arXiv:2305.02429v2 [quant-ph] 7 Nov 2023

潜能实在论：一种基于倾向性的现实主义与非决定论物理学

Flavio Del Santo 和 Nicolas Gisin日内瓦大学应用物理学组，瑞士日内瓦 1211，4；以及 Constructor University，瑞士日内瓦（日期：2023 年 11 月 8 日）

我们提出一种名为潜能实在论的物理学诠释。这一观点既适用于经典物理学，也适用于量子物理学；它将潜能（即个别事件发生的内在、客观倾向性）视为实在的组成部分，从而补充物理变量所具有的实际属性。因此，这一观点能够在任何理论框架中自然地调和实在论与基本非决定论。我们讨论了对倾向性的具体诠释：在形式层面上，倾向性必须不同于概率，但同时允许统计学和大数定律。这一观点有助于调和经典物理学与量子物理学，因为它表明，人们通常认为量子物理学独有的大多数概念问题——例如测量问题——实际上是所有非决定论物理理论共同面临的问题。

I. 引言

数百年来，物理学的形式化促成了一种叙事：宇宙据称依照决定论定律演化，也就是说，每个事件都必然发生。在经典物理学（牛顿力学、电磁学、相对论）中，这几乎被视为不言自明的真理；即便量子力学问世之后，许多人仍将该理论的概率性预测视为纯粹的认识论概念，认为在基本层面，一切都由决定论的薛定谔方程支配。也许正是由于大多数物理学家对决定论抱有如此强烈的信念，非决定论似乎被视为一种有待消除的缺陷，而这导致了一系列根深蒂固的误解，往往将非决定论与缺乏因果性、实在论，甚至缺乏定律性混为一谈。

我们主张，科学的一项基本特征是解释自然现象，也就是说，能够讲述自然如何运作的故事。而这要求引入在因果上相互作用的形而上学要素，这为某种形式的实在论提供了强有力的动机（见第 V 节）。此外，我们是量子物理学家，我们的立场深受量子理论带来的非决定论世界观影响；这种观点植根于海森堡关系、贝尔不等式被违反等基本结果。[1] 我们也已超越量子理论，认识到即便在经典层面相信决定论也是一种过于强烈的假设，因为它既不受观测支持，又要求假定时空每一点都具有无限信息。事实上，在近期的一系列研究中，我们提出了对（经典和相对论）物理学的替代性解释，这些解释在根本上是非决定论的 [1–6]。

因此，本文的目标是对某种观点作出较为详尽的阐述。非决定论世界的实在论描述究竟意味着什么。我们将说明，只要假定物理系统在基础层面上的特征不仅包括其当前已拥有的属性，还包括其内在（可量化）潜能，便能以一种自然的方式同时维持实在论与非决定论。[2] 我们的观点与传统实在论立场截然不同。传统立场认为，对象存在，并由其内在的现实属性（在任一给定时间）来识别。相反，我们认为物理对象确实存在，且仍由其内在属性所表征；然而，这些属性通常仅具有潜在性（在任一给定时间），也就是说，它们是内在的实现倾向。因此，我们的观点可称为潜能实在论。[3]

II. 非决定性世界中的倾向性

非决定论世界的一个主要特征是能够产生非必然事件，即此前并不存在的新信息得以产生的情形。这种新信息可能纯粹是随机的，不含任何结构 [8]。然而，未充分决定的事件通常可能具有明确的潜能，其强弱各不相同，能够使所有可能事件中的某一个实现（事件的例子包括测量结果，如自旋为 1/2 的量子粒子的自旋向上或自旋向下、骰子的不同面、随机数生成器生成的 0 或 1，或系统位于空间的某个区域或其补集中的位置，等等）。[4] 随着时间推移，某些事件（例如由测量或自发过程引发的事件）会促成某个潜在结果的实现

[1] 事实上，实验上违反贝尔不等式可以保证，在假设无信号（参数独立性）的前提下，只要测量设置具有任意微小程度的独立性，测量结果就是真正随机的 [7]（相关讨论另见参考文献 [1]）。

[2] 请注意，我们将非决定论视为一个充分条件：也就是说，至少存在一些从根本上无法确定地预先决定、科学家可以据以累积统计数据的事件。[3] 这种观点类似于某些以潜能来解释量子态的诠释，令人联想到亚里士多德的潜能；W. Heisenberg 和 A. N. Whitehead 都曾对此有所暗示（例如，参考文献 [9]中讨论了 Heisenberg 和 Whitehead 关于潜能的观点）。近年来，N. Maxwell [10]、M. Dorato [11], 和 M. Suarez [12, 13] 也主张量子力学具有不可还原的倾向本体论。[4] 不过请注意，事件不一定是测量的结果。有些事件可能发生在微观层面，人类无法直接感知。

，从而创造出此前并不存在的新信息。[5] 因此，这种描述要求个别事件具有客观、由因果决定、却不受必然性支配的内在倾向，即倾向性。[6] 我们认为，对于描述一个因果非决定论世界而言，倾向性是不可或缺的；正如描述一个决定论世界时，实际已拥有的属性不可或缺一样。请注意，系统的物理属性通常具有根本（即本体论上的）不确定性 [20], ，而某些事件会降低这种不确定性（例如测量）。这种根本不确定性继而会影响系统随时间的未来演化，带来可能的不同未来情景，即非决定论。因此，非决定论是内在不确定性的结果（即使动力学方程可能是确定性的）。内在不确定性则由倾向性量化。

在大量关于倾向性的文献中，人们提出了若干种观点，用以理解这些客观的内在倾向。下文将阐述我们对倾向性的解释，并论证这一解释最适合描述物理学中的非决定论，同时维持实在论与因果性。

首先，我们的观点不同于若干作者所倡导的一大类倾向性理论，例如 I. Hacking [21] 或 D. Gillies [18], 主张倾向性是“长期的”，也就是说，它们是长序列（可能是无限序列）的倾向性属性。然而，如果情况果真如此，就意味着某种“时间非定域性”，因为若倾向性是实在要素，它就必须作为一个单一实体存在，并影响跨越一段时间发生的事件序列，而这段时间可能长达宇宙的整个年龄，甚至延伸至其未来（可能无限延伸）。因此，我们拒绝这种由时间非定域的无限次运行序列决定个别事件行为的观点；相反，长期观测频率是个别事件倾向性的表现。长期序列不过是个别事件的累积，反过来却不能成立。事实上，倾向性应当刻画事件的客观倾向；原则上，这些事件可能只发生一次，并且无法重复（不过，在这种情况下，它们甚至无法被近似测量）。请注意，对于单一观测结果，唯一能够从中推断出的相关倾向性信息，就是该倾向性不为零。

相反，我们将倾向性定义为物体的一种内在属性——在物理理论中，这些物体称为系统 ——使其能够实现某种特定的（理想化）测量结果；换言之，在受到特定情境影响时，实现某种特定结果的量化倾向。特定情境是因果相关条件的完整集合。因此，我们对倾向性的诠释是“单案例”的，代表了一种旨在量化客观可能性程度的非决定论因果关系（这使倾向性几乎成为一种概率诠释，但在概念和形式上作了恰当区分；参见第III节）。在这一观点下，我们的看法与 J. H. Fetzer [22] 以及 L. Ballentine [23], 早期的观点相似；后者认为，“倾向性指的是一种弱于决定论的因果性程度。” [23]因此，倾向性应被视为“非决定论规律”或“潜在力”：它们真实地存在于世界之中，以一种比必然性更宽松的方式在因果上连接事件（在决定论世界中则会是必然的）。

更形式化地说，倾向性由一个数学实体（该实体本身称为倾向性）描述——给定两个具有因果关系的事件（例如，测量的假想结果及其相关制备）——它量化在给定其因果相关条件的情况下，结果发生的倾向强度。从这个意义上说，即使世界在基础层面上具有不确定性，事件之间仍由因果性联系起来。非决定论并非凭空出现，也不是无因的，而是基础不确定性的结果。[7]

在第III节中，我们将看到，若要保留对倾向性的这种因果解释，就必须对其形式体系作些调整，使之不再完全遵循数学概率。不过，尽管倾向性在形式层面上未必是概率，它们仍具有概率的大部分数学结构，因此仍可采用如下记法：$p(a|\text{因果条件})$。这表示，在相关因果条件（这些条件可能影响该结果的实现，例如理想化测量的设置）下，事件a 发生的内在倾向（例如，对系统进行可能的测量所得到的结果）。[8] 然而，a 在数学意义上是一个事件，即概率空间中的一个元素，而因果条件则不一定如此。这在量子力学中显而易见：要计算测量结果a （即可观测量A对应的本征值，以及本征态 $|a\rangle$）时，因果条件由量子态 ψ 表示——它是希尔伯特空间中的一条射线，而非概率空间中的一个元素——以及对

[5] 这可能需要一种不同于物理方程中出现的参数时间，或相对论中的几何时间的时间概念。关于相对论与非决定论之间的相容性，参见参考文献 [4] ；关于参数时间和创造性时间这两种不同的时间，参见参考文献 [14] 。参考文献 [15] 也对“历史时间”与“参数时间”作了类似区分。这些事件降低了物理系统的不确定性。[6] 倾向性最初由 K. R. Popper [16] 提出，作为对概率演算的一种解释，随后许多作者又将其发展为各种不同的变体。关于倾向性理论的综合评述，参见 [17, 18] 及其中所引文献。S. Shoemaker 也认同内在性质具有因果价值这一观点，他断言：“一种性质的同一性，完全取决于它对拥有该性质之事物的因果能力所具有的贡献潜力。” [19]。

[7] 请注意，长期以来，哲学文献大多排斥存在根本不确定性（即本体论层面上的不确定性）的可能性。然而，近年来，诸如 [24, 25] 之类的研究将这一可能性形式化，从而为接受根本不确定性注入了新的动力。

[8] 我们的观点似乎类似于因果关系分析中对条件概率的解释，J. Butterfield 将其称为“后件为概率命题的条件句” [26], ，D. Mellor 和 D. Lewis 也赞同这种解释。

测量 A 的选择；随后根据玻恩规则计算概率：$p(a|\psi, A) = |\langle a|\psi\rangle|^2$。量子力学中出现的这些“概率”实际上有时被称为“广义概率”（参见例如 [27], 第 8.1 章），因为由于正则共轭变量的不相容性，它们并非定义在标准的事件集合上（如柯尔莫哥洛夫公理化所要求的那样）；这是因为“量子事件”集合的代数结构是非布尔的。因此，“为量子事件赋予概率的函数，矛盾的是，根本不是概率函数，至少不是柯尔莫哥洛夫意义上的概率函数。” [27]。下一节将详细讨论倾向性与概率之间的区别，以及它们与量子“广义概率”的相似之处。

此外，与（至少是经典）物理学的标准观点相反，结果并非显现实际存在于先前的属性。按照这种标准观点，经典态（以及从实在论角度诠释的量子态）是由实际值构成的集合（在数学上与实数的 n 元组相关联），这些值被认为在任何时间点都明确地存在，无论该时间点距现在有多远，无论是在过去还是未来。另一方面，在我们看来，结果是动态实现的——也就是说，它们从一系列彼此排斥的潜在结果中产生，从而创造新的信息。显然，明确确定的结果确实存在（每次测量都会产生且只产生一个结果），但这只是相关倾向性的值为 1 时的特殊情况，也就是说，不存在其他可能，且结果具有确定性（见第III节）。因此，在对应于某一个（且仅一个）结果从所有可能结果中实现的事件发生之前的任何时刻，实在要素——即状态——都是与每一种可能且通常仍未确定的结果相对应的倾向性集合。因此，正如前文所述，我们提出的是一种可称为潜能实在论的实在论形式，以区别于标准的现实实在论。此时，实在要素被视为一个潜能集合，其中每一种潜能都由一种客观存在的倾向性来量化。[9] 我们要强调的是，系统拥有倾向性的方式与拥有实际属性的方式相同。

我们对倾向性的状态定义需要作出一些澄清。J. Butterfield 将物理态定义为“系统内禀（或‘所拥有’）属性的最大（或‘完备’）集合” [29]。我们的状态定义与此相符。完备意味着，一个状态概括了当前关于系统每个相关自由度所存在的最大量信息。但这里的最大信息涉及潜在属性，即所有倾向性的集合。需要注意的是，以倾向性的方式进行思考并不会增加理论的“本体论成本”（另见第 V 节）：倾向性确实无法被直接认知上可及，但在标准物理学观点中，所假定的物理属性的实际值同样无法被直接认知上可及。在这两种情况下，知识都是通过相同的操作程序，即重复测量并收集据称用于近似表征潜在实在要素的统计量，无论它是一种实际性质还是一种潜在性质。

现在让我们转向物理态的第二个要求，即它应当是一组内在属性。在此语境中，内在意味着倾向是系统本身的性质，而不是实验安排 [16], 或机遇设置 [21]的特征。D. H. Mellor 指出，将倾向性归属于机遇设置，“就完全消除了将某种倾向视为一种无论是否表现出来都始终存在的事物而对其加以归属的意义。这等于将倾向性与展现这种倾向性的概率分布混为一谈” [30]。事实上，内在倾向（即系统所具有的倾向性）只能通过理想测量近似地揭示，这与系统所具有的性质（例如某个物理量的数值，如原子的能量）并无二致。理想测量是不含噪声且能够立即重复进行的测量。在经典物理学的标准观点中，理想测量的特征是每次都得出相同的结果，不存在任何方差（因为它们只是揭示某种实际性质的大小）。现在，让我们假设，对于系统上的某个特定测量结果，总是能够找到一种使其倾向性取值为 1 的状态（即确定性地得出该结果），并且对倾向性进行的理想测量独立于倾向性本身的数值。那么，就可以利用与确定性结果（倾向性为 1）相对应的状态，来表征其他任意状态下的理想测量。

还需注意，所有倾向性的集合——即在这种“潜能性”诠释中的一个状态——可能具有自身定义良好的数学结构，因此或许可以用一种紧凑的数学形式概括这一倾向性集合。

最后，应当记得，贝尔不等式的违背——如今已是得到充分实证支持的事实——迫使我们否定（空间中的）局域性。这显然也会影响倾向性：它们一般必须是非局域的实在要素，也就是说，在形式层面上无法分离。因此，尽管我们否定倾向性在时间上具有任意延展的观点（即它们在时间上具有局域性），贝尔不等式的违背——在坚持单一结果和自由选择的同时——却迫使我们认为倾向性在空间上是非局域的。诚然，这与相对论世界观存在张力，尽管我们此前已在参考文献 [4] 中暗示过如何使这些观点彼此相容。具体而言，单一的客观倾向量化了远距离非确定性结果之间关联可能实现的偏向（更详细的讨论见参考文献 [4],，其中也涉及狭义相对论）。

III. 倾向性与概率：Humphreys悖论

在上一节中，我们将倾向性定义为内在的、客观的倾向；在给定系统的因果相关条件时，这些倾向性以因果且非决定论的方式量化系统实现某一事件的可能性。乍看之下，这似乎恰好就是条件概率所描述的内容，

[9] 参考文献[28]中此前详细阐述过一种类似的立场。 .

前提是将不确定性理解为根本不确定性的表现，而非认识论上的不确定性。然而，一个被称为“Humphreys悖论”的结果 [31] 对直接将倾向性解释为客观概率施加了严重限制。Ballentine正确地指出：“Humphreys的结果是一条定理，而非悖论，因为它是一个从其假设中有效推导出的结果。” [23]事实上，我们认为，这可以表述为一条不可能性定理：以下假设的合取无法成立（即会导致矛盾）：

(i)倾向性量化了非确定性的因果联系。

(ii)倾向性是概率，即它们是通过柯尔莫哥洛夫公理的全部公理（尤其是推导出贝叶斯法则的那些公理）来定义的。

为了说明这一点，假设倾向性确实就是概率——假设（ii）。考虑两个具有因果关系的事件，即其中一个事件——原因 C——发生时，会影响另一个事件——结果 E——发生的倾向。根据假设（i），这意味着存在一个倾向性 P(E|C)，用于量化在 C 已经发生的条件下 E 发生的倾向。我们要求这种倾向性以非平凡的方式将该事件与原因联系起来，即 $P(E|C) \neq P(E)$。与此同时，由于我们已经假设倾向性包含了因果联系的概念，因此结果 E 是否发生（或者说，互补事件 $\bar{E}$ 发生），都不可能对原因产生影响，即 $P(C|E) = P(C|\bar{E}) = P(C)$。[10] 值得注意的是，这也是物理理论操作性表述中的标准因果性定义——亦称为来自未来的无信号——例如“广义概率理论”（GPTs [33]）中也是如此。在这些理论中，测量的选择不可能影响态制备（参见参考文献 [34]）。根据假设（ii），贝叶斯法则应当成立。这意味着，可以用其逆向条件概率来表示条件概率（贝叶斯法则）：

$$P(E|C) = P(C|E)\frac{P(E)}{P(C)}. \tag{1}$$

然而，将上述因果性约束代入后，得到 $P(E|C) = P(E)$，这与原因的非平凡性假设直接矛盾。

放弃假设（i）将意味着接受这样的观点：倾向性不是单案例倾向，而是长期倾向（正如 Hacking [21] 和 Gillies [18]所主张的那样）；但我们已经在上一节中论证了反对这一立场的理由。另一方面，如果要坚持假设（i），倾向性就必须通过偏离形式概率来摆脱 Humphreys定理。Fetzer 和 Nute [22, 35],、本文作者之一（NG） [36, 37], 以及 Ballentine [23]都提出了倾向性演算的公理化方案——这些方案不能还原为概率论的柯尔莫哥洛夫公理（或与之等价的公理）。

请注意，如果倾向性要与统计观测相容，其公理化就不能完全任意，因此也不能与概率任意不同，因为反过来说，后者同样是作为观测频率的极限情形构建的。这就是为什么 Gillies 提议“将概率因果演算 [即公理化的倾向性演算] 称为非柯尔莫哥洛夫概率论，类比于非欧几里得几何。”[18]。事实上，正如非欧几里得几何仅通过否定欧几里得第五公设，便保留了标准几何的大部分结构一样，倾向性演算（非柯尔莫哥洛夫概率）舍弃了导致贝叶斯法则推导的柯尔莫哥洛夫公理。在这一点上，正如参考文献 [23], 中已经指出的，倾向性（概率也如此）应满足的一项要求是遵循伯努利大数定律：

$$P(|f_n - p| \geq \varepsilon) \to 0, \tag{2}$$

对于每个 $\varepsilon > 0$，以及 n 趋于 $\to \infty$ 的极限情形。换言之，P 是一种概率，用来量化所考虑结果的相对频率 f_n 与该事件的倾向性 p 之间的相关性；随着试验次数 n 增加，这种相关性会增强。[11] 这一结果可由标准概率论推导得出，但其中的 p 也被视为概率，而非倾向性。因此，伯努利大数定律至少是概率与倾向性共有的一个必要要素，因为二者都应当是长序列测量中相对频率的极限。然而，在概念层面上，二者的差异极为显著：概率仅仅概括相关性（而相关性并不意味着因果关系），倾向性则会导致相对频率；反过来，相对频率是倾向性的可观测表现，因此也是在认识论上对倾向性进行操作性探知的途径（可达到任意精度）。这就是贝叶斯法则适用于概率、却不适用于倾向性的原因。

倾向性还有一项期望——这也是它与概率的共同点——即其取值应介于 0 和 1 之间，因为它们分别需要体现不可能性和必然性。不过，同样由于倾向性具有因果性质，取值为 0 或 1 的倾向性，不只是指在测度论意义上，所考察事件分别必然不发生或必然发生（概率论中的情况便是如此：概率为 0 的事件并非在逻辑上不可能，只是其发生构成一个零测集）。相反，取值为 1 的倾向性意味着必然的因果联系，即条件与事件发生之间存在确定性因果关系。另一方面，取值介于 0 和 1 之间的倾向性，应被解

[10] 因果性与时间是两个密切相关的概念，因为原因发生在其结果之前。因果性是否具有基础性，而时间概念是否由此衍生，正如 H. Reichenbach [32], 所提出的那样；抑或时间才是基础性的，正如 J. Lequyer 所主张的那样（见参考文献 [14]），这并不会决定本文的论证，也不会在下文中进一步讨论。

[11] 请注意，伯努利定律依赖于某种事件独立性的概念（另见 Ballentine [23]）。

读为一种非确定性的“潜在力量”。取值为 1/k 的倾向性，代表一个真正无偏的随机事件；该事件涉及系统的一种性质，而该系统可以呈现 k 种相互排斥的结果。

然而，由于测量总是导向一个唯一的观测结果，这就必然引出了这样一个问题：潜能如何变为现实，即在测量时（但不一定仅发生在测量时），究竟是什么“机制”使倾向性从 0 和 1 之间的某个中间值演化为 0 或 1。这与臭名昭著的“量子测量问题”完全类似（在参考文献[1]和 [5] 中，我们讨论过这一问题，并将其称为“经典测量问题”），而后者是所有从根本上具有非确定性的理论的一般特征。在形式层面上，在量子力学中，测量问题可以表述为量子态的线性、幺正、确定性演化（薛定谔方程）与测量时观测到单一结果之间的不相容性；在测量过程中，量子态“坍缩”到与该测量相对应的算符的某一本征态上。需要注意的是，在对经典物理学作非确定性诠释时，也可以用同样的术语来理解这一点：不确定态（即倾向性的集合）被一个有限的相空间区域所限定，而该区域又通过运动方程（牛顿定律）被确定性地映射到一个任意大的相空间区域（这是由混沌的系统导致的）。然而，当进行测量时，人们仍期待出现一种局域化，其方式与量子物理学中的“坍缩”相同。因此，在（非确定性的）经典力学和量子力学中，这种潜能的现实化都要求我们寻找一种“机制”，在测量时“迫使”倾向性变得确定。

可能导致这种情况的两种机制是：倾向性要么自发演化为确定的结果——这让人联想到量子理论中的客观坍缩模型 [38, 39] ——要么是测量以某种方式“施加”了确定性——这类似于量子力学的哥本哈根诠释：观察者或测量仪器（未在量子理论中描述）使波函数“坍缩”。前一种观点似乎最符合还原论，而后一种则似乎意味着一种自上而下的因果作用[40], ，即较高层次的描述“强制”较低层次实现。此外，在给定实验中只能实现一种结果这一事实本身就是一种（形而上学）假设。事实上，原则上可以对倾向性作一种激进的诠释：可能性永远只是可能性（也就是说，用我们的话说，不存在一个事件使其中一种可能性得以实现而排除其他可能性），而状态则是宇宙中任何可能事件的所有倾向性的集合，并且延展于整个时间。这与量子态的“多世界诠释”类似，也同样背负着庞大的本体论包袱（见第V节）。最后，我们注意到，经典物理学的标准确定性诠释，类似于加入不可观测的“隐变量”（即实数作为物理变量的实际取值，见[3]）；同样，玻姆力学也加入隐变量，以确定性地完备量子态理论（即每个量子粒子的位置）。

在相同的因果相关条件下重复进行时，我们可以以任意精度测量一个系统的倾向性，并在极限情况下逼近它。如果倾向性的值为 1，那么在理想测量的假设下（见第 II 节），系统总会呈现同一个特定结果。请注意——根据标准经典物理学，要测量系统某个物理量据称实际存在的值，或测量系统呈现某个特定结果的倾向性（同样据称存在），正如潜能实在论所主张的那样，都必须累积足够的统计数据。实际上，当我们断言一个系统（当前）具有某种性质时，例如，某个物理量具有性质 a，我们的意思是，如果我们要检验这种性质，也就是说，对该物理量进行一次（理想）测量，就会确定无疑地发现这种性质 a。然而在实践中，此类检验需要重复许多次，才能排除噪声和假阳性。这与我们断言一个系统（当前）具有某种倾向性的情形非常相似。

正是在对测量结果进行这种统计分析时，标准的柯尔莫哥洛夫概率才发挥作用。数学测度论对此已有充分理解（涉及概率空间、博雷尔集等）。然而，关键在于，我们没有先验理由相信，与不同测量相对应的统计量集合能够合并到同一个概率空间中。这不只是一种理论假设，量子理论实际上证明了这一点。因此，对于系统而言，呈现与不同物理量相对应的结果（即不同测量设置）的倾向性，先验上不应被期待满足柯尔莫哥洛夫公理——这与Humphreys定理相符。事实上，如果所有倾向性 p(a|测量条件) 都存在一个全局概率空间，那么联合概率 p(a,测量条件) 就是定义良好的，这将意味着存在提供确定性描述的“隐变量”——即全局概率空间的元素。于是只剩下两种可能：

1. 如果隐变量可以被获取，那么这个世界实际上并非非确定性的，或者

2. 如果隐变量在根本上无法被获取，那么就必须用本质上非物理的变量来描述这个世界（例如，经典物理学中的实数或玻姆力学中的精确位置）。

这里有必要作出澄清。在第二种说法中，「从根本上不可及」的含义，比标准经典物理学中实际值的不可及性，或我们提出的潜能实在论中倾向性的不可及性更强。事实上，后两者虽然实际上不可及，但可以通过重复测量中的连续近似来逐步逼近（借助伯努利大数定律）。而全局概率空间中的隐变量，则会像玻姆力学中的实际位置一样不可及，

因此，其物理依据远没有那么充分。[12]

IV. 有限信息量

在参考文献 [1], 中，我们提出了一种基于倾向性的经典物理学替代性非决定论解释。我们首先注意到，人们通常假设物理变量具有一个实际值，并且该值可被无限精确地确定（由一个实数表示）。与此不同，我们将信息密度有限性作为一项基本原理，即有限的时空体积只能包含有限量的信息（另见 [2]）。由此，我们引入了一种经典物理学模型，在该模型中，物理变量取值的对象不是实数，而是一类新的数学实体，我们称之为有限信息量（FIQ）。为说明这一点，我们先从标准观点谈起。设 Γ 是一个物理量（例如粒子的位置），其取值属于单位实区间，即 $\Gamma \in [0,1]$，并将其写成二进制形式：

$$\Gamma = 0.\gamma_1\gamma_2\cdots\gamma_j\cdots,$$

其中各位为 $\gamma_j \in \{0,1\}, \forall j \in \mathbb{N}^+$。由于 Γ是一个实数，它的无限位数一次性全部给定，每一位都有明确的值 0 或 1。另一方面，在我们的模型中，我们要求信息是有限的，因此并非所有数位在任何时刻都已确定。不过，由于我们要求该模型在经验上等同于标准经典物理学，因此前 n 个（更重要、或许已知的）数位在时间 t 必须完全确定：

$$\Gamma(n(t)) = 0.\gamma_1\gamma_2\cdots\gamma_{n(t)}?_{n(t)+1}\cdots?_k\cdots,$$

其中每一位 $\gamma_j \in \{0,1\}, \forall j \leq n(t)$，符号 $?_k$表示第 k 位尚未实际化，只存在其倾向性，直至时间 t。对于物理量 Γ (n(t)) 的每个数位 j，我们赋予倾向性 $q_j \in [0,1]\cap\mathbb{Q}$，用以量化第 j 个二进制位取值为 1 的倾向；因此，若第 j 位确定为 1，则 $q_j = 1$；若第 j 位确定不为 1（即为 0），则 $q_j = 0$。

FIQ 随后被定义为一个倾向性有序列表$\{q_1, q2, \cdots, q_j \cdots\}$，满足以下（必要）条件：$\sum_j I_j < \infty$，其中 $I_j = 1 - H(q_j)$ 是该倾向性的《熵》信息含量，而 H 是其二元熵函数。

论证。这确保 FIQ 的信息含量具有上界。因此，物理量 Γ 可表示为：

$$\Gamma(n(t)) = 0.\underbrace{\gamma_1\gamma_2\cdots\gamma_{n(t)}}_{q_j\in\{0,1\}}\overbrace{?_{n(t)+1}\cdots}^{q_k\in(0,1)}.$$

由于大多数经典系统都是混沌的，这种根本不确定性（此处用FIQ建模）不可避免地会导致经典物理学中也出现非决定论（参见参考文献 [2]）。因此，FIQ使经典物理学具有非决定性，同时在潜能实在论中保留了物理态这一概念（参见第 II节）。事实上，纯态（即包含关于某个系统的尽可能多的信息）在此是一个倾向性列表，其约束条件是其中包含的信息始终有限。

V. 为什么选择实在论？本体论的优势与代价

在前文各节中，我们为这样一种立场进行了辩护：倾向性——至少是本文所主张的因果性单案例解释中的倾向性——使我们能够兼顾实在论与基本非决定论。然而，人们或许会问，为什么一开始就要寻求对物理学的实在论解释。这个问题或许是科学哲学史上争议最大的议题之一（关于支持和反对科学实在论的主要论据综述，参见例如参考文献 [43] 及其中的参考文献），因此，显然不可能在这篇短文的范围内，尝试全面论述围绕形而上学实在论的论证与批评。这里我们只简要提醒读者，考虑实在论立场为何似乎富有成效；此外，我们还将论证，如果假定一种实在论世界观，那么基于倾向性的本体论就是最“经济”的选择。

为实在论辩护的一种方式，是将科学，尤其是物理学，视为一种兼具解释力与预测力的知识形式。后者被普遍认为是科学的标志性特征；根据强经验主义者和工具主义者的观点，科学不应追求超越这一特征的东西（参见，例如，[44]）。然而，这种观点似乎并未带来关于自然的特别洞见；更重要的是，它排除了某些问题的意义（一个典型例子是贝尔不等式；可以说，若以完全工具主义的方式运用量子理论，就不会推导出贝尔不等式）。因此，人们希望科学具备解释力，即能够就自然如何运作讲述前后一致的故事。这就要求我们为理论增添形而上学要素，因为要给出解释，就必须假定世界中存在相互作用、并从因果上说明观测现象的实体。显然，仅凭这一点还不足以构成科学，因为神话或宗教也旨在解释自然现象，只不过方式更为随意（例如，可以用波塞冬神发怒来解释海上风暴，或用宙斯神发怒来解释雷电）。因此，

[12] 这种以隐变量为基础的处理方式，与 D. Miller [41] 和已故的 Popper [42]提出的 Humphreys定理解决方案有些相似。他们认为，倾向性只能归属于某个事件的整个因果过去（用相对论术语来说，就是过去光锥，或整个宇宙状态）：“这种非标准条件化针对的是概率空间之外的一个‘事件’——宇宙的整个当前状态，它决定了概率空间中各事件的概率” [17]。我们注意到，贝尔非定域性危及了这样一种观点：所有相关的因果联系都只存在于局域事件的过去光锥中。相反，应将与所考察系统纠缠的所有系统各自的过去光锥合并起来考虑。

在一个令人满意的科学理论中，形而上学要素应构建为理论的观测与预测同世界底层事物之间的相互作用；后者即被假定存在的实在要素（这些要素可以是场、粒子、具有实际大小的特定自由度、倾向性等）。[13] 这些实在的底层要素必须满足一个必要条件：尽管它们通常无法被直接观测，但它们必须与理论预测和实际观测相容，也就是说，不能与之矛盾。这些世界中的事物构成了理论的本体论，至少可作为一种工作假设，为实在论奠定基础。

请注意，在任意给定时间，与同一理论和同一组观测相容的不同可能本体论有很多（原则上是无限多个）。因此，我们应当制定标准或准则，以便从所有可能且相容的本体论中选择一种。例如，可以考虑前苏格拉底哲学家阿那克萨戈拉所提出的本体论：他认为一切事物都由“种子”（spermata）构成，即由任何被观测到的物质和存在物的微观且完整成形的版本构成（例如，微型人类、石头、马、树等），并且“万物中都包含万物的一部分”[45]。近来，所谓的量子理论多世界诠释假定存在多重世界（可能是不可数无穷多个），也就是说，对于每一次量子测量，整个宇宙连同其极其复杂的结构都会分裂成许多份副本，而这些副本彼此之间的唯一区别就在于量子测量的结果。这两种本体论的共同之处在于：尽管它们提供了解释，却都极其“昂贵”，因为二者都意味着世界中所需事物数量的荒谬膨胀：阿那克萨戈拉的理论体现在组成成分的类型上，多世界诠释则体现在宇宙的数量上（因而还需要难以想象的信息量等）来构成实在。

这表明，在与某个理论的观测和预测同样相容的前提下，偏好某种本体论而非其竞争者的一个标准，是选择更“经济”的本体论。[14] 因此，如果能够借助更少的类型或更少数量的实在要素来解释观测现象，就应当优先选择该本体论。[15]

如今，人们普遍认为量子物理学是最成功的理论，而它的预测仅仅是概率性的。

[13] 物理学家或许熟悉爱因斯坦、波多尔斯基和罗森在其影响深远的 EPR 论文中提出的“实在要素”定义，即以物理量能否被完美预测为依据。我们在此使用“实在要素”一词，并非指这一特定定义，而只是直观地指世界上存在的“事物”。[14] 这在某种程度上与 E. 马赫的“科学的经济性”相似。不过，他甚至主张科学应彻底摒弃任何形而上学，而我们的理论只需以最经济的方式整理数据。如上所述，我们认为这并不令人满意，因为单凭这一点似乎无法提供解释。[15] 请注意，这不一定是支持物理还原论的论据；事实上，我们并不赞同物理还原论。科学的目标不应是将一切归结为一个能够解释一切的单一实体；不同现象可能需要由多种实体类型、动力学定律等共同解释。

.....概率性的。对经典物理学进行更审慎的分析，也会得出这样的结论：在观测层面，经典结果也只能以一定置信区间的形式为人所知，而置信区间是通过统计重复实验来确定的，并据此外推概率分布。混沌系统还会使不确定性随着时间推移呈指数级增长。（请注意，经典物理学的标准叙述通过假定存在实际的、精确到无限程度的确定值来消解概率，并认为测量只是近似揭示了这些值；但这本身已经是一种本体论立场。）因此，在科学的实际实践中，不确定性的度量，即概率，扮演的不是一个重要角色，而是最主要的角色。因此，最简约的本体论是：假定概率是某种底层本体论的体现，而该本体论在结构上与概率相似，也就是说，它是本文所阐述的、以因果倾向性形式存在的非确定性力量。

VI. 讨论

我们讨论了一种称为潜能实在论的物理学诠释。它不依附于任何特定的物理理论，却有助于澄清一个普遍遭到误解的事实：实在论与基本非决定论是相容的形而上学属性。潜能实在论赋予内在倾向或倾向性以“实在要素”的地位。因此，物理态并非由其实际属性（即假定的、每个相关自由度所对应变量所取的值）来刻画，而是由非决定性的潜在“力”来刻画；这些力量化了某一性质（相对于其可能的其他取值）实现为现实的内在倾向。

我们想强调本观点所呈现的物理学中的非决定论图景。在这里，非决定论并非表现为动力学演化中的随机涨落，也并非表现为任意的、无因的“跃迁”；在这里，没有任何因果链是凭空开始的。在我们看来，非决定性的演化是根本不确定性的因果结果。随着时间推移，新的信息不断产生，因此不确定性随之降低。根据动力学系统的不同，演化会受到新信息的驱动，走向此一方向或彼一方向。这种非决定论观点并非无因论，仅仅是因为随着时间流逝，某些潜能会被排除。

尽管我们的观点允许我们将世界视为非决定论的，同时又保留清晰的因果结构，但仍有许多问题尚未解决。例如，潜能如何转化为现实？这是一个自发过程，还是说这为我们从非还原论的角度思考铺平了道路，即不同层次的实在需要相互作用，才能给出解释？此外，在这一观点中，状态并非由实际属性构成的集合，而是由倾向性构成的集合（即潜在值，其中实际值只是一个子集，对应于倾向性为 1 的情况）。然而，倾向性的值会随时间动态变化，最终在实验结果出现时变为 0 或 1。那么，倾向性究竟依照什么规律演化？它们是否需要二阶动力学？

通过提出这些具有挑战性的问题，潜能实在论

提供了一个通用的概念框架，用于分析量子理论相对于其经典对应物所面临的问题。事实上，就大多数概念问题和“奥秘”而言，它在一定程度上消解了量子物理学的独特性。它表明，人们通常认为量子力学特有的现象，在很大程度上源于历史偶然性：根本不确定性、测量问题、多种解释（包括“多世界”解释和玻姆力学），都存在于任何物理理论的潜能实在论诠释中，无论该理论是经典理论、量子理论，还是任何假设的后量子理论。量子物理学真正无可比拟之处，在于存在不相容变量；事实上，普朗克常数 h 只在此处出现（以及在贝尔非定域性中，后者要求在不相容基上进行测量，才能违反经典局域界 [46]）。

诠释量子力学仍然是最大的挑战之一，也是现代科学面临的挑战之一。但若仔细思量，便会发现，这一挑战在很大程度上超越了量子物理学；而在植根于历史的教条主义背后，真正的重大挑战始终在于诠释物理学本身。

致谢

本研究得到了 FWF（奥地利科学基金）的资助，资助项目为 Erwin Schr¨odinger 奖学金（项目 J 4699：重新审视用于描述非决定论物理学的概率论基础）；同时也得到了瑞士国家科学基金会通过 NCCR-SwissMap 提供的资助。感谢 Jeremy Butterfield、Claudio Calosi、Federico Laudisa、Baptiste Le Bihan、Christian W¨uthrich 和 David Miller 提供的宝贵意见。

[1] Del Santo, F. 和 Gisin, N.（2019）。没有决定论的物理学：经典物理学的另类诠释。《物理评论A》，100(6)，062107。[2] Gisin, N.（2019）。物理学中的非决定论、经典混沌与玻姆力学。实数真的是真实的吗？Erkenntnis，86(6)，1469-1481。[3] Gisin, N.（2019）。实数作为经典力学的隐变量。载于《量子研究：数学与基础》，7(2)，197-201。[4] Del Santo, F. 和 Gisin, N.（2021）。非确定性的相对性。《熵》23，1326。[5] Del Santo, F.（2021）。非决定论、因果性与信息：物理学是否曾经是确定性的？载于《不可判定性、不可计算性与不可预测性》（63-79）。Cham：施普林格。[6] Del Santo, F. 和 Gisin, N.（2023）。非决定论物理学中的开放过去。《物理学基础》，53(1)，1-11。[7] P¨utz, G., Rosset, D., Barnea, T.J., Liang, Y.C. 和 Gisin, N.（2014）。任意小的测量独立性即可显现量子非局域性。《物理评论快报》，113 19 190402 ( )，Gisin, N.（ ）。物理学中的非[8] 2021决定论与直觉主义数学。Synthese，1-27。[9] Lestienne, R.（2022）。阿尔弗雷德·诺思·怀特海：时间哲学家。伦敦：世界科学出版社。[10] Maxwell, N.（1988）。量子倾向子理论：对波粒二象性困境的一种可检验解决方案。《英国科学哲学杂志》，39(1)，第1-50页。[11] Dorato, M.（2006）。属性与倾向：关于量子本体论的一些形而上学思考。载于《美国物理联合会会议论文集》（第844卷，第1期，第139-157页）。美国物理联合会。[12] Su´arez, M.（2004）。量子选择、倾向性与测量问题。《英国科学哲学杂志》，55(2)。[13] Su´arez, M.（2007）。量子倾向性。《现代物理学史与哲学研究》，38(2)，第418-438页。[14] Gisin, N.（2017）。时间确实在流逝，科学无法否认这一点。载于《物理学中的时间》（第1-15页）。Cham：Birkh¨auser。[15] Horwitz, L. P. 和 Piron, C.（1973）。相对论动力学。《Helvetia Physica Acta》，46(3)，第316-326页。[16] Popper, K. R.（1959）。概率的倾向性解释。《英国科学哲学杂志》，10(37)，25-42。[17] Berkovitz, J.（2015）。概率的倾向性解释：重新评估。Erkenntnis，80(3)，629-711。[18] Gillies, D.（2012）。概率的哲学理论。伦敦：劳特利奇。[19] Shoemaker, S.（1980）。因果性与属性。载于：Van Inwagen, P.（编）《时间与原因》。哲学研究丛书（哲学系列），第19卷。多德雷赫特：施普林格。[20] Calosi, C. 和 Mariani, C.（2021）。量子不确定性。《哲学指南针》，16(4)，12731。[21] Hacking, I.（1965）。统计推断逻辑。剑桥：剑桥大学出版社。[22] Fetzer, J. H.（1981）。科学知识：因果性、解释与确证。多德雷赫特：雷德尔。[23] Ballentine, L.E.（2016）。倾向性、概率与量子理论。《物理学基础》，46(8)，973-1005。[24] Barnes, E. 和 Williams, J. R.（2011）。形而上学不确定性理论。载于 Karen Bennett, K, 和 Zimmerman, D.（编）《牛津形而上学研究》第6卷。牛津：牛津大学出版社。[25] Miller, M.E.（2021）。世界性不精确。《哲学研究》，178(9)，第2895-2911页。[26] Butterfield, J.（1992）。概率与条件句：通过实例作出区分。载于《亚里士多德学会会议录》（第92卷，第251-272页）。纽约：威利。[27] Hughes, R.I.（1989）。量子力学的结构与解释。剑桥：哈佛大学出版社。[28] Gisin, N.（2015）现实主义物理理论的一种可能定义。《国际量子基础杂志》，1(1)，18-24。[29] Butterfield, J.（2005）。决定论与非决定论。《劳特利奇哲学百科全书》。伦敦：劳特利奇。[30] Mellor, D. H.（1971）。偶然性问题。剑桥：剑桥大学出版社。[31] Humphreys, P.（1985）。为什么倾向性不能是概率。《哲学评论》，94(4)，557-570。[32] 赖欣巴赫, H.（1956）。时间的方向。伯克利：加利福尼亚大学出版社。

[33] Pl´avala, M.（2021）。一般概率理论：导论。arXiv预印本：2103.07469。[34] Chiribella, G.,D'Ariano, G.M. 和 Perinotti, P.（2016）。从原理出发的量子理论。载于《量子理论：信息基础与补充论述》。多德雷赫特：施普林格。[35] Fetzer, J.H. 和 Nute, D.E.（1980）。概率因果演算：相互冲突的观念。Synthese，241-246。[36] Gisin, N.（1984）。经典与量子系统的倾向性及状态—性质结构。《数学物理学杂志》，25(7)，2260-2265。[37] Gisin, N.（1991）。非决定论物理学中的倾向性。Synthese，89(2)，287-297。[38] Ghirardi, G. C., Rimini, A., Weber, T.（1986）。微观与宏观系统的统一动力学。《物理评论D》，34(2)，470。[39] Gisin, N.（1989）。随机量子动力学与相对论。Helvetica Physica Acta，62 4 363 371 ( )，– Drossel, B. 和 2018

[40] Ellis, G.（ ）。语境性波函数坍缩：一种整合的量子测量理论。新《物理学杂志》20(11)，第113025页。[41] Miller，D. 1991。《单案例概率》。《物理学基础》21(12)，1501–1516。[42] Popper，K. R.（1990）。《倾向性的世界》。布里斯托尔：Thoemmes。[43]Chakravartty，Anjan，《科学实在论》，《斯坦福哲学百科全书》（2017年夏季版），Edward N. Zalta（编），网址：= ¡https://plato.stanford.edu/archives/sum2017/entries/scientific- realism/¿。[44] van Fraassen，Bas C.（1980）。《科学图景》，牛津：牛津大学出版社。[45] Lewis，E.（2000）。《阿那克萨戈拉与物理理论的种子》。《Apeiron》33(1)，1–24。[46] Wolf，M. M.、Perez-Garcia，D. 和 Fernandez C.（2009）。量子理论中不相容的测量，无法在任何其他无信号理论中联合测量。《物理评论快报》103，230402。