

量子达尔文主义

(中国科学院物理研究所 曹则贤 编译自 Wojciech H. Zurek. *Physics Today*, 2014, (10): 44, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)

量子力学的叠加原理要求量子态的任意组合也是合法的量子态。这和经验有些抵触：我们从未见过既烤熟又鲜活的鸡。为什么不能按照薛定谔的方案烤鸡呢？答案是同环境间的相互作用协助选择了系统的择优状态。因为无法跟踪复合的系统—环境的每一个变量，人们只好依赖约化密度矩阵。约化密度矩阵是对环境求平均得到的；玻恩规则，即波函数为 $|\psi\rangle$ 的系统处于特定状态 $|\kappa\rangle$ 的几率为 $|\langle\kappa|\psi\rangle|^2$ ，是求平均的基础。

决定择优态的相互作用喜欢烤鸡和活鸡这样的状态而禁止叠加态。那些未因同环境作用而改变的

优选状态被称为指示态，它们指向约化密度矩阵的本征态。对应的本征值给出比如发现是烤鸡还是活鸡的几率。选择指示状态的环境驱动之过程被称为退相干。

本文将通过跟踪择优的指示态的起源，推导它们的概率来研究经典图景的骤现。推导从只依赖玻恩规则的核心量子公设出发。观测者将退相干环境当作一个可用来获得信息的媒介。自系统向环境的许多片段所传递之信息的冗余导致了对外观经典现实的感知。

核心量子公设是量子奇异性的基础。奇异性很大程度上源自公设 1，即量子态对应希尔伯特空间中的

矢量，所暗含的叠加原理。公设 2 指出量子态的时间演化是幺正的。根据薛定谔方程，状态 $|s_0\rangle$ 经过时间 t 后会演化到态 $|s_t\rangle = U_t|s_0\rangle$ ，其中的时间演化算符 U_t 由哈密顿量 H 所决定： $U_t = e^{-iHt/\hbar}$ 。幺正演化是线性的，且保守状态的标量积。

公设 0 断言系统 S 与环境 ε 的复合状态可表示为 $\sum_k \gamma_k |s_k\rangle |\varepsilon_k\rangle$ ，其中 $|s_k\rangle$ 和 $|\varepsilon_k\rangle$ 是系

统和环境各自希尔伯特空间的基。纠缠是通过此复合公设进入量子力学的。公设 0—2 不过是量子数学，它必须同实验联系起来。

公设 3，即可重复性公设，断言马上重复的测量得到同样的结果。观测者不能揭示未知量子态，但可重复性可确认已知状态的出现。很难进行公设 3 所坚持的所谓量子非破坏性测量，但可重复性依然是状态作为预测工具之思想的关键。核心公设 0—3 构成量子信条。

关于测量的公设 4，即坍缩公理，是有争议的。公设 4 包含两部分：4a) 可观测量是厄米的；4b) 测量结果对应待测厄米算符的某个本征态。一个处于任意叠加状态的系统被测量时会坍缩到被测量算符的某个本征态上。公设 5，即玻恩规则，给出纯量子态测量结果的几率分布。公设 4 和 5 固有的随机性同公设 2 的幺正性相冲突。量子力学的奠基者们认为宇宙的一部分——包括测量器件和观测者——是经典的，量子跃迁随机性是由于“测量过程中的扰动”。我将指出，量子信条能导出公设 4a) 和 5，并暗示 4b) 的合理性。客观实在性的感知来自环境作为向我们发送信息之通讯通道的角色。

退相干导致环境诱导的对择优态的超选择。尽管超选择和退相干直接来自量子信条，但玻恩规则不是必须的。对应可观测量变量的算符，有正交的结果。若只有希尔伯特空间中的分立态是稳定的，系统

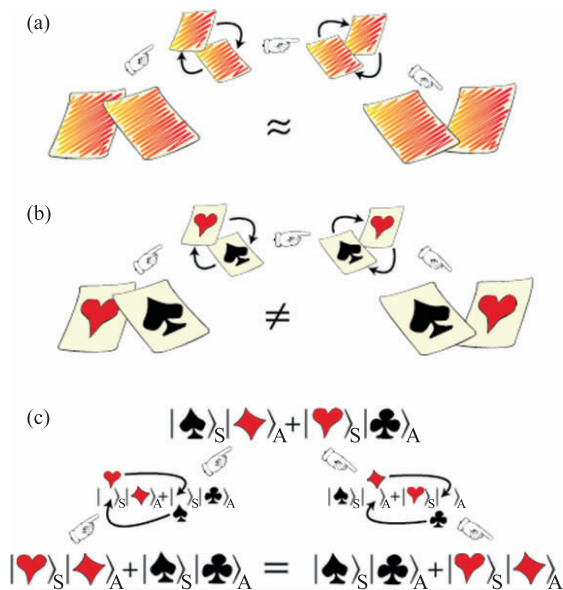


图 1 来自纠缠的概率。调换两张面朝下的扑克牌(a)被认为有“对称性”，拉普拉斯用其来定义概率；但交换前后牌的状态(b)确实变了；(c)对于量子系统，等几率来自纠缠。对系统 S 的调换可以被测量设备 A 的逆向调换抵消

的演化看起来象是跳入某个状态。经受过多次身份验证的正交态是由它们同设备或者环境相互作用所选择的。只有分立的稳定态才能被跟踪。根据退相干理论，经得住环境查验的能力定义了指示态。关于那些状态的记录通过环境的增殖乃是量子达尔文主义的本质。

微观体系中鲜有可重复性：非破坏性测量很难实现。在宏观世界中，可重复性是客观实在性骤现所必需的。稳定的宏观态也必须是正交的才有重复性的可能。

退相干指挥优态之间相位相干性的丢失。系统S按照下式被环境ε测量：

$$(\alpha|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle) \left| \varepsilon_0 \right\rangle \xrightarrow{H_{sc}} \alpha|\uparrow\rangle \left| \varepsilon_1 \right\rangle + \beta|\downarrow\rangle \left| \varepsilon_2 \right\rangle = \left| \psi_{sc} \right\rangle$$

两正交态的叠加通过与环境相互作用变成了纠缠态 $|\psi_{sc}\rangle$ 。假设完全的退相干， $\langle \varepsilon_i | \varepsilon_j \rangle = 0$ 。在这种情况下，哪些信息经受住了退相干，哪些丢失了？其实，α和β的相位不重要，对系统的测量测不到相移。关键点作用是作用到纠缠态 $|\psi_{sc}\rangle$ 上的相移可以被作用到远处与系统解耦合的环境ε上的反向相移所抵消。相位相干性的丢失就造成退相干。因为环境ε记录的是态 $|\uparrow\rangle$ 和 $|\downarrow\rangle$ ，叠加态会退相干。退相干让人想起了对称性，即在指示态系数的相移下S的纠缠辅助不变性(envariance)。由于与环境的纠缠，系统的局域态在纠缠前能影响到它的变换下现在是不变的。使用纠缠辅助不变性从量子信条能得到玻恩规则，即公理5。图1(c)描绘了证明的关键步骤。么正操作对调交换系统S中的态。如果再对调A的态，则恢复了初始状态。所有关于S的预言，包括概

率，必然同其处于原来的状态一致。在退相干语境中关于纠缠辅助不变性的讨论意味着当不同选择的系数都乘上任意相因子时，那些概率是不变的。

退相干建立在冯·诺依曼关于测量的分析之上，但是开始认可环境的角色。它在玻恩规则基础上将约化密度矩阵的物理意义合理化。环境引起退相干，它们还作为我们获得信息的

通讯通道。量子达尔文主义研究关于增殖且在环境中传播之系统的信息在经典现实骤现中的角色。环境的一个片段F扮演设备A的角色。它和系统S的关联常常等效地是经典的，因为环境的其余部分(表示为 $\varepsilon \setminus F$)保证退相干。

我们都是间接地检测世界，观测者通过截取落到不同环境片段上的指示态获得系统的信息(图2)。同退相干相联系的环境诱导超选择暗示适者生存：环境选择能存活的、追求经典性的指示态。量子达尔文主义解释增殖问题，即在退相干过程中S或者A的指示态是如何在环境上留下印痕的。S的状态被刻印到不同环境片段，可被许多观察者独立地发现，这(信息的)冗余就解释了客观存在是如何从量子世界里产生的。环境中关于指示态之数据的拷贝数是客观性的量度。

可重复性是关键；可重复性引

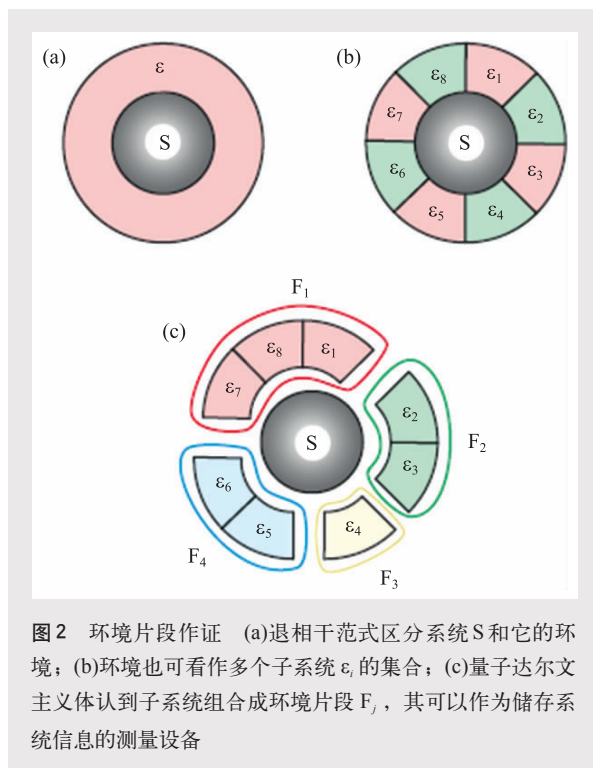


图2 环境片段作证 (a)退相干范式区分系统S和它的环境；(b)环境也可看作多个子系统ε_i的集合；(c)量子达尔文主义体认到子系统组合成环境片段F_i，其可以作为储存系统信息的测量设备

起分立性。环境片段的集体作用记载关于S的指示态的多重记录而不改变它们。量子不可克隆原理限制了制作拷贝的能力，但若拟拷贝态都是正交的，拷贝是可能的。造成退相干的时间演化，得到了不同分支的叠加，每个分支有一个稳定态和许多环境印记。作为退相干的结果，一个检测刻印到环境片段上之记录的观测者只能看到一个分支。这让人想起量子跃迁，和公设4b)一致。

量子达尔文主义表明很难撤销退相干。随意撤销退相干原则上是可能的，但资源和预见需求排除了这种可能。量子达尔文主义坚持量子信条，认识到一个退相干的环境可以是一个通讯通道，关于S的信息只当它过多地刻印在环境ε上才能被获取。对量子系统的间接检测意味着在看过一眼环境ε中的数据后，观测者接着能做的只是确认和更新。