

关于 Jay Lawrence、Marcin Markiewicz 和 Marek Żukowski 对 Aurélien Drezet 的关系量子力学辩护的评论的评论

Aurélien Drezet

Institut Néel, UPR 2940, CNRS-Université Joseph Fourier, 25, rue des Martyrs, 38000 Grenoble, France

(10Dated: 2025 年 4 月 9 日)

我们简要回应了 Jay Lawrence、Marcin Markiewicz 和 Marek Żukowski 最近的评论 [arXiv:2210.09025 和 Found. Phys.54, 45 (2024)] 关于我们的工作，该工作是为 RQM 辩护针对他们之前的评估。我们反驳了作者提出的分析，并重新阐述了我们之前的研究以澄清我们在回击中的剩余歧义。

I. 介绍

在最近发表的另一篇论文 [1] 中，作者 Jay Lawrence、Marcin Markiewicz 和 Marek Żukowski (以下简称 LMZ) 提出了一项技术论证，试图驳斥自 1996 年以来由 Carlo Rovelli 发展的量子力学关系解释 (RQM)。[2–5] 我们强调 RQM 之于标准的哥本哈根诠释就如同狭义相对论之于牛顿力学。¹ 然而，在发表于本期刊的一篇注记中 [6]，本文作者证明了所谓在 [1] 中描述的反驳实际上包含了一些重要的概念性错误，使得整个论证无效。正如量子力学中常见的那样，许多关于不可能性的所谓证明事实上揭示了偏见的存在，这些偏见限制并有时使此类证明失效（例如臭名昭著的冯·诺伊曼否定定理）。在 [1] 中发表的尝试对此事实进行了令人瞩目的展示，[6] 的反分析也驳斥了其偏见。LMZ 现在同一期刊中提出了一条评论 [7]，试图反驳在 [6] 中描述的观点，而这篇笔记的目的在于证明他们的新分析再次包含了对 RQM 和（更令人惊讶的是）标准哥本哈根解释中的情境性存在基本误解。

奇怪的是，[7] 并不专注于 [6] 所辩护的 RQM 针对在 [1] 中描述的攻击的数学论证（作者甚至讽刺地承认了 [6] 中的计算是正确的）。相反，LMZ 声称发现了在 [6] 中呈现的对 RQM 理解中的假设性缺陷；如果属实的话，这无疑会否定，即使不是在 [6] 中为此理论所

做的辩护，至少也会对其可信度造成质疑。这显然是一个诋毁和回避的修辞，遗憾的是，这不允许他们回应注释 [6] 中包含的致命反对意见，实际上这些反对意见仍然使他们对 RQM 的批评无效，该批评发表在 [1] 中。

[7] 的主张基本上涉及关于约化密度矩阵在 RQM 中的作用的一个问题（² [7]）。

更准确地说，LMZ 声称当前作者高估了密度矩阵在 RQM 数学形式化中的作用。对他们而言，密度矩阵并不比波函数更好。然而，[7] 的作者犯了一个基本的混淆：对于由两个子部分 A 和 B 组成的量子系统来说，对 RQM 起重要作用的并不是整体系统的总密度矩阵 $\hat{\rho}_{AB}$ 。正如在 [6] 和 [8] 中详细解释的那样，并且与 Rovelli 的文字 [2–5] 一致，必须是通过分别绘制观察者 B 或 A 的自由度而获得的约化矩阵 $\hat{\rho}_{A|B}$ 和 $\hat{\rho}_{B|A}$ 在 RQM 中发挥核心作用。只有这些约化矩阵才能反映一个子系统相对于另一个子系统的关联信息性质。

LMZ 显然没有阅读过我们的文章 [8]，该文章专注于 RQM 中密度矩阵的作用，并针对在 [9] 中对 Wigner 的朋友和 RQM 中的优选基所作的批评作出了回应。不幸的是，[9] 中出现的许多错误现在正在 [1, 7] 中被重复。我们强烈建议读者和 LMZ 阅读 [8]，在该文章中简要概述了 RQM 中密度矩阵读取的数学表述。

在此背景下，我们强调在 $\hat{\rho}_{B|A}$ 中追踪“观察者”A 的自由度意味着系统 A 在 RQM 中不可能进行自测量。³ 这些约化矩阵是 RQM 中用于记录不同子系统可

¹ 需要注意的是，RQM 使用海森堡类型的观测系统与观察者系统的分离方式，比涉及意识代理概念（其确切性质非常模糊）的 Qbist 方法或假设测量过程中存在某种“不可逆”的热力学放大的玻尔方法要明确得多（即假设波函数坍缩的模糊概念）。从这个意义上说，RQM 似乎是海森堡原始思想最精确和最不模糊的表述。我们还强调，RQM 的动机源自 Rovelli 在环量子引力方面的研究，在这种情况下哥本哈根诠释是没有意义的。

² 请注意，[7] 将他们的论点分为几个编号为 1 到 6 的要点。我们不会在这里按照繁琐的一一进行回应，实际上这并不会对主题有任何启发。

³ 自测量问题 [10] 在 RQM 的背景下在 [11] 中进行了讨论。我们的工作 [8] 基于密度矩阵形式主义，部分动机在于希望在 RQM 框架内解决这个问题。

用信息的工具。换句话说（并且与海森堡提出的解释非常接近），这些矩阵编制了每个子系统相对于其他子系统的潜在可能性的详尽目录。在更技术性的层面上，部分密度矩阵独立于所选基底，从而解决了针对 RQM 中首选基底概念的一些虚假异议（参见 [9] 中的批评以及我们在 [8] 中的回答）。罗维利一直承认量子退相干在 RQM 中发挥的核心作用（即与定义近似稳定的事实 [2-5] 相关联），而部分密度矩阵特别适合这种分析。请注意，这一点也使我们能够理解和解决 LMZ 在 [7] 中提到的所谓的 Wigner 悖论，这也是我们在 [8] 中为回应 [9] 而分析的重点，并且完全符合 RQM。

超出这些争议点，重要的是要回忆 LMZ 作者在他们的论文 [1] 中的中心错误，并在 [7] 中重复了这一错误（特别是在他们第 4-6 点）。事实上，在 [1] 中，他们从一个特定的量子系统 S（一个形成 GHZ 状态的纠缠自旋三重态 [12]）开始，并通过涉及两个观察者 A 和 B（各自也涉及三个量子比特），试图获得量子力学和 RQM 解释之间的 Wigner-friend 矛盾形式（之前的尝试 [9] 已经失败 [8]）。我们在 [6] 中所证明的核心观点是，LMZ 实际上提出了涉及三个子系统 S、A、B 的四种不同实验。通过比较这四种不同的实验情境，他们作出了违背量子力学精神的反事实论据（即遵循 Bell 和 Kochen-Specker 定理）。这种强烈的量子力学情景依赖性一直被像玻尔或海森堡这样的哥本哈根解释之父所强调。此外，情景依赖性也是 RQM 的核心信条之一。因此，LMZ 获得与 RQM 矛盾的结果并不令人惊讶。

尽管我们不希望在此重复在 [1] 中推导出的内容以及在 [6] 中提出的反驳，但简要总结问题的核心仍然是有用的，以便澄清所谓的悖论。更准确地说，在 [6] 中，LMZ 推导出四个不同的上下文关系：

$$p_{SAB_1}^{(2)} q_{SAB_2}^{(2)} r_{SAB_3}^{(2)} = +1 \quad (1)$$

$$p_{SAB_1}^{(2)} q_{SA_2}^{(3)} r_{SA_3}^{(3)} = -1 \quad (2)$$

$$p_{SA_1}^{(3)} q_{SAB_2}^{(2)} r_{SA_3}^{(3)} = -1 \quad (3)$$

$$p_{SA_1}^{(3)} q_{SA_2}^{(3)} r_{SAB_3}^{(2)} = -1. \quad (4)$$

这里 $p_{SAB_1}^{(2)} = \pm 1$ 是与涉及 S、A 和 B 的第一个量子位（接下来写为 S_1 、 A_1 和 B_1 ）的一些特定测量相关的本征值。同样， $q_{SAB_2}^{(2)} = \pm 1$ 和 $k_{SAB_3}^{(2)} = \pm 1$ 分别涉及 S、A、B 的第二个和第三个量子比特（即 S_2, A_2, B_2 和 S_3, A_3, B_3 ）。此外，特征值 $p_{SA_1}^{(3)} = \pm 1, q_{SA_2}^{(3)} =$

$\pm 1, r_{SA_3}^{(3)} = \pm 1$ 与 A 对 S 的第一个、第二个和第三个量子位进行的不同测量相关联，并假设 B 不与 S 和 A 相互作用。⁴

第一个关系 1，与第一个实验情境相关联，假设有三项涉及 S、A 和 B 的测量，而其他三个关系 2,3 和 4 中每一个都包含一项涉及 S、A 和 B 的测量以及两项仅涉及 S 和 A 的测量。将 $p_{SA_1}^{(3)} = \pm 1, q_{SA_2}^{(3)} = \pm 1, r_{SA_3}^{(3)} = \pm 1$ 视为系统 A 非情境化地看到的测量结果（即对于 A 而言是非情境性的相对事实）是诱人的。因此，关系式 Eqs. 2-4 将涉及 A 的相对事实和 B 的相对事实的混合。但这将导致悖论，因为乘以 Eqs. 2-4 明显与 Eq. 1 矛盾。LMZ 结论认为 B 不能以自洽的方式定义 A 的相对事实。但这至少有两个原因导致误解：

i) 方程 1-4 涉及四种不同的实验情境，在量子力学中我们通常没有权利考虑从不同情境混合数据的反事实推理。这是核心问题，因为该问题涉及一个强纠缠的 GHZ 态。这个问题是众所周知的 [12]，如果我们以非情境的方式思考它，则会导致矛盾。

ii) 对于 B 而言， $p_{SA_1}^{(3)} = \pm 1, q_{SA_2}^{(3)} = \pm 1, r_{SA_3}^{(3)} = \pm 1$ 并不是 A 所看到的值，而是根据 B 的描述与 A 相关联的 S 的值。例如，通过方程 2，我们可以将约化密度矩阵 $\hat{\rho}_{SA_1B}^{(\Psi_{GHZ'})}$ 与 RQM 中的方程 25（见 [6]）联系起来。由此我们推断出四个可能的选项在满足约束条件

$$p_{SA_1|B}^{(2)} q_{SA_2|B}^{(3)} r_{SA_3|B}^{(3)} = -1. \quad (5)$$

下被分配的概率

$$\mathcal{P}_{SA_1B}^{(\Psi_{GHZ'})}(p_{SA_1|B}^{(2)}, q_{SA_2|B}^{(3)}, r_{SA_3|B}^{(3)}) = \frac{1}{4} \quad (6)$$

。增加的标签 $\Psi_{GHZ'}$ 提醒我们这个关系是通过使用特定量子态 $|\Psi_{GHZ'}\rangle_{SAB}$ （方程 20 of [6]）与特定物理环境相关联而获得的。这里， $p_{SA_1|B}^{(2)}$ 是对 B 关于一个子系统（即 S 的第一个量子比特和 A 的第一个量子比特）的测量结果，但其他子系统实际上并没有被测量，也就是说，值 $q_{SA_2|B}^{(3)}, r_{SA_3|B}^{(3)}$ 对于 B 来说并未实现。相

⁴ 参与这些实验的量子态 [1, 6] 由 $|k^{(2)}\rangle_{SAB_m} := |k^{(2)}\rangle_{SA_m} |k^{(2)}\rangle_{B_m}$ 与 $|k^{(2)}\rangle_{SA_m} = \frac{1}{\sqrt{2}}[|+1^{(3)}\rangle_{SA_m} + ik^{(2)}|-1^{(3)}\rangle_{SA_m}] \equiv |\text{sign}(k^{(2)})x\rangle_{SA_m}$ 和 $|k^{(3)}\rangle_{SA_m} := |k^{(3)}\rangle_{S_m} |k^{(3)}\rangle_{A_m}$ 定义。这里 $m = 1, 2, 3$ 标记了定义希尔伯特空间 \mathcal{H}_{SAB_m} 的子系统族 $[S_m, A_m, B_m]$ 的 3 个族，并且完整的量子态属于这些希尔伯特空间的张量积。

反，这些值 $q_{SA_2|B}^{(3)}$, $r_{SA_3|B}^{(3)}$ 代表了 B 的可能性或潜在性，这与海森堡的观点一致。⁵

此外，与点 i 相关的是，这种可能性的目录是依赖于上下文的，并且对于系统 B 来说，比较不同约简密度矩阵相关的方程 1-4 是没有意义的。在 [6] 中我们强调了点 i) 和 ii) 的作用，它们并非完全独立。点 ii) 是 RQM 特有的，并且其某些方面可以被讨论 [8, 13]，但是点 i) 实际上足以排除 [1] 的反对意见。

确实，这里中心问题是考虑实际的物理环境，并且不将不同的现实混为一谈以避免逻辑矛盾。反过来这也证明了远非对 RQM 的反驳，[1] 的结果（即通过

⁵ 我们强调，如果我们对 A 的角度感兴趣，我们就必须考虑约化密度矩阵

[6] 中的良好棱镜重新分析) 实际上构成了该理论基本情境性的确认。换句话说，总结一下，LMZ 假设了一个全局非情境性，这正是 RQM 也包括标准量子力学建议要摒弃的。因此，在 [1] 和 [7] 中所做的错误分析实际上是误解了 RQM 及其目标，并且也误解了哥本哈根诠释。总之：许多作者经常批评他们知之甚少的理论，仅根据自己的偏见进行浅薄的重新解释。这绝不会导致令人信服的论点，只会给已经复杂的情况增加混乱。正如我们在 [6] 和 [8] 中已强调的：我们最好关注好的问题。

$$\hat{\rho}_{SB|A}^{(\Psi_{GHZ'})} \text{ 而不是 } \hat{\rho}_{SA|B}^{(\Psi_{GHZ'})}。$$

-
- [1] Lawrence, Jay, Markiewicz, Marcin, and Żukowski, Marek (2022), Relative facts do not exist. Relational Quantum Mechanics is incompatible with Quantum Mechanics, *Quantum* **7**, 1015.
- [2] Rovelli, Carlo (1996), Relational quantum mechanics, *Int. J. Phys.* **35**, 1637.
- [3] Rovelli, Carlo (2021), Helgoland: Making sense of the quantum revolution, Riverhead Books, New York.
- [4] Di Biagio, Andrea, Rovelli, Carlo (2021), Stable Facts, Relative Facts, *Found. Phys.* **51**, 30.
- [5] Rovelli, Carlo (2022), The relational interpretation, in Oxford handbook of the history of interpretation of quantum physics, edited by Olival Freire Jr et al. (Oxford University Press) pp. 1055 – 1072.
- [6] Drezet, Aurélien (2024), A critical analysis of 'relative facts do not exist: relational quantum mechanics is incompatible with quantum mechanics', *Found. Phys.* **54**, 5. The version [v3] in arXiv:2209.01237 corrects some typos.
- [7] Lawrence, Jay, Markiewicz, Marcin, and Żukowski, Marek (2024), Comment on Aurélien Drezet's defense of relational quantum mechanics, *Found. Phys.* **54**, 45. The previous version in arXiv: 2210.09025 discussed density matrices and RQM.
- [8] Drezet, Aurélien (2023), Can a Bohmian be a Rovellian for all practical purposes?, *Found. Phys.* **51**, 97.
- [9] Brukner, Časlav (2021), Qubits are not observers—a no-go theorem, arxiv.org/abs/2107.03513v1.
- [10] Breuer, Thomas (1995), The impossibility of accurate state self-measurements. *Philosophy of science*, **62**, 197-214.
- [11] Smerlak, Mateo (2017), The relational interpretation of quantum mechanics and the EPR paradox. In: d'Espagnat, B., Zwirn, H. (eds), pp.195–223. *The quantum world; The frontiers collection*. Springer, Cham.
- [12] Greenberger, Daniel, Horne, A. Michael, and Zeilinger, Anton (1989), "Going Beyond Bell's Theorem," in *Bell's Theorem, Quantum Theory and Conceptions of the Universe*, edited by Menas Kafatos (Springer Netherlands, Dordrecht) pp. 69 – 72.
- [13] Adlam, Emily, Rovelli, Carlo (2023), Information is physical: Cross perspective links in relational quantum mechanics, *Philosophy of Physics* **1**, 4, 1-9.