更远。它把量子态理解为 agent 关于未来经验的概率判断。这样当然更加彻底地消除了“宇宙拥有唯一客观波函数”的要求。

Proietti 论文也明确列出了这些可能解释：可以保留某种拥有全局波函数的特殊描述，也可以彻底放弃 observer-independence，转向关系量子力学或者 QBism。但实验本身并不能告诉我们 RQM、QBism 还是多世界谁最终正确。它做的事情更像 Bell 实验：**缩小可接受世界观的空间，而不是替我们选定唯一诠释**。

13 多世界其实没有简单地“输掉”，反而提供了另一种全局解法

这一点也值得结合你网站 639 来看。很多人看到“observer-dependent facts”以后会认为多世界一定失败了，其实并不是。

埃弗雷特的基本思想恰好就是：如果量子力学真正普遍适用，就不要在朋友测量时人为添加坍塌。整个态始终按照么正方式演化：

$$|\Psi\rangle = |H\rangle|F_H\rangle + |V\rangle|F_V\rangle. \quad (20)$$

从全局波函数角度，两个分支都存在。但每一个分支中的朋友都只有一个确定记录。因此“单个观察者经验到唯一事实”和“整体状态仍保持叠加”完全可以同时成立。

你网站 639 把“世界”理解成退相干产生的宏观真实模式：世界不是基础方程里额外增加的基本实体，而是全局波函数在宏观尺度上的稳定涌现结构。

从这个角度看，Proietti 实验并不是说“没有全局现实”，它更可能说：

如果存在全局现实，它不能等价于经典意义上
每一个局部观察结果同时拥有唯一确定值的事实表。

多世界保留的是 $|\Psi_{\text{universe}}\rangle$ 这样的全局对象，但牺牲的是“所有观察者必须共享同一单一经典历史”。所以多世界实际上把“客观性”从经典事实集合提升到了全局量子态及其分支结构。

14 再连接 Wolfram：客观性也许根本就是观察者之间的稳定不变量

现在可以把问题再推进一步，连接你网站 576。Wolfram 的 Ruliad 思想有一个很有意思的核心：底层可能存在一个极其庞大甚至包含所有计算可能性的结构，但任何真实观察者都只能访问其中极小的一部分。

我们不是“上帝”。我们计算能力有限、空间位置有限、时间有限、感知带宽有限，只能进行粗粒化。所以观察者看到的世界，本来就不应该等同于底层结构本身。

那么客观性从哪里来？Wolfram 提出的一个非常有意思的答案是：因为像人类这样的观察者彼此非常相似，并且在 Ruliad 中的位置也足够接近，所以我们粗粒化之后得到的世界高度一致。于是不同观察者能够对世界进行某种“triangulation”。

你网站 576 甚至直接讨论：是不是必须存在足够多相似的观察者的，才能“三角测量”出我们所谓的客观现实；并进一步提出，虽然观察者具体感知会不同，但对足够相似的一组观察者，某些宏观规律会稳定地、客观地涌现。

这和 Proietti 实验之间存在一种非常漂亮的概念互补。Proietti 告诉我们：**客观事实未必能够被理解成底层预先写好、完全独立于观察者的一张表**。Wolfram 则提供另一种可能性：**客观性可能是大量相似观察者之间共享的不变量**。也就是说：

$$\text{客观性} \neq \text{摆脱一切观察者后的东西}, \quad (21)$$

而可能更接近：

$$\text{客观性} = \text{跨越大量观察者仍保持稳定的结构}. \quad (22)$$

这是两种非常不同的“客观”。第一种叫“上帝视角客观性”，第二种可以叫“观察者间不变量”。现代物理越来越可能需要的是后者。

15 甚至连“信息量”都可能具有同样的观察者相对结构

你网站 563 关于 Epiplexity 的材料其实也能和这里连起来。其中有一个很有意思的观点：对于算力弱的观察者，一串加密数据看起来可能完全随机；对于拥有密钥和充足算力的观察者，它却是高度结构化的信息。因此：

$$\text{信息结构} \neq \text{数据本身的孤立属性}, \quad (23)$$

更准确地说：

$$\text{结构} = f(\text{数据}, \text{观察者计算能力}). \quad (24)$$

你网站 563 甚至明确指出，信息量的随机/结构划分会随着观察者计算约束变化，因此不存在一个简单的、脱离观察者能力的绝对单一信息度量。

把它和 Proietti 放在一起看会出现一个有趣的共同模式：

$$\text{量子理论：事实} = f(\text{系统, 测量关系}); \quad (25)$$

$$\text{计算理论：结构} = f(\text{数据, 观察者算力}); \quad (26)$$

$$\text{相对论：时间、长度} = f(\text{事件, 参考系}); \quad (27)$$

$$\text{Wolfram 式观点：经验世界} = f(\text{底层计算结构, 观察者粗粒化}). \quad (28)$$

这并不等于“一切都是主观的”。相反，它暗示一种越来越普遍的理论结构：**物理量并不总是属于单个对象；很多量属于“对象—观察者关系”**。

16 但我们必须保留三个重要限制

到了这里，不能把 Proietti 实验神化。

第一，实验仍然存在 Bell 型实验漏洞。作者自己明确承认，他们依赖 fair-sampling 假设，并没有完全关闭探测效率和时空分离等所有漏洞；完全无漏洞的 Bell-Wigner 实验要困难得多。

第二，真正的“朋友”只是光子记忆。所以实验真正直接证明的是一个由微观量子记录构成的 extended-Wigner-friend 结构。如果你坚持“观察者必须具备宏观不可逆记忆、反馈、自我模型甚至意识”，那么这项实验能否直接推广到真人观察者，就仍然需要额外论证。作者对此的回应是量子理论本身并不在方程中区分“大观察者”和“小观察者”；如果我们人为加入尺度界限，就需要说明新的物理机制是什么。

但批评者并不完全接受这一点。例如 Kastner 指出，单纯的么正相互作用本身并不足以保证产生真正的“结果”；如果内部光子只发生纠缠，没有形成真正的不可逆测量结果，那么把它称为朋友的“事实”可能已经预设了需要证明的东西。

第三，no-go theorem 永远是条件性的。它证明的是某些假设不能同时成立，它不会告诉你哪一个假设“必须”被抛弃。你可以选择放弃局域性；可以挑战自由选择；可以改变事实绝对性；可以接受关系事实；可以接受全局波函数；也可以修改量子动力学。所以实验是一个**排除器**，不是一个完整世界观生成器。

17 这篇论文最大的意义：它把“观察者”从哲学词汇变成了基础物理变量

如果把 2019 年论文孤立来看，它像是一个非常奇怪的六光子 Bell 实验。但如果把 2018 年的 FR、Brukner, 2019 年的 Proietti, 2020 年的 Local Friendliness, 再到后来 Causal Friendliness 以及现在的广义观察者理论放在一起，就会发现研究主题已经发生了变化。

20 世纪的量子测量问题主要问：波函数什么时候坍缩？现在的问题越来越像：

- 什么算观察？
- 什么算记录？

- 什么算事件？
- 什么算事实？
- 一个事实何时相对于某个系统成立？
- 不同观察者的事实在什么条件下可以合并？
- 哪些部分是观察者依赖的，哪些是不变量？
- 一个观察者最少需要具有什么结构？

这实际上是在重新建设“观察者的物理学”。你网站 648 在开头就明确说，各学科长期都在使用 observer 这个词，但量子物理、控制论、计算科学、认知科学使用的是不同定义，因此需要建立一个统一形式体系。它提出感知、内部状态更新、响应、反馈以及边界作为最小结构。

这正是 Proietti 之后必须解决的问题。2019 年的实验已经告诉我们：**一旦观察者被纳入量子理论，传统的全局事实观开始出现问题**。下一步自然就是：那我们究竟应该怎样定义观察者？从这个意义上讲，Proietti 实验甚至可以看成“广义观察者理论”的一个早期实验前奏。

18 最后的结论：不是“没有客观现实”，而是客观现实可能需要重新定义

所以我认为，这篇文章最值得保留下来的结论不是“量子力学证明了现实是主观的”。这句话既不准确，也低估了这个实验真正的哲学深度。

更好的概括是：

经典物理默认存在一张完全独立于观察者、同时包含所有事实的世界账本；扩展维格纳朋友实验表明，这种经典式事实结构与量子相关性、局域性和自由选择不能全部兼容。

因此我们不得不重新考虑“客观事实”的定义。客观性也许并不是“完全摆脱观察者”，它可能是：

在观察者之间保持可转换的一致结构； (29)

或者：

不同观察者描述之间的不变量； (30)

或者：

退相干后大量记录之间稳定冗余的共同部分； (31)

甚至按照 Wolfram 式语言：

计算受限的相似观察者共同粗粒化出的稳定现实。 (32)

这并没有摧毁科学。恰恰相反，它可能是在给“科学为什么能够获得客观知识”一个更深的解释。过去我们的答案很简单：因为世界本身有一份绝对事实。未来的答案可能更加微妙：

因为虽然每个观察者都嵌入世界内部、拥有有限信息和特定参考框架，但不同观察者之间仍存在高度稳定、可以互相翻译、可以反复验证的不变量。我们把这些不变量称为客观现实。

而这也让维格纳朋友从一个看似荒诞的思想实验，变成一个非常现代的问题。

传统物理学研究的是：世界如何演化？现代量子基础开始研究：世界中的观察者如何形成关于世界的事实？再往前走一步，问题甚至可能变成：哪些物理结构使“观察者”“事实”和“客观性”本身成为可能？

Proietti 的六光子实验没有给出这个终极答案，但它做了一件非常重要的事情：

它第一次让“不同观察者能否拥有一份共同的事实世界”
不再只是哲学家的语言游戏，
而成为实验物理能够真正触碰的问题。

如果把 591 的 FR 递归困境、568 的事件绝对性、576 的 Ruliad 观察者、639 的退相干涌现世界和 648 的最小观察者理论全部串起来，最终浮现的是一条非常清楚的主线：

21 世纪基础物理真正需要重新处理的，也许不仅是空间、时间、物质和信息，
还包括那个一直被默认站在方程之外的东西——观察者本身。

而最深的问题也许已经从“世界究竟是什么？”逐渐变成：

**当我们自己也是这个世界的一部分时，所谓“世界是什么”
这句话究竟意味着什么？**