
Principle of neural computation

头脑中复杂网络的顺序动态：意识和创造力

Sequential dynamics of complex networks in mind: Consciousness and
creativity



ScienceDirect

ADVERTISEMENT

Journals & Books

Register Sign in

You have institutional access

PHYSICS REPORTS

Physics Reports

46.3 CiteScore

25.600 Impact Factor

Articles & Issues About Publish Search in this journal Submit your article Guide for authors

Sequential dynamics of complex networks in mind: Consciousness and creativity

Volume 883, Pages 1-32 (3 November 2020)

Previous vol/issue Next vol/issue

原著 Mikhail I. Rabinovich, Michael A. Zaks, Pablo Varona
翻译 Song Jian (School of Mathematics in SCUT)

Physics Reports
journal homepage: www.elsevier.com/locate/physrep

Author information

Sequential dynamics of complex networks in mind: Consciousness and creativity

Article history:

Received 22 May 2019; Accepted 17 May 2020; Available online 29 August 2020

Editor: D.K. Campbell

Mikhail I. Rabinovich^{a,}, Michael A. Zaks^b, Pablo Varona^c*

AFFILIATIONS

^aBioCircuits Institute, University of California, San Diego, 9500 Gilman Drive #0328, La Jolla, CA 92093-0328, USA

^bInstitute of Physics, Humboldt University of Berlin, Berlin, Germany

^cGrupo de Neurocomputación Biológica, Dpto. de Ingeniería Informática, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, Spain

摘要【ABSTRACT】

今天,基于脑成像分析,我们可以把 William James(1890) 关于意识过程的事件离散性的绝妙隐喻视为一个实验事实。这些事件组成序列: 语言、情景记忆、运动行为等, 它们的动态是稳健的、可重复的, 并对传入的信息信号作出敏感的反应。人类的大脑能够处理、理解和预测有关环境和自身的时间依赖信息, 并生成相应的命令来控制行为。许多实验表明, 大脑依靠顺序动力学来执行这些任务。在脑成像实验的基础上, 我们讨论了一组关键原理及其在非线性微分方程中的实例化, 从而形成了意识和创造力的动态理论。一般的意识和创造力层次模型包括耦合的低维方程, 这些方程支配着几种认知模式的合作变量: 情景 (语义) 记忆、工作记忆、注意、情绪、感知和它们的顺序交互。在这些模型变量所跨越的相空间中, 认知模态的联合瞬态动力学由共享复杂亚稳态的耦合异宿网络表示。这些状态之间的相互作用, 决定了瞬态神经动力学的健壮性, 而瞬态神经动力学涉及到思想的生成和行为的编程。在分析的动态模型的框架下, 我们讨论了认知过程的相互作用和新信息的产生在创造力。

Keywords: *Heteroclinic dynamics Cognitive heteroclinic networks Sequential neural dynamics Dynamics of creativity Neuroscience*

文章导航

1 引言【INTRODUCTION】	4
1.1 连续的认识过程	4
1.2 序列和亚稳态	5
1.3 无赢家竞争原则	6
2 功能性认知异宿网络	8
2.1 相空间中异宿网络的元素	8
2.2 抗噪声的鲁棒性和对信息信号的敏感性	8
2.3 连续的认识活动	10
2.4 从主要原理到异宿动力学	11
2.5 异宿序贯动力学的存在性与稳定性-分岔-波动。	13
2.6 简单系统中的复杂动态网络	14
2.7 有限的信息容量和稳定性	15
2.8 异宿环中心：信息动态的语义记忆检索与语义控制	15
3 朝向认知活动的动态理论	16
3.1 不稳定性，发散，收敛和吸引子的全局方面。	16
3.2 事件序列：时间间隔，工作记忆和意识动态	17
4 创造力的动力	17
4.1 动态隐喻是创造力的形式	17
4.2 振荡创造性模式的共振相互作用	20
4.3 Rabinovich Fabrikant 系统的混沌暂态动力学	22
4.4 连续的创造力动态和情感	25
4.5 惊喜和不稳定	28
4.6 认知信息流维度	29
5 结论与展望	30
5.1 有意识的动态计时-多峰性绑定-同步和夹带	30
5.2 连续间隔时间的情绪和注意调节	31
5.3 socio-brain。：大脑间的时间协调	31
5.4 从神经科学到机器人，人工智能和生物医学应用	31
6 竞争利益声明	32
7 致谢	32
8 参考文献	32

1 引言【INTRODUCTION】

1.1 连续的认识过程

很遗憾，但我们不得不承认从一开始我们就不打算在这里讨论这个问题：第一个想法的起源是什么？，类似于生命起源的问题。是大脑本身控制思想，还是仅仅是外部因素的作用？文献中对这些基本问题的讨论不时带有不同的挑衅答案。一些作者甚至认为我们的宇宙负有责任。当然，没有定理可以证明这些假设是错误的。不幸的是，我们还没有准备好在这里讨论这些问题。

到目前为止，人们似乎普遍认为，人类活动，包括认知，是基本行为的序列：操作、技术或程序，在时间上互相替换。回想一下跳舞、演奏乐器、煮咖啡或在会议上发言。这些过程中的任何一个，如果从产生基本动作的机制中抽象出来，都可以很容易地在链模型的帮助下进行数学建模。当然，一个接一个的连续项目的含义可以不同。然而，尽管如此简单，如果我们想想这个行为的程序是如何在大脑中产生的，也就是说，这个链的一个条目是如何被另一个条目取代的，以及为什么这个链是健壮的，这个任务可能看起来非常复杂，甚至无法解决。如果我们试图理解我们现在的行为对未来的影响，这种印象就会更加强烈。

这解释了这样一种观点，即智力，尤其是意识本身是如此有趣甚至神秘的现象，以至于它们无法形式化，也无法用数学描述。这篇评论的目的是提出另一种观点，如果不是为了说服读者，至少是为了引起他们的兴趣，让他们自己开始思考我们是如何思考的，而这篇文章将为这种思考提供新的思路。我们将重点关注最近的实验、模型和进化方法来阐述一个基于非线性动力学方法的理论，该理论描述了丰富的认知现象：决策、注意、工作记忆，以及它们的整合结果，即意识和创造力过程（见图 1.1）。

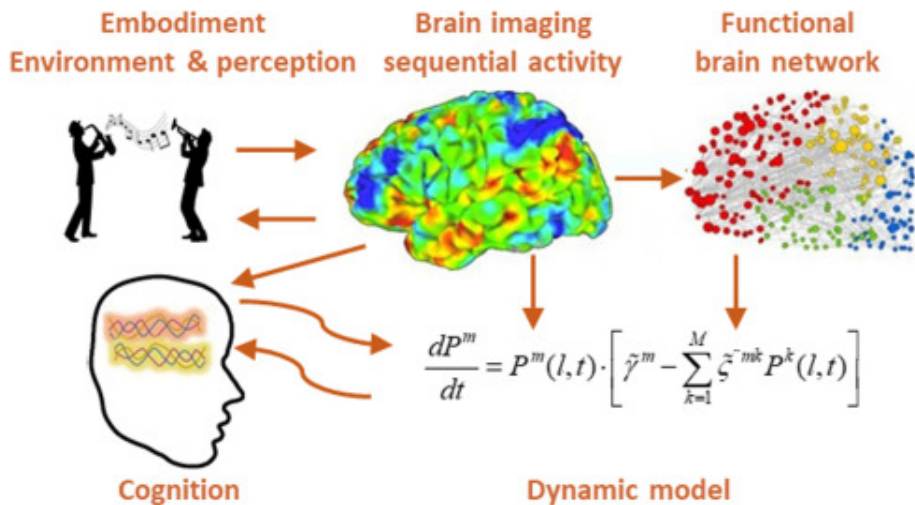


图 1: 非线性动力学为在神经系统层次的不同层次上连接大脑和认知活动提供了关键。脑成像实验用来描述功能神经网络的动力学和结构。动态模型整合了这些信息，揭示了在成像和电生理实验中观察到的基本原理，例如认知活动中顺序处理的稳健性，例如在爵士乐即兴创作等创造性任务中。来自这些模型的预测可以用于实验观察和生物医学应用的新解释。

这一理论的成功和美妙之处，在于它具有描述人类大脑时空活动基本类型的动态方法的普遍性，这些活动包括对环境的感知、思考和决策、行动规划，以及最后的行为。揭示心理动力学的原理是一项依赖于许多不同的相互关联学科的思想和专业知识的任务，如神经科学、物理学、精神病学、语言学、哲学、社会科学、神

经技术等。这些原则的普遍性也可能意味着人工智能系统和生物医学应用的创建和分析的新方法，我们也将下面讨论。

从这个角度来看，大脑可以看作是一个包含不同认知过程的数学图像的功能空间。对描述此类过程的鲁棒序列的关注允许此空间具有可调的低维性。如果空间承载着多种思维模式，那么应该赋予它一个层次结构和机制来协调动态同步、绑定和分块 [1]。

1.2 序列和亚稳态

当前认知研究的主要兴趣集中在理解全球脑网络 [2] 的结构 (连接体) 与相应心理过程的动态之间的关系 [3-7]。为了实现这一目标，我们需要建立基于动力学原理的数学模型，以支持层级顺序过程的实验观察特征 [8-12](参见 [13] 中的另一种观点)，如在不同尺度上对抗时空噪声的稳定性、再现性、资源最小化。

有两种不同但相互依赖的与意识相关的动态层次结构。第一个动态地将大脑组织的各个阶段从基因联系到意识 [14]。第二层次是在相应的动态模型 [15] 的心理空间或相空间中，对注意、工作记忆、绑定、组块等不同心理过程的组织。

许多实验表明，大脑使用离散的经济策略来代表、产生和处理认知信息，例如 [9,16-18]。这些策略包括对能够提供低维描述的递归循环大脑网络的分析。特别是，这种分析可以解决与环境相互作用的自我意识动态 [19,20]。连续瞬态脑动力学可以看作是可观亚稳态的连续切换的结果 [21-23]。形式上，亚稳定意味着超越稳定，但不一定超越存在。这包括不变集仍然存在但不稳定的情况。系统沿着稳定流形接近这些状态 (不稳定平衡态或不稳定周期轨道)，在足够接近它们的位置停留一段时间，然后沿着不稳定流形 [24] 离开。在动力系统理论中，不同亚稳态之间的路径 (相轨迹) 称为异宿轨迹。

下面我们将看到许多认知活动的模式可以被认为是建立在这种异宿结构的基础上的。组织这个空间的相应变量取决于测量的类型。利用主成分分析 [25] 对心理过程进行编码是选择这类变量最常用、最有效的方法之一，该方法在近三十年已成功应用于脑数据 [26,27](见图 1.2)。

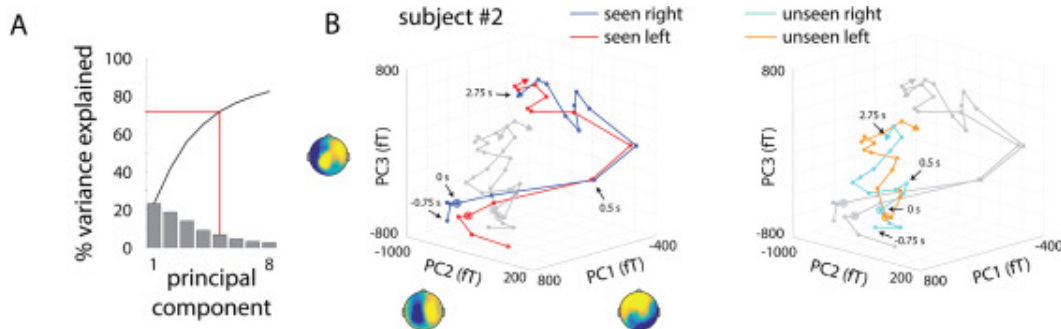


图 2: 在健壮的，短暂的心理动力学中编码有意识的视觉感知。该图与高时空分辨率的脑磁图 (MEG) 数据处理及相关的主成分分析相对应。(A) 主成分方差的分布。(B) 在右倾 (蓝色和青色) 或左倾刺激 (红色和橙色) 的呈现下，子空间中的试验平均活动轨迹横跨三个主要的主要成分，分别为可见和未见的试验。两个图都显示相同的轨迹 (即每个图中的灰色轨迹与其他图中的有色轨迹相同)，单位为飞特斯拉 (fT)。来源: 经 [27] 许可改编。

乍一看，世界对我们来说似乎是一连串连续不断的知觉。然而，最近的实验提出了另一种观点，即感知的整合过程可以以离散的方式运作，就像电影由离散的场景组成一样。

1.3 无赢家竞争原则

近十年来,在令人印象深刻的实验工作的影响下,对大脑在执行认知功能时的空间和时间活动的研究(功能磁共振模式分析)已经确定,大脑的功能认知活动是一个健壮的短暂过程 [29,30]。此外,有证据表明,意识和创造力是大脑中几个认知网络相互协调活动的结果。不同的网络集群执行不同的认知功能。这些网络中的每一个都联合了大量的的大脑基础结构。与认知过程相对应的瞬态动力学,并不是头脑中均匀的漂移;相反,大脑会有序地从一件事漫游到另一件事。由于各项之间的相互抑制,过程无法在其中一项附近找到最终的休息:新的局部不稳定模式将其进一步拖到下一项。综上所述,这种不稳定性的组合导致了由无赢家竞争原则(WLC)[32]控制的物品的永久连续变化。

在不同性质的非线性耗散多智能体系统(生态、社会、生理等)中观察到WLC。在脑动力学中,WLC原则与认知的另一个基本原则密切相关:功能认知动力学的低维性 [15,21,33-35]。

认知动力学指的是认知过程的动态方面。在我们的分析中,我们并不关注支持认知活动的物理大脑元素的细节。从这个角度出发,我们描述了思维和创造力的过程,这需要不同认知模式的不同时空尺度(见图1.3)的整合。因此,我们采用了心理活动及其动态过程特征的定量研究方法和结果。作为稳健序列动力学基础的动态模式与信息流相关,信息流的主要特征可以用异宿网络模型方法来描述。

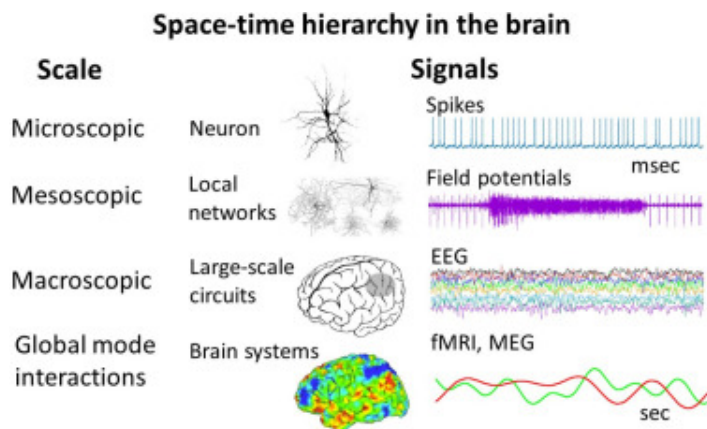


图 3: 用不同的实验技术测量的大脑时空层次的示意图。细胞内和细胞外记录在单个神经元和局部网络水平测量神经元活动。脑电图 (EEG)、功能磁共振成像 (fMRI) 和脑磁图 (MEG) 可以记录不同脑区序列活动,具有互补的时间和空间分辨率。

相应的动力学理论是建立在寻找大脑全局网络(例如,在功能磁共振成像(fMRI)实验中观察到的)和动态大脑模式(以不同相图的形式可视化)之间的关系的基础上的。由于特定大脑区域的神经元激活伴随着通过这些区域的脑血流量的增加,该技术提供了足够的局部和全局大脑活动的地图,见图1.4中的一个例子。

2 功能性认知异宿网络

2.1 相空间中异宿网络的元素

时空功能网络动力学可以被认为是连续的 [37-39]。通过不同的网络模式(认知模式)之间的时间切换,我们可以更好地理解各种各样的认知和行为。为了具有健壮性和计算效率,这些模态的动力学必须满足我们下

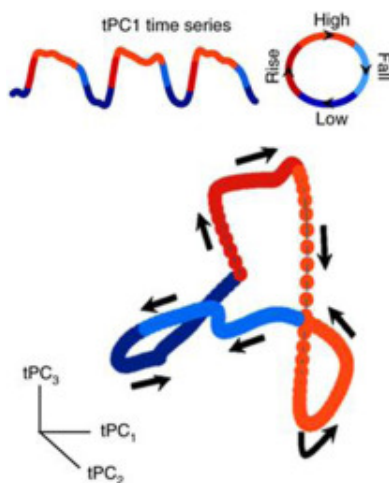


图 4: 认知任务的低维特征。利用 fMRI 记录的每个主成分 (tPC) 的时间序列提供一个低维子空间, 在子空间中嵌入状态空间流形。低维流形被前三个维度的整体大脑状态所穿越, 箭头表示沿流形流动的方向。来源: 经施普林格 Nature 许可, 改编自 [36]。

面将要讨论的一组原则。

认知是一个瞬态过程, 它既不是一个平衡状态, 也不是一个精确的周期振荡, 因此在相应的相空间中, 它不能有效地用具有可预测动力学的吸引子来表示, 如稳定不动点、极限环或环面。为了有效地适应处理多个灵活的认知过程, 大脑必须能够在特定的认知任务的瞬态模式下工作 [22,40]。一种方便的方法是将这些过程表示为在时空环境中出现的亚稳态 [41,42]。通过这种方式, 许多认知过程可以以相似的模式运行, 例如在相似的空间模式集合上, 并可以通过不同亚稳态之间的各种转换顺序模式来实现许多目标 [21,34], 见图 2.1。在这种情况下, 亚稳态代表与认知编码相关的信息项目, 如感官知觉 (如视觉、听觉、嗅觉模式)、认知决策、记忆记忆等。有些项目可能需要一个单一的亚稳态, 而另一些则需要一系列这样的状态。

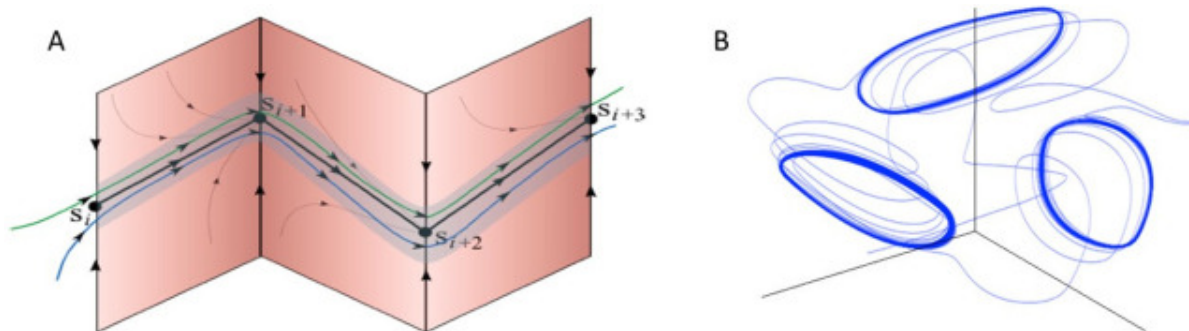


图 5: 在相空间中, 异宿信道是一种有用的数学对象, 可以实现健壮的瞬态动力学。图 A: 代表信息项的静态亚稳态序列: 鞍均衡 S_k , 用索引 k 对项进行编号。图 B: 动态亚稳态序列, 这些信息的数学图像是鞍状周期轨道。来源: 改编自 [43]。

与全球大脑模式竞争相对应的认知/心理动力学满足无赢家竞争原则 (WLC)。WLC 原理最初是用来描述

感觉信息的时空编码 [32,34,44]。感官信息的顺序编码是指在编码空间中包含时间 (图 2.2 和图 2.3)。

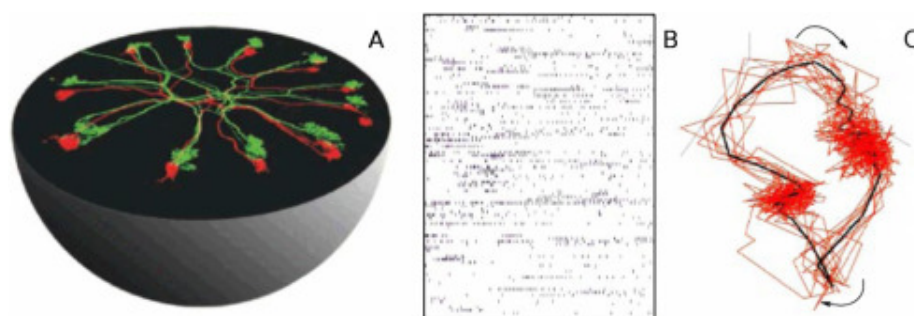


图 6: 昆虫嗅觉系统编码中瞬态序列动力学的实验证据。图中显示了刺槐触角叶 [36] 感官信息的时空表征:(A) 触角叶赤道面切面示意图; (B) 110 个触角叶神经元对气味持续 1.5s 的反应; (C) 神经活动在 3D 主成分空间上的投影 (黑色轨迹是 10 个不同实验的平均值)。来源: 经 AAAS 许可从 [34] 改编。

除了感觉处理之外, WLC 原理也可以直接与亚稳态大脑状态的一般序列动态相关, 这些状态被内部或环境刺激激活。WLC 动力学是具有兴奋性和抑制性连接 [46] 的脑功能网络的典型。这种方法使我们能够充分描述各种各样的认知现象, 如工作记忆容量的局限性 [47-49]、注意力集中和注意力转换 [43,50,51]、情绪和认知之间的动态交互作用 [52]、言语产生 [53], 以及潜在的精神障碍的动力学 [52,54]。

2.2 抗噪声的鲁棒性和对信息信号的敏感性

因为认知动力, 作为一个规则, 涉及许多亚稳状态, 需要一个新的全球动态对象来描述顺序活动不敏感地依赖于初始条件: 这是一个稳定的 heteroclinic 通道 (自燃) 在相空间狭窄的通路, 建立在适当的 heteroclinic 行程轨道。根据特定情况, 通道可以关闭 (然后动态变成循环) 或打开。开放异宿通道是 [55] 神经回路中瞬时序列活动的通路; 这些通道是鲁棒的 (即轨迹不将它们留在路径中间) 的条件是根据平衡的亚稳态的线性化特征值来表述的。

尽管认知任务对噪声具有相对的鲁棒性, 但它们对微小的环境和内在刺激是敏感的。人们越来越认识到, 支持认知的自适应网络会随着时间的推移而改变, 这些连接的某些方面可能是短暂的 [56]。这些也可以被看作是一个由具有层次连接属性的主动动态状态和其他节点组成的互连网络, 这些节点执行更多的感官或反应角色 [11](见下文)。噪声和信息信号以两种性质不同的方式影响 SHC, 这一事实可能解决 WLC 动力学中鲁棒性和灵敏度之间的根本矛盾。噪声只会改变通道内轨迹的初始条件, 如果抑制足够强, 被干扰的轨迹会保持在通道的俘获状态, 而通道本身是健壮的。相比之下, 小的信息信号可以激发新的参与者: 这些模式定性地改变了 SHC 的结构。这种通道拓扑的改变代表了对新信息的反应。

最近, 许多研究者提出在编码认知时包含一个时间维度。例如, Janoos 等人研究了认知功能的状态-空间模型中空间活动图的时间结构, 该模型提供了血流动力学反应 [57] 的空间变化估计。类似地, Kriegeskorte 等人关注于用低维特征空间来表示数据 [58]。在最后一篇论文中, 我们分析了心算任务中获得的一组功能磁共振数据来表征特定心理过程的时空信息。语言理解和解码研究为认知编码空间中包含时间的重要性提供了一个清晰的例子, 需要多个脑区 [59] 之间的动态交互作用。此外, 最近基于脑电图的实验揭示了与亚稳态相关的电场 [60] 微观状态的短期基本模式的存在。在 [61] 中提出了一种模型微观状态的一般方法, 旨在捕获微观状态序列的统计特性。

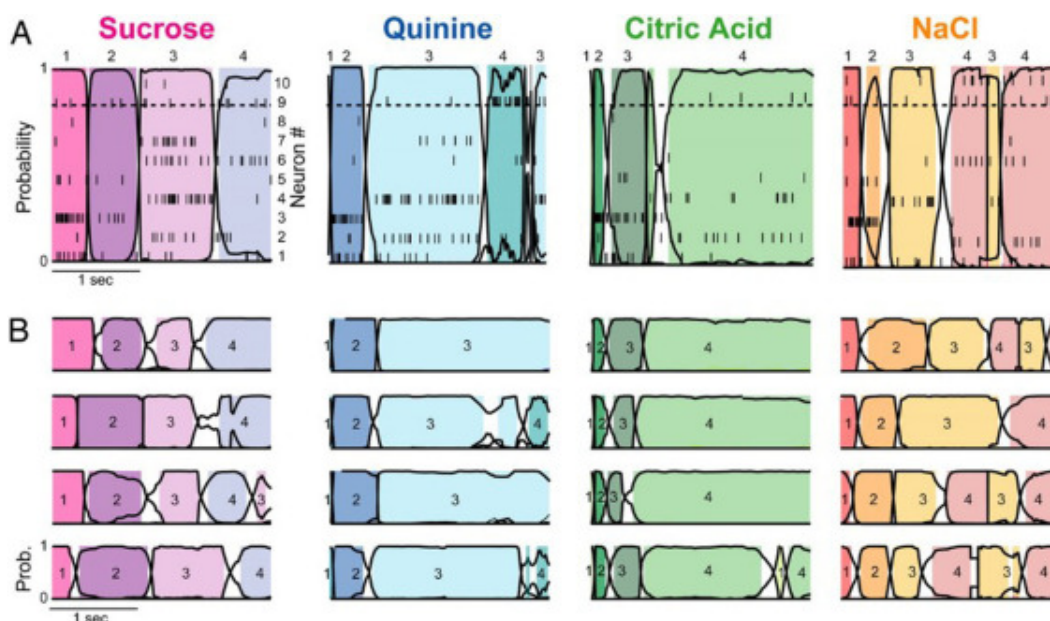


图 7: 哺乳动物瞬态序列动力学的实验证据。大鼠味觉皮层神经元产生味觉特异性序列模式 [45]。(A) 面板显示了 10 个皮层神经元在四种味觉刺激下的顺序激活: 蔗糖、奎宁、柠檬酸和氯化钠。(B) 4 个额外的序列为相同的神经元集合显示序列的可靠性。尽管在切换时间上存在不规则性, 但序列具有高度的可重复性。来源: 经 [45] 许可改编。版权所有 2007 年国家科学院。

2.3 连续的认识活动

过去十年的神经成像研究揭示了人类大脑内在组织的详细情况。然而, 由于神经组织的复杂性和认知功能的巨大变异性, 找到大脑活动和行为之间的精确映射是一个非常困难的问题, 很少有例外 (如图 2.4)。

脑成像方法主要局限于数据, 通常图像数据是在一个时间维度上以三维像素 (体素) 收集, 从而产生一个 4 维矩阵。这些体素的时间序列与外部刺激 (使用相关方法)[62-64] 或内部刺激 (使用连接方法)[65,66] 相关。这些方法试图确定有意义的数据衍生信号。多体素模式分析 [67] 和多变量贝叶斯解码 [68] 提供了一种整合多体素预测或分类大脑状态的方法。然而, 根据我们对人类认知的现有参数的了解, 我们提出了一种基于相对低维预测非线性动态建模的分析; 模型可以拟合现有数据, 并扩展到数据外推。功能认知动力学的具体特征, 即相位图和时间序列, 由相应的大规模大脑网络的架构决定 (见表 1)。这种建模方法允许设计异宿骨架架构, 自然实现同步、绑定或分块 (分组) 等多尺度协调现象。

2.4 从主要原理到异宿动力学

推导广义动态认知加工模型需要建立一组数学方程, 这些方程要求遵循可推广的原则 [50]。因此, 该方法要求:(i) 方程控制变量, 代表神经元素在其时间相干性的进化, 这些方程的解对应于亚稳态模式与认知过程;(ii) 将 WLC 动力学赋予许多信息项以时空模式的非线性交互过程, 使亚稳态之间的序列切换和瞬态创造力动力学的潜在稳健性成为可能。(3) 模型是一个开放的耗散系统, 具有抑制和激发之间的整体平衡;(4) 模型的动力学必须对记忆和环境信息敏感。

投射功能模型模式的空间成分, 可以解释为签名的功能大脑网络, 认知加工的基础。我们将这些过程的空

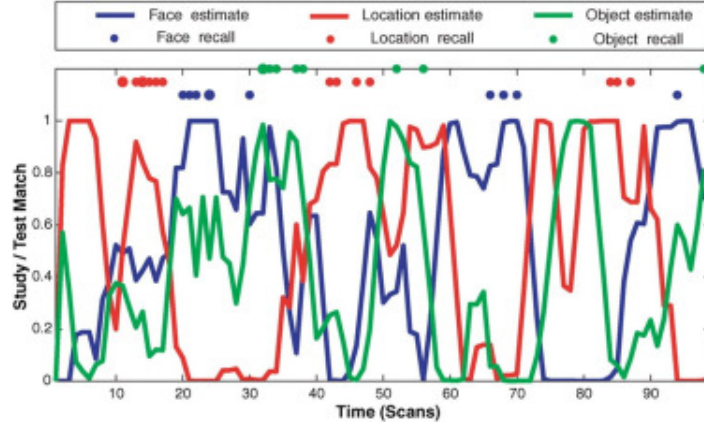


图 8: 说明记忆回忆期间的连续大脑活动是如何与回忆行为联系起来的。x 轴上的每个点对应 1.8 秒的间隔 (在 3 分钟的回忆期间)。蓝线、红线和绿线对应的是分类者对受试者恢复认知顺序模式的估计, 这些模式是在那个时间点上人脸研究、地点研究和物体研究的特征。每条线都表示一个给定网络在认知过程间的时序切换中的首要地位。图表显示了分类者对特定类别大脑活动的估计与被试的实际回忆行为之间的强烈对应关系。来源:[69]。经 AAAS 许可转载, 参见图 1.1。

间和时间依赖性表示为叠加:

$$R(l, t) = \sum_{m=1}^M P^m(l, t) \quad (2.1)$$

点 $P^m(l, t) = R^m(t)Q^m(l)$ 表示第 m 个时空模式, 取决于时间 t 和基于组离散坐标 l 在大脑的物理空间, 非负实值函数 $R^m(t)$ 描述了 m 的演化模式的空间结构是由 $Q^m(l)$ 、投影函数的 m 模式, M 为模态总数。我们正在寻找一种标准形式, 一种最小复杂度的结构 (例如, 一个最低次的多项式), 以确保所有相关类型的动力学。为了保持振幅的非负性, 每个模态的发展方程的右边应该与这个模态的振幅成正比。因此, 这种情况下的标准形式是, 对于每种模态, 一个具有最简单二次非线性的常微分方程:

$$\frac{dP^m}{dt} = P^m(l, t) \cdot \left[\tilde{\gamma}^m - \sum_{k=1}^M \tilde{\zeta}^{mk} P^k(l, t) \right] \quad (2.2)$$

这里, $\tilde{\gamma}^m$ 是模式 m 的激励水平, 而 $\tilde{\zeta}^{mk}$ 是模式 k 对它的抑制水平。在这里用随后的求和代入 (2.1), 我们得到典型生态模型 – 广义 Lotka-Volterra (GLV) 方程集 [43]

$$\theta_m \frac{dR^m}{dt} = R^m \left[\tilde{\gamma}^m (X^m, S^m) - \sum_{k=1}^M \tilde{\zeta}^{mk} (R^k, S^m) R^k(l, t) \right] \quad (2.3)$$

其中 X^m 是来自网络层次其他层次的输入, 如下式 (2.4) 所定义, 而 S^m 是第 m 阶模态的感觉输入。这里, $\theta_m = \sum_l Q^m(l) \geq 0$, $\gamma^m = \tilde{\gamma}^m \theta_m$ 和矩阵元素 $\zeta^{mk} = \tilde{\zeta}^{mk} \sum_l Q^m(l) Q^k(l)$ 非负。 K^m 认知模态之间的相互作用, 如注意、知觉和情绪, 可以用它们自己的模态集合来表示 (参看 (2.1))。

$$X^m(q, t) = \sum_{i=1}^{K^m} x_i^m \phi_i^m(q^m) \quad (2.4)$$

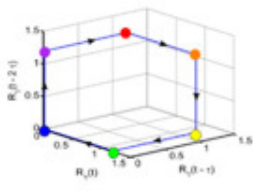
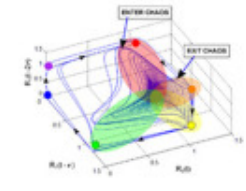
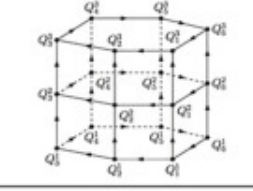
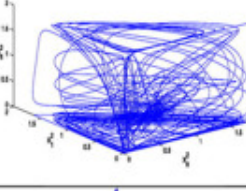
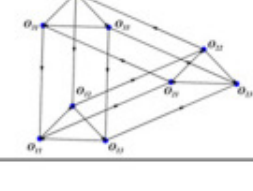
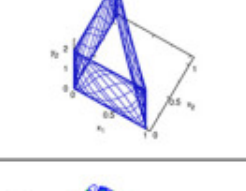
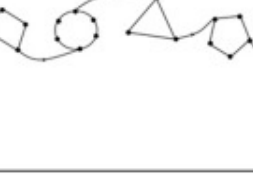
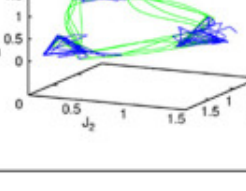
HETEROCLINIC NETWORKS AND EXAMPLES OF ASSOCIATED COGNITIVE PHENOMENA		
Heteroclinic skeleton networks	Phase portraits of trajectories close to the heteroclinic skeleton	Examples of associated cognitive phenomena and references
		Heteroclinic chimera in a stable heteroclinic network with several metastable states Rabinovich et al. <i>Frontiers in Systems Neuroscience</i> 8: 220 (2014).
		Binding heteroclinic network Afraimovich et al., <i>Chaos</i> , 25: 103118 (2015) Rabinovich & Varona, <i>Front. Comput. Neurosci.</i> 12: 73 (2018).
		Heteroclinic synchronization and heteroclinic tori Afraimovich et al., <i>Chaos</i> , 28: 053107 (2018).
		Chunking of components with different time scale Rabinovich et al, <i>Front. Comput. Neurosci.</i> 8 (2014).

图 9: 表 1 异宿骨架网络、其邻域的相图以及这些动态对象所代表的相关认知现象。

其中 ϕ_i^m 是 m 第一个模态的 i 第一个模态的投影函数。我们得到了广义规范形式

$$\tau_i^m \frac{dx_i^m}{dt} = x_i^m \cdot \left[\sigma_i^m (R^m, S^m, C^m) - \sum_{j=1}^{K^m} \rho_{ij}^m x_j^m - \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^{K^m} \xi_{ij}^{mk} x_j^k \right] \quad (2.5)$$

$$\tau_i^m = \sum_{q^m} \phi_i^m(q^m) \quad (2.6)$$

其中 ρ_{ij}^m 是同模态模态之间的抑制性连通矩阵, ξ_{ij}^{mk} 是不同模态模态之间的连通矩阵。它是合理的假设 $\sigma_i^m \sim \tau_i^m, \rho_{ij}^m \sim \sum_{q^m} \Phi_i^m(q^m) \Phi_j^m(q^m), \sigma, \rho \geq 0$

值得注意的是, 广义 Lotka Volterra 方程也自然地出现在大规模神经网络的连续极限中, 即在神经场模型中, 它们表征了特定突触相互作用核的异质场中空间非常稳态状态的稳定性 [70]。Lotka Volterra 模型是讨论同步、协调和绑定的动态方面的一个方便的框架 [44,71-75]。广义 Lotka Volterra 方程的一个重要性质是在相空间中存在许多不变超平面: 如果 (2.3) 中任意变量 R^m 或 (2.5) 中任意变量 x_i^m 初始设为零, 则它始终为零。一个推论, 在我们的环境中最重要的, 是鲁棒异宿动力学。在一般的动力系统中, 平衡亚稳态之间的异宿连接 (轨迹) 在结构上是不稳定的 (见下文), 并且只存在于控制参数的特定组合: 参数的微小变化破坏了它们。相比之下, 在一类广义 Lotka Volterra 方程中, 鞍点间的异宿轨迹结构稳定且存在于参数空间的开放区域中。

2.5 异宿序贯动力学的存在性与稳定性-分岔-波动。

在本节中, 我们讨论亚稳态间异宿轨迹的鲁棒性和稳定性。如果所有的轨迹都在其足够接近的地方开始, 并且永远停留在这个周期/通道的附近, 我们就称其为稳定的异宿环或通道。关于鲁棒性, 我们用这个术语表示向量场的结构稳定性: 如果系统参数的变化足够小, 则异宿连接是鲁棒的。

这里, 为了简便起见, 我们将自己限制在亚稳态上, 即 N 维动力学系统的双曲鞍平衡 S_1, \dots, S_N [76] (见图 2.1 的 A)。由于拓扑的原因, 耗散动力系统鞍座间的异宿连接通常是脆弱的。从 S_1 到 S_2 的轨迹应该同时属于 S_1 的不稳定流形 W_1^u 和 S_2 的稳定流形 W_2^s 。如果稳定流形的维数重合: $\dim(W_2^s) = \dim(W_1^u)$, 则 W_1^u 和 W_2^s 一般不会沿 (至少) 一维曲线相交; 这阻碍了鲁棒异宿轨迹的存在。如果 $\dim(W_2^s) < \dim(W_1^u)$, 则存在从 S_1 到 S_2 的通用连接, 但没有从 S_2 到 S_1 的通用连接。一个较长的健壮连接链意味着稳定流形的尺寸沿链的增长。由于明显的原因, 这只能是有限的 (通常是很短的) 长度, 并禁止封闭等值线的存在。

为了使鞍座之间的异宿连接健壮, 动力系统应具有相空间的特殊结构。在应用中经常出现的两类这样的系统是 (i) 具有离散置换对称的系统 [77] 和 (ii) 相空间被一个足够大的不变 (超) 平面集分割的系统 [78]。变量可排列的设置包括三个不稳定模式之间的鲁棒异宿轮廓的第一个文档示例: 旋转流体层中的热对流的描述 [79], 以及对全局耦合的相同一维相位振荡器系统的不同修改, 其中结构稳定的异宿轨道导致了所谓的缓慢切换现象 [8083]。当单个网络是相同的, 但耦合模式是异构的时, 也会出现健壮的异宿连接 [84]。排列和/或具有相同现场动态的单位似乎与我们的环境几乎无关: 大脑中的不同模式指的是根本不同的活动, 因此, 排列对称性并不相互关联。相反, 在认知动力学中, 情况 (ii) 是普遍存在的: 正如在正则方程 (2.2) 或 (2.5) 中可以识别的那样, 广义 Lotka Volterra 模型提供了一种丰富的不变超平面结构, 在这些超平面上, 一组变量完全消失。这里, 在典型情况下, 两鞍稳态之间的异宿轨迹完全位于二维不变平面的象限内; 在这个平面内, 一个定常点是鞍形点, 而另一个定常点是汇聚点。由于将具有抑制二次非线性的 Lotka Volterra 方程约化为这一象限, 既不能包含趋近于无穷远的轨道, 也不能包含闭合的相位轨迹, 因此第一点的不稳定流形必须终止于汇聚, 因此, 服务于健壮的 (只要保持规范设置) 异宿连接。

异宿轨道的存在并不足以满足其可观测性: 为此, 需要在足够小的扰动下保持稳定性, 以便开始于异宿解附近的轨迹在时间过程中接近它们。对于异宿通道中的轨迹, 绝大部分时间花费在稳态附近的慢运动中, 因此它们的稳定性主要取决于稳态附近的线性化特性。让特征值 $\lambda_1^{(i)}, \dots, \lambda_n^{(i)}$ 系统的雅可比矩阵线性化的第 i 个平衡点 S_i 下令在 $\lambda_1^{(i)} > \dots \geq \operatorname{Re} \lambda_m^{(i)} > 0 > \operatorname{Re} \lambda_{m+1}^{(i)} \geq \dots \geq \operatorname{Re} \lambda_n^{(i)}$ 。则在 m_i -维不稳定流形 W_i^u 的 S_i 上存在一个与第一特征向量相切的强不稳定一维流形。

$$v_i = -\frac{\operatorname{Re} \lambda_{m_i+1}^{(i)}}{\lambda_1^{(i)}} \quad (2.7)$$

称为鞍值 [85]。当通道中所有鞍值 $P = \prod v_i$ 的乘积大于 1 时, 异宿通道或环是吸引的。几何上, 条件 $P > 1$ 表明, 在沿该通道的过程中, 相流的收缩大于扩张。值得注意的是, 每个鞍座, 单独来看, 没有义务保持其鞍座价值超过 1: 对沿通道运动的稳定性有影响的是通道中所有亚稳态的乘积。通过这种方式, 强收缩的鞍座可以抵消弱扩张的鞍座的不稳定作用。

在广义 Lotka Volterra 方程 (2.5) 类中, 鲁棒异宿轨道存在于参数空间的大区域内, 并且在其存在域的可观子集上是稳定的。在一组具有随机选择系数的正则方程中观察到顺序异宿动力学的概率统计在 [86] 中进行了计算和讨论。参数的变化可能导致系统离开稳定区域: 使异宿通道失稳或破坏。对这种情况的一般分析见例 [87]。在可能的破坏机制中, 与我们的设置相关, 我们提到了新的平衡状态进入相空间的正正交的情况。在此过程中, 它与其中一个参与异宿连接的鞍点发生碰撞和交换稳定性。因此, 异宿轨道在跨临界异宿分岔过程中消失 [88]; 它被平衡的稳定状态所取代。

另一种分岔情形与鞍点局部特征的变化有关。如果在参数变化过程中, 所有鞍值的乘积 (2.7) 小于 1, 则异宿环虽然仍然存在, 但会失去渐近稳定性 [89]。一个长周期 (有限周期) 稳定极限环从异宿轨迹分叉并继承其稳定性; 在局部, 行为的顺序特征不会有太大的改变: 吸引轨迹仍然在离亚稳态很近 (但有限!) 的距离处通过。

在最简单的构型中, 所有鞍座的不稳定流形都是一维的。不稳定流形维度的增加丰富了动力学, 为比单纯的循环重复更复杂的场景创造了可能性 (见例 [90])。当平衡态的不稳定流形是二维时, 它们的并集可以形成一个吸引非光滑的二维异宿环面。尽管在其不变面上不可能出现混沌, 但每一个轨道都是不稳定的 [91]。序列动力学的另一种二维吸引子在 [92] 中描述过, 它等价于二维圆柱或 Möbius 带上的流动。文献 [93] 讨论了以几个典型时间尺度相互作用为特征的异宿轨道的层次建立。在某种意义上, [94] 提出了逆问题解的一个有趣的变体: 如果需要一个基于鞍平衡集的具有已知性质的异宿网络, 那么连通性矩阵应该是什么? 在实验数据中识别亚稳态和异宿连接的算法, 包括事件相关脑电位的记录, 在 [95,96] 中被提出。此外, 认知顺序活动可以在混沌流动的一般背景下看待, 如 [97,98]。

动力系统 (2.2) 和 (2.3) 是确定性的。另一方面, 微观水平的神经元动力学永久地受到各种波动的影响。加性噪声最直接的影响已经在 1980 年 Busse 和 Heikes 关于异宿环的第一次出版物中被报道: 噪声的存在阻止振幅衰减到任意小的水平 [79]。结果, 轨迹被迫离开亚稳态附近, 运动的持续时间有效地变得有限: 异宿轨道被噪声极限环取代。关于持续时间对噪声振幅的依赖性的估计, 参见 Kifer 1981 年 [99] 的论文和后来的工作 [100]。当噪声不是作用于单个异宿环, 而是作用于一个异宿网络时, 它就发挥了更丰富、更重要的作用。异宿环是几个异宿环的联合, 它们共享某些平衡和它们之间的联系。网络中不同异宿环之间的竞争受到噪声的影响 [101]: 根据潜在的确定性动力学特征, 轨迹可能显示出异宿循环之间的随机切换, 或者相反, 在任意长的时间内跟随其中一些循环, 强化或逆转确定性偏好。对于广义 Lotka Volterra 方程 (2.5) 中出现的异宿轨道, 可以合理地地区分加性噪声 (这里需要特别注意, 以确保所有变量都为正) 和乘性噪声的作用: 当系统接近平衡态时, 后者的相对贡献减弱。在 [102] 中进行的分析表明, 适当调谐的加性噪声可以用杂宿环附近的极限环代

替杂宿环; 这将导致系统的窄带节律性活动。与加性噪声不同, 乘性噪声不会破坏异宿态循环: 当乘性噪声的强度提高时, 停留在亚稳态附近的时间会增加, 超过阈值噪声水平后, 顺序切换停止。在更一般的情况下, 这意味着异宿信道对乘法噪声具有持久性, 并能够传输具有高信噪比的信息。

2.6 简单系统中的复杂动态网络

上述分层典范模型是基于神经元活动率的描述, 可以推广到 spike 神经元系综的情况, 见 [103]。形成特定认知模式的神经元群之间存在非对称的相互抑制连接, 需要稳定的异宿通道。基于速率和峰值的规范模型在其相空间中都有 shc。在这样的模型中, SHC 实现了健壮的顺序动力学, 这是各种认知活动的典型特征。异宿动力学为瞬态过程提供了一个适当的数学框架, 可以将其视为通过亚稳态的旅程, 见 [21,104]。

这种过程的复杂性和多样性, 即认知相空间异宿神经网络结构的复杂性, 取决于两个因素: (i) 自由度的数量, 即构成模型的变量的数量, 以及 (ii) 在控制参数空间的固定区域中共存的具有多个不稳定方向的亚稳态的数量。最后一个特征取决于正则模型中的非线性类型。

为了合并大量的亚稳态, 动力学系统不需要是非常高阶的。在最近的一些出版物中, 提出了具有通用复杂动力学行为的四维超混沌系统 [105,106]。特别是, 在这些论文中, 提出了一种形式化的方法, 用于在低维相空间中构造无限个可以由分离函数连接的吸引子 (见图 2.5)。我们通过 [106] 中的一个例子, 说明了一个唯一紧吸引子转化为一个沿多个方向扩展的多滚动集, 其中起点是一个由方程控制的四阶系统

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= ax_2 - ax_1 - ex_4 \\ \dot{x}_2 &= bx_1 - x_2 - x_1x_3 - fx_4 \\ \dot{x}_3 &= x_1x_2 - cx_3 \\ \dot{x}_4 &= kx_2x_3 - dx_4\end{aligned}\tag{2.8}$$

在适当的参数值下, 系统的吸引子是混沌的。坐标变换 $x_1 = R \sin y_1$ $x_2 = R \sin y_2$ $x_3 = R \sin y_3$ $x_4 = y_4$ 得到方程组

$$\begin{aligned}\dot{y}_1 &= \frac{aR(\sin y_2 - \sin y_1) - ey_4}{R \cos y_1} \\ \dot{y}_2 &= \frac{R(b \sin y_1 - \sin y_2) - R^2 \sin y_1 \sin y_3 - fy_4}{R \cos y_2} \\ \dot{y}_3 &= \frac{R \sin y_1 \sin y_2 - c \sin y_3}{\cos y_3} \\ \dot{y}_4 &= R^2 k \sin y_2 \sin y_3 - dy_4\end{aligned}\tag{2.9}$$

由于变换后的方程对于 y_1, y_2, y_3 的平移是 2π 的倍数是不变的, (2.8) 的紧致混沌吸引子根据 (2.9) 的变量变成了一个多卷轴模式。系统 (2.9) 的相像向 y_1, y_2, y_3 方向延伸; 沿着这些涉及到的空间结构旅行的过程提醒了 Lévy 飞行动力学 [107]。

根据这一逻辑, 下面我们使用两种模型: 具有最小 (二次) 非线性的广义 Lotka Volterra 方程和具有三次非线性特征的复杂 Ginzburg Landau 模型。这种方法对于同时包含功率 (振幅) 和相位变量的非线性动力学模型的设计特别有用。

2.7 有限的信息容量和稳定性

同时处理来自外部刺激和大脑内部动态的大量信息流是有局限性的。注意过程为特定的认知任务依次选择最重要的信息。相关的认知表现依赖于短期工作记忆 (WM) 和注意过程的相互作用 [108]。

顺序工作记忆的容量被估计为 5 2 项 [109]。从动态的角度来看, 这种限制不仅与对象的数量有关, 对象可以被认为是信息块, 还与对象的复杂性有关 [110]。个人的 WM 能力是不同的, 取决于年龄和健康状况等因素 [111-114]。WM 容量对环境和个体的依赖性可以通过基于 SHC 的模型的参数来表示, 特别是通过网络抑制的水平来表示 (见图 2.6 和 [48,50])。因此, 网络可以基于支持正确顺序的 WLC 原理可靠地保持项的序列 [115]。

2.8 异宿环中心: 信息动态的语义记忆检索与语义控制

我们必须区分大脑神经网络中的中枢和功能认知网络相空间中的中枢。大脑中枢可以被识别为与许多网络节点 (富裕俱乐部的成员) 有连接, 并负责不同专业网络的合作 [116]。认知异宿中枢是一种具有高维不稳定流形的亚稳态, 它在认知相空间中整合了不同的基本异宿网络。

语义中心在语义记忆中起着特殊的作用, 它以结构化的方式存储言语和非言语刺激的事实、概念和意义。语义大脑网络对这些信息进行编码, 并形成连贯的概念。实验工作提供了证据, 表明语义中枢在物理上位于前颞叶 [117]。将著名的思维术语重新定义为模式 [118], 我们可以说, 思维的过程和思维的产生是模式的连续动态的例子。思想不是静止的……它们在不断变化的动态系统中作为模式出现和消失 [119]。思想以一种低维的、连贯的模式出现在一个极其高维的系统中, 这个系统叫做人类, 与它的世界相连 [120]。

语义认知的控制需要执行控制和语义控制与表征系统之间的动态交互作用 [121,122]。由前额叶皮层执行的语义控制调节由前颞叶和表征语义记忆不同方面的模态特异性区域组成的动态表征系统。

特别是在像爵士乐队这样的社交网络中, 不同的模组由不同的音乐家代表。在乐队中, 爵士即兴创作的一个典型的时间过程包括: 当音乐家在独奏时, 乐队的其他成员在给他/她节奏上的支持。这种玩法在许多方面依赖于身体运动和感知动作循环 [20] 的反馈。过了一会儿, 另一个独奏者来到了前台, 而前一个人加入了节奏组, 以此类推。与古典室内乐不同的是, 独奏乐器的顺序和独奏片段的持续时间都没有严格规定; 相反, 动力是由音乐家自发的感觉控制的。异宿枢纽网络可以代表这种协作, 其中, 由不同音乐家的瞬时贡献参数化, 爵士乐队沿着异宿通道发展。协作由注意中枢网络和参与者之间的视听交互控制, 如图 2.7 所示。Norgaard 和合著者 [123] 假设音乐家在即兴演奏时通过在语义记忆中存储听觉和运动时空模式的结合 (连接) 来灵活地集中注意力。独奏者通过语义记忆模式的互动, 实际上是教师-学习者动态系统中的同步过程 (见, 例如, [124])。

根据模块之间耦合的强度, 两种结果都是可能的: 相互同步或混沌化 [91]。在这方面, [125] 对概念知识和认知控制对社会语义学模型中的作用进行了深入的讨论。在第 4.4 节中, 我们将讨论在爵士即兴创作的背景下多个音乐家之间的认知互动模型。

3 朝向认知活动的动态理论

3.1 不稳定性, 发散, 收敛和吸引子的全局方面。

意识的哲学和心理学维度有其根源, 尤其是与语言学相关的, 可以追溯到上世纪初。在 40 年代, Kenneth Craik 写了《解释的本质》[127]。在他的书中, 他首先为心理的概念奠定了基础, 他指出, 心理形成了现实的

模型, 并使用它们来预测未来类似的事件。Craink 是认知科学的先驱之一, 他的工作影响了许多关于心理建模的论文 (见例 [128]), 也影响了推理和心理逻辑的心理学理论的创立 [129,130]。

大约半个世纪后, 认知科学家伯纳德·巴尔斯 (Bernard Baars) 发表了他的开创性著作《意识的认知理论》(a cognitive theory of consciousness)[131]。这一理论的主要观点非常吸引人: 意识具有通过大脑全局工作区实现的整合功能。这在大脑中是有意义的, 因为大脑被认为是一组高度专业化的功能网络。Dehaene 及其合作者对全局工作空间理论 (GWT) 进行了推广 [132]。许多现代研究通过展示在认知任务执行过程中全脑功能网络的重组来支持 GWT 的假设 (例如, 见 [133])。这些现代研究结果表明, 当认知需求提高时, 网络模块化降低, 并据此预测行为表现。随着任务变得越来越苛刻, 连接器集线器的数量增加, 而省级集线器的数量减少。神经生理学家和生理学家正在构建全局神经元工作空间的详细地图, 并解决了许多大脑区域在意识的神经元工作空间模型中的作用。事实上, 目前大多数关于意识的理论都涉及到大脑中分布的大规模网络。GWT[134]、整合信息理论 [135] 或大脑神经能量学的整体理论 [136] 背后的主要观点都认为意识依赖于广泛的双侧大脑活动。就在最近, 一个新的意识维度出现了: 科学家, 包括数学家, 已经对心理过程的动态特征和建模感兴趣。[137] 试图赋予信息集成理论以抽象的数学形式, 为其引入时空连续描述, 并发展系统集成信息水平的测度。

大约一个世纪前, 俄罗斯科学家列夫·维果茨基 (Lev Vygotsky, 1925) 为意识下了定义, 认为意识是一种负责组织人类认知功能的积极过程 [138]。从那时起, 几位作者提出了不同的方法来理解意识、创造力及其与自传记忆的相互作用, 见例 [139-141]。在这些观点中, 意识涉及与知觉相结合的内在产生的心理过程。一般来说, 建立一个动态的意识和认知理论需要三个部分:

(i) 有必要利用所有有关情景记忆和语义记忆、工作记忆、默认和注意网络等关键全球大脑网络功能结构的信息, 以及它们通过脑中中枢 [35] 的相互作用。

(ii) 建立一个数学模型来表示这种层次大脑网络的顺序瞬态动力学。模型必须是: (a) 表现认知功能的信息内容的不变性, (b) 抗小噪声的鲁棒性, 以及在初始条件变化下的可重复性, (c) 对外部或内部信息信号敏感, (d) 反映了这样一个事实: 大脑中任何信息处理的特征都是有限的能力: 有限数量的单位 (模式), 这些模式有自己的时间间隔, 实际上可以被描述为一种额外的认知模式。

(iii) 分析不变模型中的层次异宿函数网络, 找出并表征统一记忆、注意、默认等异宿网络的枢纽 (见表 1)。

3.2 事件序列: 时间间隔, 工作记忆和意识动态

事件的组织和意识的时间安排的核心思想与顺序组织的可变性有关。重点在于有意识地感知、时间上延伸的现象 (如事件过程和序列的稳健性)。认知动态的时序离散性负责灵活性和稳定性之间的竞争平衡, 这是目标依赖思维生成和创造力的关键机制。最近的成像实验揭示了人类大脑的特定区域是如何构建负责时间记忆的网络的。特别是, 海马体在代表任意一系列项目或有意义的栩栩如生的事件的时间背景方面起着核心作用。一般来说, 海马体、后内侧网络和其他区域, 如前额叶皮层, 似乎在记忆的时间信息形成中发挥互补作用 [142]。在 [143] 中, 作者支持时间间隔分配工作记忆资源的假设, 工作记忆资源随着时间信息的数量在一个序列中变化。将间隔时间序列视为序列记忆的一种附加形式, 并通过绑定网络对其进行建模是合理的。对网状体节拍模型的概括表明, 多个时间间隔的记忆是如何用神经动力学来表示的, 也可以用来解释工作记忆中的资源分配机制 [144]。

4 创造力的动力

创造力就是把事物联系起来。当你问有创造力的人他们是如何做某事时，他们会感到有点内疚，因为他们并没有真正做过，他们只是看到了一些东西。过了一会儿，他们就明白了。这是因为他们能够将自己的经历联系起来，合成新的事物。【Steve Jobs】

4.1 动态隐喻是创造力的形式

这里我们考虑的是跳出界限，即隐喻的出现，新的动态。我们需要什么来建立一个简单的创造力数学模型？我们的目标是找到与信息过程的突然变化相对应的分歧，这些变化是由新思想和隐喻的自我生成引起的。有理由认为，动力系统的这些转变与新自由度的突然激活有关。这可以成为隐喻产生的一种方式。

一般来说，创造力的动态产生于三种认知模式的交互作用。这些是：(i) 头脑风暴和白日做梦模式（默认网络活动与之相关），(ii) 执行自传式记忆网络（当一个人需要将注意力集中在熟悉的目标上时被激活）和 (iii) 显著性网络：环境刺激的检测和执行网络与默认大脑网络之间的注意力切换 [145]。

语义记忆允许在创造力的过程中包含隐喻。隐喻是创造性结合过程中的一种时间形态。我们把两个不相关或间接联系的事物在时间上的联系过程称为动态隐喻。这种隐喻的存在是创造过程的一个重要特征。它可以产生强烈的图像，在思维和日常交流中有很大的效果，从而对许多意识过程产生强烈的影响。通常情况下，最后的信息隐喻图像看起来绝对不同寻常，并能吸引注意力（回想一下，比如莫里茨·埃舍尔 (Maurits Escher) 的图形，或者杰克逊·波洛克 (Jackson Pollock) 的画布)。动态隐喻是在以前不相关的模式之间建立的一种新的非普通连接。这对创造力和注意力控制至关重要。隐喻表达和隐喻思维过程的灵活性在 [146] 中得到了广泛的讨论。

功能磁共振成像 (fMRI) 研究显示，在创作诗歌、即兴音乐和素描等广泛的创造性或艺术任务中，大脑的活动是如何变化的。例如，在 [147] 中提出内侧颞叶可能是产生新想法的中心，创造性评估可能超越由执行脑区域支持的深思熟虑的分析过程，包括更多由默认和边缘区域支持的自发性评估过程。通过这种方式，创造性思维似乎招募了一种通常不协作的神经过程的独特配置 [145]。

从动态神经科学的角度研究音乐或诗歌创造力最大的挑战是什么？它不仅仅是音乐或诗歌：艺术创造力是一种难以捉摸的东西，一般来说是最难研究和塑造的课题之一。创造力涉及非常广泛的人类活动，而这些活动往往不能轻易地结合在一起。就其本质而言，艺术和创造力是缺乏真正可预测性的概念。因此，试图把他们限制在科学实验的限制范围内并不是一个自然的选择。富有创造力的人具有灵活多变的网络序列动态。我们相信，为产生意想不到的信息制定共同的动力学原理是可能的。我们在这里提供了一些结构化隐喻序列的例子。

莎士比亚无疑是隐喻方面的天才，他为主题创造了一个特殊的隐喻：记忆，大脑的看守（麦克白）。一个明亮的隐喻通常是一个非逻辑的和出乎意料的跳跃，从原始序列到另一个序列，可能会有随后的返回。20年前，Clevenger 和 Edwards 在 [148] 中提出利用语义空间中的距离来定量描述隐喻，并对表达性交际中的隐喻进行编码。隐喻实际上是一种多维（由多种形式组成的）信息通过其不同层次之间的交流而整合的工具，这对于诗歌、抒情音乐、歌曲和爵士乐语言来说都是非常典型的（加上分块：分割成更短的信息块）。

总的来说，上个世纪的音乐和诗歌语言具有以下特点：(1) 结合性，(2) 多重性（维度），(3) 编码性和 (4) 基于动态隐喻的每一种模式的模糊性。我们在这里只给出一个关于爵士乐表演的引文，以代表一个背景，在这个背景下，我们的动力学假设看起来会更吸引人。著名的爵士音乐家弗雷德·赫什用文字把他演奏的音乐想象成一个巨大的操场，有东西在上面跳来跳去，通常是用旋律运动的方式：东西这样上升，有东西这样下降平衡。他看到一大堆东西在移动：一串音符上蹦下跳，停了下来，扭动着。音乐周围有一种空间感；存在于太空

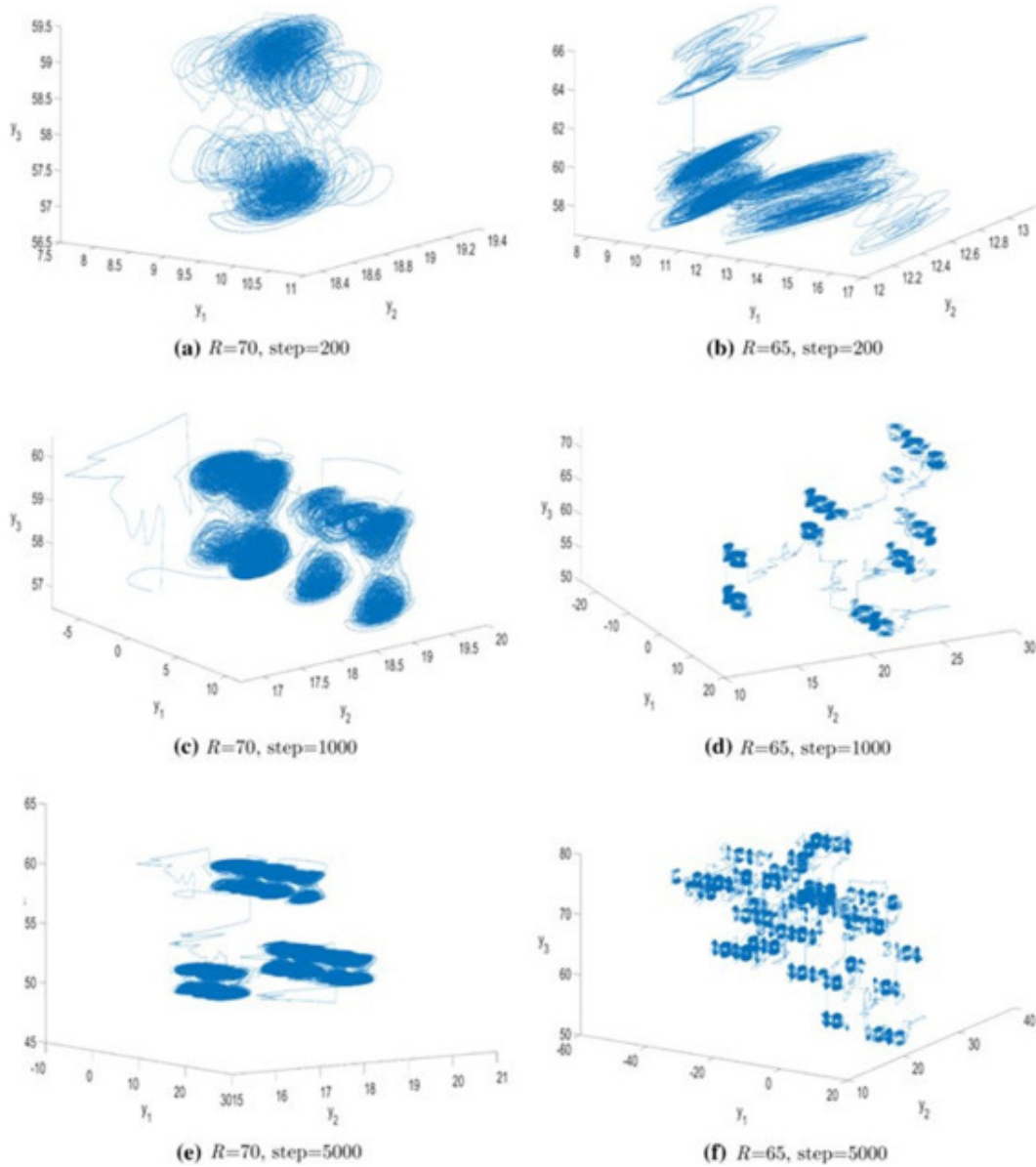


图 10: 在 $a = 7, b = 50, c = 3, d = 10, e = 5, f = 5, k = 1.5$ 处系统 (2.9) 的多方向扩展多滚动吸引子。来源: 经施普林格 Nature 许可, 改编自 [106]。

中, 这些移动的小东西。我喜欢这样直观地看待音乐。这种动态过程的描述强烈地提醒我们, 作为一种隐喻性的诗意文本, 低维动态系统具有复杂行为的相空间轨迹的行为, 特别是一种奇怪的吸引物的出现。语义创造性包括灵活性和独创性, 例如在反讽和隐喻中 [149,150], 在这些概念之间的联系是遥远的或似乎完全不相关的, 可能导致有意义的语言结构。因此, 具有语义创造性的人的语义网络可能与缺乏创造性的人不同, 在语义处理过程中允许更灵活和新颖的概念组合 (见 [151])。

创造性个体转移他们的精神焦点和在不同思维模式之间转换的能力是有记载的 [152]。这些转换和转换需要不同功能的大脑网络之间的动态互动, 比如 (在语言创造力的例子中) 小脑和任务控制网络之间的互动。Sun 和合作者还在 [152] 中揭示了语言创造力和参与自发思维、注意力和认知控制的大脑皮层网络的高度可变性之间的密切关系。精神病学家知道, 当他们的病人想象未来的事件时, 情景细节的数量取决于最初诱导的类型: 不关注情景检索的控制诱导产生的细节比情景特异性诱导少。Madore 等人表明, 情景特异性诱导增强了发散性创造性思维 [153,154]。

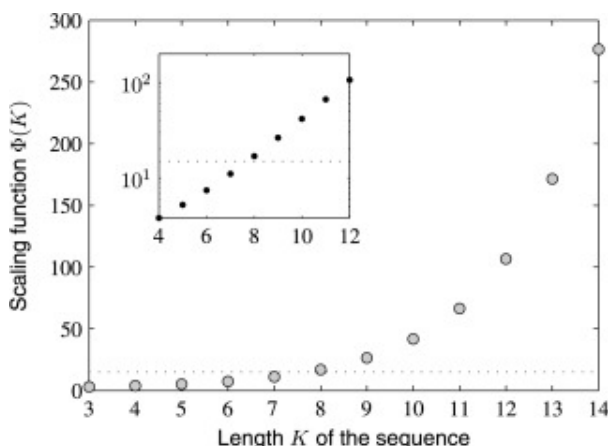


图 11: 序列记忆容量对网络抑制标准化程度的依赖 $\Phi(K) \sim \rho_{ij}/\rho_{ii}$ 。入口: 半对数坐标, 关于元素交换顺序的稳定指数边界。来源: 经 [48] 许可改编。

一种描述隐喻的理论方法是将其在我们的语境中与认知动力学的异宿轨迹联系起来。考虑一个特定的信息项目, 由一个高维不稳定流形的平衡鞍态 (这里的高可能已经从 2 开始) 建模。思维会从这个项目偏离哪个方向? 由于沿雅可比矩阵最大正特征值对应的特征向量上的扰动增长最快, 所以异宿通道中的大多数轨道在相空间中沿这个引导方向离开平衡, 因此, 瞄准同一特定的下一项 (另一个平衡的亚稳态)。这并不意味着到其他项/平衡的异宿路径不存在。然而, 转换到其他项目将非常罕见。不同项目之间异宿连接的树状网络允许大量可能的隐喻, 但在通常情况下, 这些连接中只有一小部分被激活。

我们在这里看到, 至少有两种可能的产生隐喻的机制。局部机制仅局限于一个平衡的邻域; 对于它, 只要相流性质的局部改变就足够了。灵感的作用 (例如生物化学上通过释放适当的药剂表现出来) 可以反映在亚稳态特征的变化上。特别是, 以前的主导方向可能会失去它的支配地位, 而以前的非一般性路径 (尽管存在) 可能会取代它的作用: 只要灵感状态保持不变, 异宿通道就会将思维引向另一个项目。对于这类隐喻序列, 不应该在功能认知相空间中创造新的异宿轨迹; 只有一些现有的未使用的反应堆应该以相对较低的能量成本被激活。一个更激烈 (可能更不常见) 的全球性程序确实会开辟新的、迄今还不存在的跨越相空间的途径, 改变其结构, 并将遥远的事物相互连接起来; 与本地行动相比, 这将需要更大的能量资源。

看起来，大诗人凭直觉掌握了打破语义记忆中事物之间联系的一般系统的艺术，从而产生令人惊讶的联想。我们可以从莎士比亚开始，回想起罗密欧在月光下走进阳台的著名隐喻。女性美与月亮之间的比喻已经过时，但这个比喻却有了不同的转折

那是东方，朱丽叶就是太阳。起来吧，美丽的太阳，杀死嫉妒的月亮，她已经病了，因为悲伤而苍白。

这远远超出了预期的标准比较：朱丽叶的美丽比月亮还美。或者，我们再举一个例子，保罗·魏尔伦的著名诗句《Il pleure dans mon coeur》，诗中诗人看着他的雨城。当然，一个大城市可以比作从一个原子到一个星系的任何事物，但最自然、最通用的联系可能是将一个地理项目与另一个地理项目联系起来。非泛型诗意，魏尔伦丢弃明显的地理关系（下雨的巴黎可能被如并列多雨的伦敦见查尔斯·狄更斯的双城记）支持不同的类别：下雨的巴黎与诗人的雨在哭泣的心。

4.2 振荡创造性模式的共振相互作用

Beaty 和他的合作者最近总结了研究网络互动认知机制的实验工作，以及评估与个人创造能力相关的网络动态的相关研究 [155]。在创造性表现中，有三个与网络互动相关的认知过程：目标导向的记忆检索、认知抑制（见第 1.3 节）和内部聚焦注意。使用预测模型的研究表明，网络之间的功能连通性，特别是执行控制网络和默认网络可以可靠地预测个体的创造性思维能力。

我们强调，仅仅了解大脑中不同网络的功能连接是不足以通过知觉描述意识表现及其对环境的依赖性的。为此，有必要了解大脑网络在外部信号作用下的动态活动：我们必须建立非自主认知动力学模型。在设计一个合理的动态的创造性活动模型时，需要满足以下条件

(i) 形态应该具有自由度的数量，允许它来执行自己的功能，如工作记忆检索和生成相应的信息项，使用自己的振荡不同步（1:1 同步所有三种形式的限制功能的多样性活动）

(ii) 模态之间的相位协调必须是满足不同脑节律之间共振关系的组合交互等非线性共振过程的结果（见下文）。

认知和神经科学研究的现有证据表明，正如我们所讨论的，一些创造性的认知模式，包括建设性记忆过程，建立新的表征，内部由注意力引导来支持积极的想象力，这一证据也证实了执行控制与目标导向记忆的实施有关，比如情景记忆（海马体 θ 波，4.8 Hz [156]）和注意（ α 节律 8-12 Hz [157]）。与默认网络、焦虑思维和活跃注意力（ β -节律，12-25 Hz [158]）一起工作，这些过程有助于创造性认知。事件相关的字母带已被证实出现在与发散思维相关的思维过程中的额叶和后皮层部位 [159,160]。在构建生成隐喻的动态模型时，使用这些信息是合理的。

每个形态的节奏带是由其自身的网络结构和内在的动态决定的。我们在这里考虑两个层次的模态网络，并假设每个模态的基本节律是基本网络之间抑制性相互作用的结果（见图 4.1）。

每种模式都是不同大脑网络相互作用的结果。在功能认知阶段空间中，这种相互作用表现为层次异宿网络。一个混沌吸引子可以出现在一个创造性的背景下的网络附近。层次结构的低层（在图 4.1 所示的圆圈内）具有若干基本异宿网络（基序），它们描述了基本信息项之间相互作用的动态。在不同的情况下，这些信息可能有不同的意义：一首诗的一个节，一个基本的爵士旋律块，一个基本的舞蹈编排，等等。

如前所述，有创造力的人能够移动他们的精神焦点，并在不同的思维模式之间改变，这将创造力与大脑网络之间的动态互动联系起来。作为一种评估创造力水平的方法，语义距离的定量测量已经被提出（见 [161]）。类似的研究补充了标准的主观测量，并提供了创造性产出的客观测量。它们还允许以一种更直接的方式解决语义记忆在创造力中的作用。

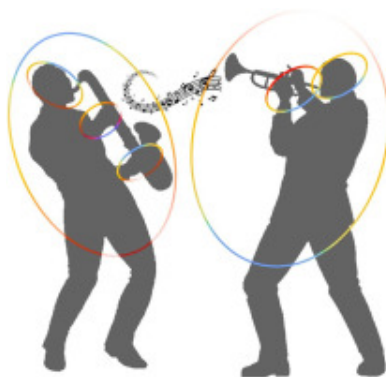


图 12: 在注意力控制下的爵士乐演奏中, 视听音乐和运动的互动表现。一组语义记忆模组代表乐队中不同独奏者的活动, 通过在这些语义记忆模组之间进行注意力的顺序转换来实现协同行动。异宿网络描述了这种类型的动力学。来源: 选自 [126]。

为了产生新奇的意想不到的联想, 认知应该能够洗牌和组合储存在记忆中的概念。内存的作用是双重的, 创新和保守: 它不仅创造性思维的供应信息, 而且偏见搜索过程的方向已知使用 [162], 使某一认知控制成为必要为了抑制 pre-potent 反应倾向 [163]。

在 [141,164] 中, 作者们讨论了功能磁共振成像研究的结果, 这些结果应该能够阐明哪些大脑过程有助于新想法的诞生。对大脑活动的测量和扫描后分析处理了三种任务: 产生物体的新的原始用途, 回忆物体的原始用途, 以及回忆常见的物体用途。新的和原始的想法产生激活模式, 让人回想起旧的想法: 激活双侧海马旁区域。这导致了一种猜想, 即新想法的构建建立在类似的过程之上, 就像从情景记忆中重建原始想法一样 [141]。与回忆相比, 产生新物体需要激活左侧边缘上回的聚焦簇。

我们今天的研究结果表明, 认知过程结合了两种基本的思维模式: 自动启发式模式和显性思维模式。根据 [165], 前者用于在明显的时间间隔内保持很大程度不变的信息, 而后者处理的信息与之前学习的模式明显不同。[165] 利用功能磁共振成像 (fMRI) 方法研究思想序列对大脑反应的影响, 揭示了支持显性思维模式的网络, 并为传统认知模式向新模式的转变服务。这些研究也证实了工作记忆在思维模式间快速转换能力的相关性。

隐喻产生的研究为理解人类如何产生新思想提供了新的途径。一些神经成像研究已经使用不同的方法来调查涉及不同类型的创造性认知的大脑区域, 如解决洞察力问题、创造性想法的产生 (即发散思维)、故事的产生和视觉问题的解决 (如见 [159,166 168])。聚焦于发散性思维的研究通常涉及要求个体对开放式问题产生新颖反应的方案。

4.3 Rabinovich Fabrikant 系统的混沌暂态动力学

诗人、画家和音乐家早就知道, 当他们参与某种混乱时, 创造力就会显现出来。尽管他们明确地解释了术语“混沌”的通俗意义, 但这种状态的高灵敏度和不可预测性意味着, 其适当的数学建模应该带来一种动态, 即现在所知确定性混沌。混沌作为一种动力学现象, 在相应的耗散动力系统的相空间中, 以轨迹的有界集合表示, 其特征是对初始条件的敏感依赖: 如果在这一集合的相邻轨迹上选择几个接近的初始条件, 它们之间的距离以时间的指数函数增长。这种敏感性排除了对个别轨迹的长期预测。在这个集合吸引所有邻域轨迹的情况下, 我们处理一个混沌吸引子。它的诞生是由于控制参数的变化而产生的较为简单的动力学形式, 通常可以

从分岔序列的分析中预测出来。将这种混乱称为可预测或可预期是很自然的。在我们看来，这种混乱只能代表创造性表现的一些特征。

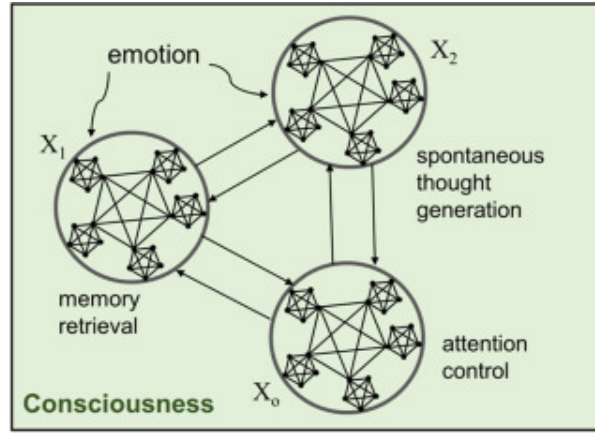


图 13: 说明抑制相互作用之间的基本振荡模式，结合认知资源，如注意，记忆和情绪。在模型方程中，这种模式被描述为变量 X_0 、 X_1 和 X_2 。所有的边都对应于抑制性连接。

考虑一个两层分层异宿网络 (见图 4.1)。如下所示，我们分析了慢包络变量 X_0 、 X_1 、 X_2 的动态，这些变量描述了网络层次上层的创造力过程。假设记忆检索网络、默认模式网络 (自发思维生成) 和注意修正网络中母题异宿振荡完全同步，可以得到这些变量的方程。

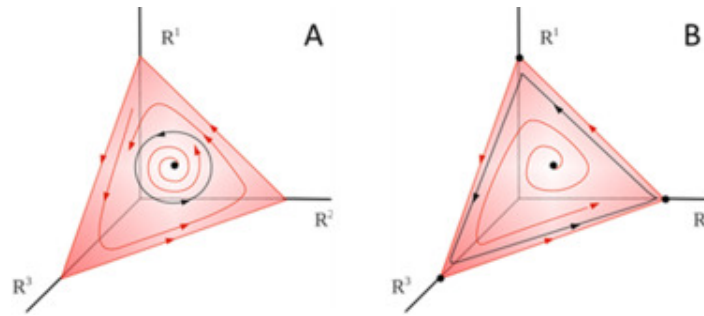


图 14: 由一个简单的母题所显示的节律性活动强烈依赖于参数: 面板 a 显示准谐振振动，而在面板 B 中，极限环靠近异宿线，因此振动是强烈的非等时振动。

在上述层次中，两个异宿三角形或基本母题 X_1 和 X_2 代表不同的认知模式活动:(i) 情景 (和语义) 记忆检索和 (ii) 自发思维动态 (明显反应抑制)。网络 X_0 代表控制模式 $X_{1,2}$ 的兴奋的注意动态。一般而言，该网络是一个具有三种信息输入的非自治动力系统: 例如，爵士乐旋律 $M_0(t)$ 是加工的主体或载体，即被异倚网络调制，情绪事件 $E_1(t)$ 比中性事件记忆更好 [169]，情绪控制 $E_2(t)$ 的产生思想 [170,171]。

我们假设异质斜三角形中每个母题的自治动力学由稳定边缘上的一个极限环表示，如图 4.2 所示。如果 $X_{1,2}$ 和 X_0 接近鞍聚焦稳态，这些模式以近似谐波的方式振荡 (图 4.2 中的面板 a)。

$$X_j(t) \approx A_j(t)e^{i(\omega_j t + \varphi_j)} \quad (4.1)$$

有一些频率是 $\omega_0, \omega_1, \omega_2$ 。由于鞍焦点是一个平衡的集体状态，所以它周围的小尺度振荡也是集体的：在每一个时刻，所有参与模式的振幅都有相当的顺序，它们都同时出现在动力学中。

然而，如果这样的周期接近 heteroclinic 轮廓，主题振荡将强烈 nonisochronous：长时期整个社区的慢动作鞍平衡的角落相间相对速度运动沿着段连接平衡（面板 B 在图 4.2）。与面板 A 的集体振动相比，这里的动力学是连续的：在接近马鞍平衡的交替长通道中，通常只有一个模态具有显著的振幅，而其他模态都受到强阻尼的影响。

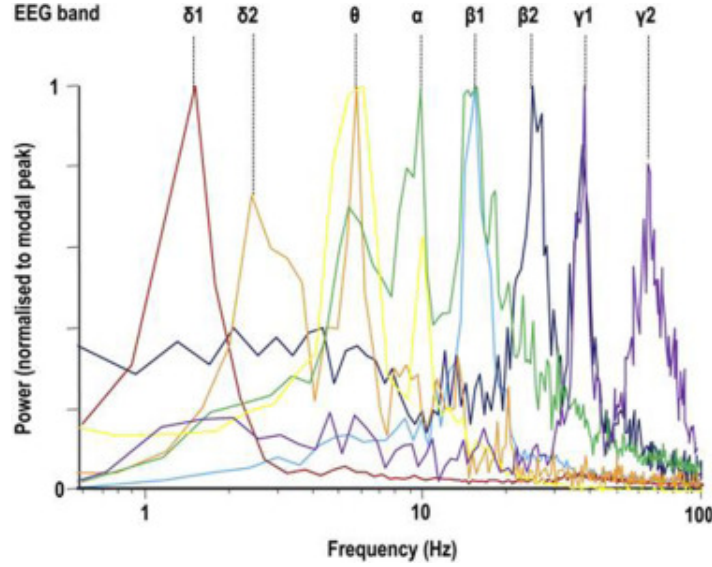


图 15: 在体外新皮层局部电路中产生的持续节律的多模态峰值频率。来源: 经 [172] 许可改编。

在非线性相互作用过程中，当 $X_{1,2}$ 的自主振荡减弱时， X_0 的振荡以能量支持它们。这三种模式之间的能量交换必须是相互的。这发生在共振附近（所谓的调制不稳定性）。

$$2\omega_0 = \omega_1 + \omega_2 + \Delta_\omega \quad (4.2)$$

其中 Δ_ω 表示三个频率的确切共振条件的失谐。这一机制可以解释不同脑节律之间的协调。在此背景下，体外实验显示了一个重要的现象：新皮层的自主部分能够产生广泛的协调脑节律（见图 4.3）。

复杂 Ginzburg-Landau (CGL) 方程已被用于模拟皮层动力学，包括神经元雪崩及其与脑节律的关系 [173-175]。让我们在 CGL 模型的框架下考虑三种抑制性振荡认知模式的描述

$$\begin{aligned} \dot{X}_0 &= 2\sigma X_1 X_2 X_0^* e^{-i\Delta_\omega t} + \gamma X_0 + i\alpha X_0 \left(|X_0|^2 + 2|X_1|^2 + 2|X_2|^2 \right) \\ \dot{X}_{1,2} &= \sigma X_{2,1}^* X_0^2 e^{i\Delta_\omega t} - v_{1,2} X_{1,2} + i\alpha X_{1,2} \left(2|X_0|^2 + |X_{1,2}|^2 + 2|X_{2,1}|^2 \right) \end{aligned} \quad (4.3)$$

接下来，为简单起见，我们假设阻尼系数 $v_{1,2}$ 重合： $v_{1,2} = v$ 。在这种情况下

$$\frac{d}{dt} \left(|X_1|^2 - |X_2|^2 \right) = -2v \left(|X_1|^2 - |X_2|^2 \right) \quad (4.4)$$

因此，耗散模态的强度，在时间的过程中，实际上相等。然后，经过适当的缩放（详情见 [176]），我们获得了

新的缩放变量 $x(t)$ $y(t)$ 和 $z(t)$ 三维 Rabinovich Fabrikant (RF) 模型:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= y(z - 1 + x^2) + \gamma x \\ \dot{y} &= x(3z + 1 - x^2) + \gamma y \\ \dot{z} &= -2z(v + xy)\end{aligned}\quad (4.5)$$

其中

$$\begin{aligned}x &= \left(4 \left| \frac{\alpha}{\Delta\omega} X_0 \right|^2\right)^{1/2} \cos \Phi \\ y &= \left(4 \left| \frac{\alpha}{\Delta\omega} X_0 \right|^2\right)^{1/2} \sin \Phi \\ z &= 2 \left| \frac{\alpha}{\Delta\omega} X_1 \right|^2 \\ 2\Phi &= \left(\Delta\omega t + 2 \arg \frac{X_0}{X_1}\right) \text{sign } \alpha\end{aligned}\quad (4.6)$$

创造力有不同的数学形象, 这取决于创造力目标的性质。我们可以将至少两种类型的创造力区分开来:(i) 过程的出现, 即一种新的动态类型, 它具有无限长持续时间的特征, 可以作为一个时间过程被回忆: 音乐、诗歌、舞蹈等; (ii) 通过一种新的复杂的、短暂的、顺序的信息模式的出现, 比如前面提到的波洛克的油画和埃舍尔的建筑图像, 或者不寻常的烹饪菜肴。第一类创造力的例子如图 4.4 所示: 这是一个奇怪的吸引物。第二种创造力的形象是一种新的稳定信息模式, 即一种稳定的稳定状态。这种信息模式的复杂性取决于终止于相应稳定状态的瞬态序列的长度 (见下面的等式)。(4.9)(4.10) 和 [177])。RF 模型展示了两种类型的创意图像 (见图 4.5)。

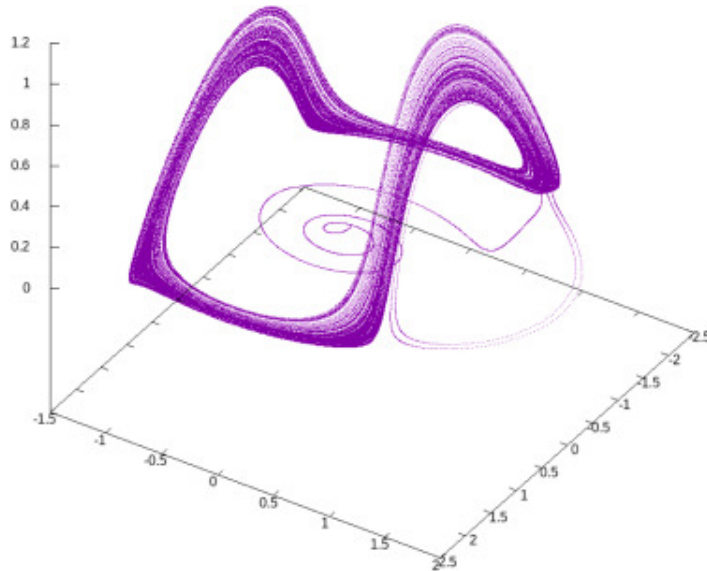


图 16: 参数值 $\gamma = 0.1$ 和 $v = 0.2715$ 处的 Rabinovich Fabrikant 吸引子。

方程组 (4.5) 说明了具有模的共振相互作用的系统中混沌集的出现 [176, 178]。由于相空间的多稳定性和瞬态混沌现象, 该模型中由于参数变化而产生的混沌难以预测。在创造性的背景下, 应该提到的是, 当轨道

在这个特殊的混沌吸引器上游荡时产生的信号被映射到鼓声和打击乐上，就产生了一种独特的“分形”音乐 (<https://www.youtube.com/watch?v=kh6ZLvpWr5k>)。该系统具有三阶非线性，除显示不同形状的混沌集、隐藏的混沌吸引子和隐藏的暂态混沌轨道外，还显示“虚鞍” [178-180]，如图 4.4 所示。

像许多其他复杂的动力系统一样，认知活动的模型通常具有多重稳定性 (见例 [181]): 共存的吸引物。在这种情况下，末态的选择取决于初始条件，并且末态通常对系统参数的噪声和波动非常敏感。最近的研究将多稳定性与不可预测的混沌瞬态和所谓的隐藏吸引子联系起来 [179,180]。要了解这类系统的全局动力学，必须识别可能的瞬态混沌集、吸引子及其盆地。隐藏吸引子的数值定位通常是困难的，因为它们不是通过透明的分岔路径从简单的平衡状态演化而来。

4.4 连续的创造力动态和情感

人们普遍认为，情绪可以被定义为支持和适应我们思考和行为方式的事件的反应 [182]。情绪包括许多组成部分，如对事件的认知评估、运动表达、感受自己和他人。积极情绪 (喜悦、满足、骄傲) 会在创意产生过程中增强创造力，并增加概念组合的灵活性，而消极情绪会降低创意过程中可用信息的灵活性和产生新创意的机会 [183]。

让我们回到爵士独奏者合作的例子，并考虑一个六独奏者活动的模型。这组独奏者的协作创造力是通过他们在音乐会中连续的演奏转换来实现的 (见图 4.6)。

在 [184] 中已经分析了自发音乐表演背后的神经基质。本研究采用功能磁共振成像 (fMRI) 技术，研究专业爵士钢琴演奏家在特制键盘上的即兴演奏。在即兴创作过程中，整体的活动空间模式被发现是不连贯的: 内侧前额叶皮质的病灶激活与外侧眶区以及前额叶后部的失活并存。这种分散的模式显然是自发即兴表演所固有的，在 [184] 中被解释为在对表演缺乏有意识控制的情况下，发展出内部激励的独立刺激行为。

为了说明关于不同想法的自发混乱游戏的主要观点，我们在这里没有考虑到创造性过程的另一个方面: 情感动力学。通常所有的爵士乐手都配合独奏者演奏。我们忽略了这一复杂性，因为我们认为它在使相应的动态模型复杂化的同时，对我们的创造力模型贡献很小。因此，我们省略了玩家之间的直接联系。

在经典方程 (2.3) 的基础上，可以将依赖于注意控制网络的创造力变量 x_i^m 的适当简化模型写成如下形式

$$\tau_i^m \frac{dx_i^m}{dt} = x_i^m \left[\sigma_i^m (R^m, S^m, C^m) - \sum_{j=1}^{K^m} \rho_{ij}^m x_j^m \right] \quad (4.7)$$

这里 τ^m 描述了思想之间转换的时间尺度， S 是感官输入的向量， $\sigma_i^m(\dots) \geq 0$ ， $\rho_{ij}^m \geq 0$ 是 m 第一个独奏者使用的竞争思想之间的连接矩阵。模型的数值模拟结果如图所示，4.7 and 4.8。Fig. 4.7 presents the time series corresponding to an independent soloist improvisation. For simplicity, four creativity ideas out of six are plotted. Fig. 4.8 corresponds to the same player interacting with the other musicians as a band. To characterize quantitatively the value of the information generated by the creativity process, we calculated the Lyapunov dimension for each network using the Kaplan-Yorke formula:

$$D_{KY} = j + \sum_{k=1}^j \frac{\lambda_k}{|\lambda_{j+1}|} \quad (4.8)$$

其中 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ 为李雅普诺夫特征指数， j 为 $\lambda_1 + \dots + \lambda_j$ 为正数的最大整数。

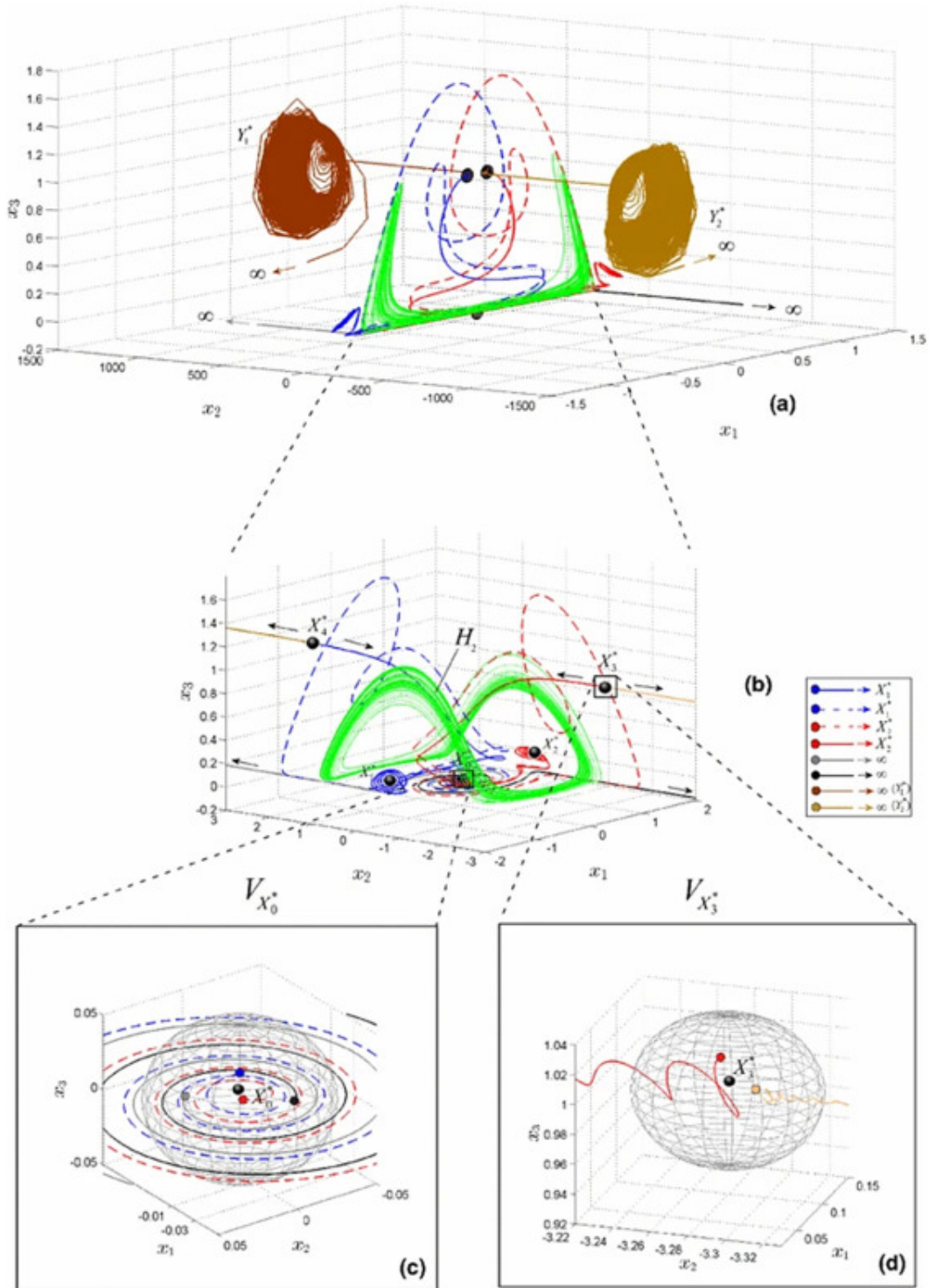


图 17: 一个隐藏的混沌吸引子的例子。(a,b) 这个隐藏的吸引子在这里用绿色表示, 它的轨迹发散到无穷远, 其他的轨迹被稳定平衡吸引。(c,d) 从不同附近开始的其他轨迹的图解。来源: 经施普林格 Nature 许可, 改编自 [179]。

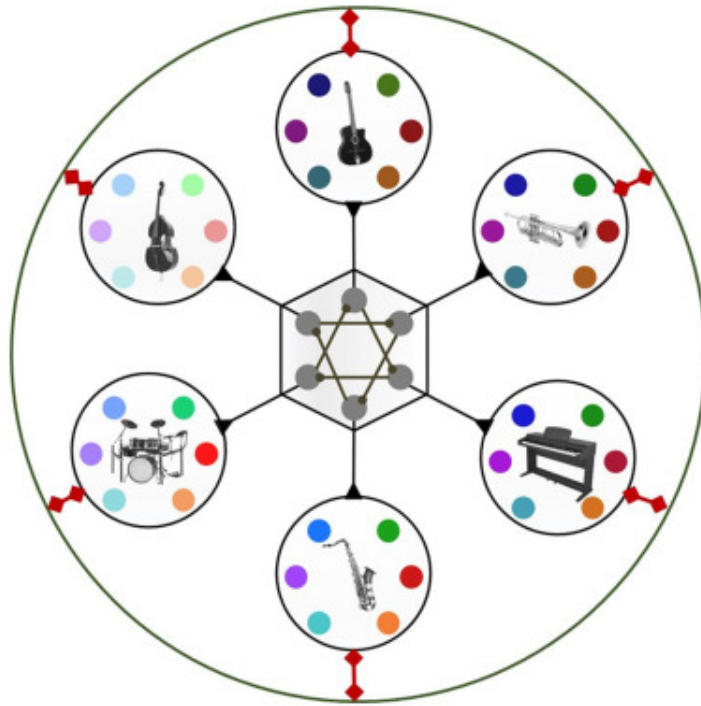


图 18: 一组独奏者 (六边形网络) 的协同创造力是通过他们之间的顺序切换 (圆圈) 来实现的。在这个模型中, 独奏者控制了创造性想法的序列在初始状态下的需求, 在一个群体内的其他。这样的动力使独奏者的创造力最大化。独奏者之间的共同互动利用对方的注意资源和他们的听觉和视觉信息 (红色箭头), 并在创造过程中构建他们的共同目标, 也见图 2.7。

4.5 惊喜和不稳定

当我们听到一首好诗并开始思考它时，就像在现实生活中一样，我们面对的是一系列不可预知的认知事件，这与对非创造性内容的认知是截然不同的。阅读或背诵一首诗是一个连续的动态过程，最初是不可预测的。解释不确定性可以用 Kolmogorov Sinai 熵或信息维来表征。上述动态范式在诗歌创作过程中的应用，实际上是一个众所周知的观点的发展，即诗歌的创作是围绕最初主题的语义结构的连续变化。诗人约瑟夫·布罗德斯基 (Joseph Brodsky) 在诺贝尔奖演讲中特别指出，一个人之所以写诗，是因为语言提示或直接指示了下一行。诗的开头，诗人通常不知道诗的结局，有时他会对结局感到惊讶，因为结局往往比他预想的要好，他的思想往往比他预想的要深入。这就是语言的未来入侵它的现在的时刻。有三种思维模式：分析的，直觉的，以及圣经先知所熟知的模式（在我们的理解中是不稳定的），参与诗歌创作的动态过程；这些模式必须受到约束。作为语义不可预测性的一个例子，我们在这里引用托马斯·艾略特的著名诗歌中的两节：

*I have seen them riding seaward on the waves
Combing the white hair of the waves blown
back
When the wind blows the water white and black.
We have lingered in the chambers of
the sea
By sea-girls wreathed with seaweed red and brown
Till human voices wake us, and we
drown.* (T. Eliot, 1920, The Love Song of Alfred Prufrock)

这首诗的流畅是什么意思？我们可以想象出几个不同的、富有诗意的分支，它们可以很好地以不同的方式延续任何一行。这说明了诗歌创作过程的可变性和不可预测性。尤其让读者惊讶的是这首诗的结尾。这是否适用于数学建模

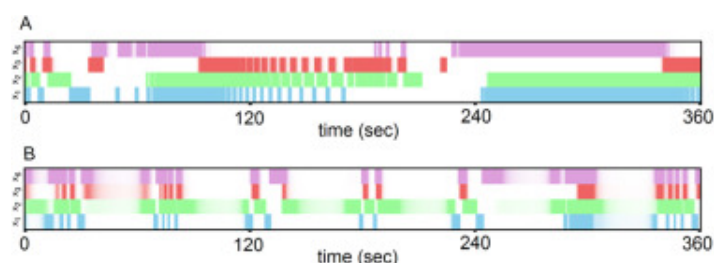


图 19: 用异宿网络模拟独奏者的即兴表演。A: 爵士演奏者独立演奏 ($DKY = 4.05$)。B: 同一演奏者的活动在注意网络调制下依次与乐队中的其他演奏者交换；在本例中， $DKY = 6.01$ 。不同的颜色代表不同的创造力对应的时间模式。来源: 经 [50] 许可改编。

我们所建立的规范模型适用于描述诗歌创作的认知动态。该模型的典型解决方案是一系列亚稳态，这些亚稳态代表了在写作过程中通过语义网络模式之间的关联而产生的新概念或图像。这意味着，在我们的模型中，诗歌创作的过程在模型的相空间中通过一个单向的亚稳态链来表示（也见图 1.2A）。一个亚稳态通过结构类比、语义相似、多义词等触发到下一个亚稳态。在某些步骤上，亚稳态链变得不稳定，系统跳转到主树的另一个分支，在语义网络的新模式之间随机选择。这种不确定性是创造力过程的数学表征所固有的。在上述模型的框架下，我们可以分析以序列块形式出现的信息结构化对分层创造过程稳定性的影响。创造性认知能力与静息状态脑功能网络的动态重组有关。在此背景下，fMRI 大数据分析建立了休息状态下大脑皮层和小脑区域创造力与时间变异性的关系。从一种网络状态过渡到另一种网络状态的随机假设支持了可变性和创造力之间的联系 [152]。

4.6 认知信息流维度

意识和创造力最具建设性的特征之一是大脑信息整合过程 [185]。它是通过大脑的绑定机制来实现的。束缚是一种非线性的动力学现象，它在空间和时间上瞬时地，即依次地，将不同形式的流动所携带的信息统一起来。我们称之为意识信息流 (CIF)。

在功能认知相空间中，流的绑定动力学是由亚稳态和多维不稳定流形枢纽构成的绑定异宿网络附近的相轨迹来表示的。这些轨迹可视为多维 CIF 的要素。这种信道所代表的瞬态动力学是稳健的和可再现的。

为了定量地描述 CIF 的复杂性，让我们引入一个新的函数，我们称之为本地信息流维

$$D_{\text{IF}}(L) = \sum_j^L \Delta D_{\text{IF}}(I) \quad (4.9)$$

其中

$$\Delta D_{\text{IF}}(I) = J_l + \sum_{j=1}^{J_l} \frac{\lambda_j^l}{|\lambda_j^l|} \quad (4.10)$$

这里 L 是系统在 t_L 之前访问的亚稳态(鞍)的总数, l 是沿着通道的鞍的索引, λ_j^l 是鞍 l 处的有序 ($\lambda_1^l \geq \dots \geq \lambda_{n^l}^l$) 特征 Lyapunov 指数, 而整数 J_l 是由条件定义的

$$\sum_{j=1}^{J_l} \lambda_j^l > 0, \quad \sum_{j=1}^{J_{l+1}} \lambda_j^l < 0 \quad (4.11)$$

当沿异宿通道的所有鞍座的不稳定流形是一维时

$$D_{\text{IF}}(L) = \sum_l^L \left(1 + \frac{1}{v_l} \right) \quad (4.12)$$

其中 v_l 是鞍值 (2.7) 的鞍值 l 。在这种情况下, 所有 $J_l = 1$, 而正的李雅普诺夫指数与负的比值就是 $1/v_l$ (回想一下, 对于通道稳定性, 通道中所有鞍值的乘积必须大于 1)。

我们以异宿结合问题为例说明 D_{IF} 在定量描述中的作用。在异宿骨架中, 如表 1 第二行所示, 沿“绑定异宿通道”的每个鞍座都有一个二维不稳定流形。这意味着所有 l 的 $J_l = 2$ 。因此, 上述对 D_{IF} 的估计表明, 绑定通道的流动能力至少是三个独立通道的 D_{IF} 的两倍。这一结果可以用以下方式解释: 信息流动能力表征了异宿通道网络中轨迹的复杂程度。我们可以假设, 这种复杂性支持快速和通用的机制编码的信息有关的主题。把函数 D_{IF} 和 Shannon 信息和混沌集的容量维数见 [186]。我们相信, 在不久的将来, 这将得到评估。

5 结论与展望

在这里, 我们认为意识是大脑中一种短暂的多模态时空过程。这一过程是许多具有特殊功能的全球大脑网络综合活动的结果, 这些网络代表不同的认知模式, 如自传记忆、注意力、思维生成、感觉知觉等。在数学上, 这种瞬态动力学可以用功能认知相空间中的异宿轨迹网络来表示。意识生命的图像是一个动态模型的阶段肖像, 它模仿了大脑的活动。

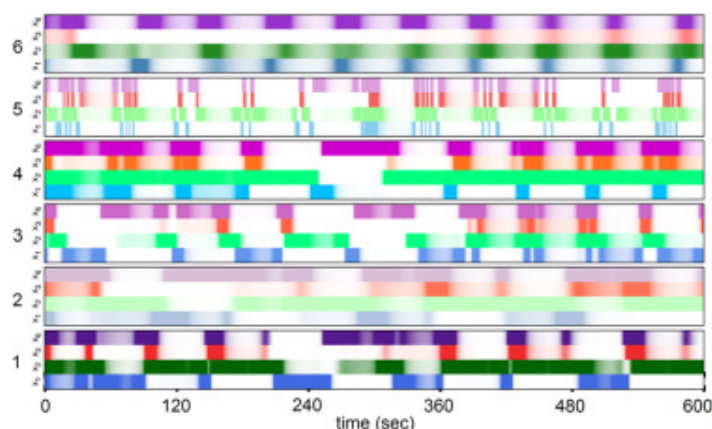


图 20: 对图 4.6 所示的乐队成员之间的互动模型所产生的顺序模式中创造力的分析。乐队的每个成员用他/她自己之前即兴创作的顺序的记忆。来源: 经 [50] 许可改编。

5.1 有意识的动态计时-多峰性绑定-同步和夹带

正如我们已经讨论过的，意识是一个稳健的有序过程；它的目的是认识现在，预测未来。这个短暂的整合过程是基于几种认知模式的。其中最关键的是：包括情景记忆和语义记忆在内的自传体记忆、注意力控制和思想产生的自我意识。所有这些模态本身都是时间局部的事件序列。我们在单模态（工作记忆）的例子中讨论的鲁棒检索是指序列中项目顺序的再现性。这种健壮性是可能的，只要序列足够短 [48]。

我们可以合理地假设，认知多模态序列的鲁棒性是由绑定序列的稳定性决定的。这类问题的细节与一个模态是时间间隔的序列这一事实有关。这种形态通常被隐喻地称为我们思想或意识的潮起潮落 [187]。由于事件块的时间组织通常是非均匀的，因此有必要分析时间间隔的动态控制。在最简单的情况下可以是相互同步，或者在多模态情况下更有效的是夹带。

不同节奏的爵士即兴创作和不同节奏的诗歌朗诵是记忆提取的著名例子，在邻近的认知和行为事件之间的时间间隔可以灵活变化。与间隔的有节奏的定时方法相反，当块持续时间与块之间的间隔的比率不依赖于当地时间 [1,188] 时，用事件之间的可变时间间隔来描述意识活动更加复杂，需要新的方法。一个有趣的例子是多模态协调模式之间的切换和它们之间的同步，这在多模态协调行为动力学中被观察到 [189]。

5.2 连续间隔时间的情绪和注意调节

我们在音乐会上听到的声音似乎是由到达我们耳朵的声音决定的。然而，这也取决于我们对以前听到的声音的记忆。

事实上，我们感受到的是一种多模式的混合，原始的音乐安排与当前的表现。例如，其中一种形式可以是爵士的即兴演奏与连续的间隔计时。原则上，听者可以通过与工作记忆密切相关的情绪和注意力来控制当前的时间表现 [190]。类似的陈述是指情感。相关的神经心理学机制是已知的：实验证明，当杏仁核与海马体和前额叶皮层连接时，即当它们形成一个联合网络时，它们在检索情绪体验事件中起着关键作用 [191,192]。法约尔和他的合著者 [193] 还表明，恐惧的情绪会加速人体的生物钟。现在人们很清楚，生物钟是由注意力和觉醒调节的。对节律性外部信号（起搏）的初步调整也在定时间隔的设置中发挥作用 [194]。一个动态模型可以帮助解决这样一个假设：观察情绪面部表情会通过交互作用扭曲主观时间感知，例如负责面部表情处理的神经网络

与参与时间的大脑网络的交互作用 [195]。一般来说，这种网络的相互动力学可以是准周期的或混沌的，参见 [52]。

5.3 socio-brain。：大脑间的时间协调

关于意识动力学时间的挑战性问题显然必须为社会认知网络的情况制定。某些社会团体，如管弦乐队和运动队，参与的活动需要参与者之间高度的时间协调。要想在这些活动中取得成功（古典合奏音乐，同步游泳），团队成员之间的时间安排得相当紧凑；在其他情况下（爵士乐队、自行车和赛艇队），尽管个人的步伐有一定的自由，但作为一个整体，还是会受到时间的限制。集团内部的调整是如何实施的

可以理解，为了群体行动的成功，参与个体大脑内相关过程的时间尺度应该调整到群体成员之间互动的特征时间。社会形态影响时间感知，因此主观时间间隔的持续时间会发生改变，进而改变同步或不同步的感觉。[196] 的作者认为，这些相互作用的核心是一个内部时钟，包括代表时间信息的皮层下协调振荡，如时间和节奏，以及将时间信息与内部和外部经验联系起来的岛状投影。社会刺激相对于非社会刺激的时机改变了相应网络中的互联性。总之，这些相互的途径可能使时间和社会计算的交换和各自的调制成为可能。我们认为，对社会群体中时间绑定动态的分析是一个有前途的方向。

5.4 从神经科学到机器人，人工智能和生物医学应用

本文描述的形式主义在神经科学研究之外有应用。经典的机器人范例通常使用基于规则的决策，这几乎没有留给创造力的空间，或者只允许编程的创造力。将行为视为一系列稳健的连续交互的观点提供了使用所描述的模型的机会，以便将认知交互的表示引入机器人和人工智能领域。先前的研究表明，无赢家竞争和异宿室网络可用于机器人、机器人人机交互或自主人工智能体研究 [197-201]，也包括机器学习领域 [96]。

今天，我们正在见证以人为中心的社会范式的转变，朝着人工认知代理更多地参与我们的日常生活的方向发展。人类与机器人之间的协作场景越来越频繁，并将对我们的日常生活产生更深层次的影响。人与机器人之间的相互作用是几个具体问题的来源，这些问题与合作者之间的信息交换质量在时间上不断变化（瞬变）有关。在这种情况下，主要的问题是：我们能否相信机器人的信息能够使用它，反之亦然？这个问题的在线决策需要根据情景记忆和语义记忆中保存的信息对当前的情况进行仔细的评估。这样的活动是有意识的机器人日常问题的一个例子。

现在有意识的机器人认知需要记忆信息的整合包括语言和传感器/运动的整合。事实上，我们以上所有的讨论都是基于这样一种观点，即意识是来自大脑内外的时空信息模式的综合动态。用相同的建模方法序列异倚动力学来描述和发展机器人的意识，以组织有感知的机器人和人类之间的协作，看起来是非常自然的。

这种协作的一个主要挑战是语言和表示的感觉运动经验的自动关联，通常被称为语义差距问题。所讨论的异宿普遍性可以作为解决这一问题的有效工具，因为它允许分层的序列结合和协调。

现代神经科学为语义记忆的结构提供了新的证据，并指出语义信息是多感觉、多模态和分布的。在动态语言中，这意味着机器人认知中的绑定过程必须是多模态的，并且在时间上是深度锚定的。

时间协调显然对人类机器人协作过程的效率起着重要作用。上述异宿同步现象为联合人机器人的思维时间协调与控制提供了一种可能的机制。

与创造力神经过程相关的鲁棒序列的描述以及相应的动力学和分支的识别也可以在生物医学研究和临床应用带来新的方法 [52,54,202]。静息状态和刺激诱导的认知神经活动的动态特性已被建议用于设计新的脑疾病生物标志物 [18,203,204]。最近，序列脑动力学的特征也被提出用于分析在不同研究和生物医学应用中使

用节律性刺激的技术，如稳态视觉诱发电位和颅内刺激 [205]。所有这些工作都指出了本文所讨论的理论框架和模型的必要性和潜在的广泛影响。

正如我们上面讨论的，自然使用普遍的动态原则，如及物性、鲁棒性和资源最小化来实现许多认知功能：感知、强化记忆、决策、创造力和意识。对物理学家、数学家、精神病学家、神经生理学家、计算机科学家和医学医生来说，理解和预测人类大脑的瞬态信息过程及其动态图像具有挑战性和吸引力。今天，这些科学问题也在人工智能和机器人的背景下得到了解决。当然，在一篇综述的框架内解决大量的问题是不可能的，我们在这里提供的材料只是冰山一角。我们相信，诸如社会人类机器人群体的非线性动力学、大脑与人工智能在决策中的合作、以及共同创造一个平衡的未来等主题，将是未来许多新努力的主题。

6 竞争利益声明

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

7 致谢

This paper is dedicated to the memory of Valentin Afraimovich, with whom we discussed its main core. We thank Chris Bick for his insightful comments on this manuscript. Our research has been supported by ONR, USA grants N00014310205, and N00014-13-1-0678 (MR), Russian Science Foundation Project No. 17-12-01534 and DFG grant ZA658-3/1 (MAZ), and AEI/FEDER, Spain PGC2018-095895-B-I00 (PV).

8 参考文献

[1] M.I. Rabinovich, P. Varona, I. Tristan, V.S. Afraimovich, Chunking dynamics: Heteroclinics in mind, *Front. Comput. Neurosci.* 8 (2014) 22, <http://dx.doi.org/10.3389/fncom.2014.00022>.

[2] O. Sporns, *Discovering the Human Connectome*, The MIT Press, Cambridge, MA, 2012.

[3] K. Friston, The variational principles of cognition, in: I.S. Aranson, A. Pikovsky, N.F. Rulkov, L.S. Tsimring (Eds.), *Adv. Dyn. Patterns, Cogn. Challenges Complex*, Springer International Publishing, Cham, 2017, pp. 189–211, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-53673-6_12.

[4] R.G. Bettinardi, G. Deco, V.M. Karlaftis, T.J. Van Hatervelt, H.M. Fernandes, Z. Kourtzi, M.L. Kringelbach, G. Zamora-López, How structure sculpts function: Unveiling the contribution of anatomical connectivity to the brain's spontaneous correlation structure, *Chaos* 27 (2017) 47409, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4980099>.

[5] A. Avena-Koenigsberger, B. Misic, O. Sporns, Communication dynamics in complex brain networks, *Nat. Rev. Neurosci.* 19 (2017) 17–33, <http://dx.doi.org/10.1038/nrn.2017.149>.

[6] M. Gilson, G. Deco, K.J. Friston, P. Hagmann, D. Mantini, V. Betti, G.L. Romani, M. Corbetta, Effective connectivity inferred from fMRI transition dynamics during movie viewing points to a balanced reconfiguration of cortical interactions, *Neuroimage* 180 (2018) 534–546, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.09.061>.

[7] P. DonnellyKehoe, V.M. Saenger, N. Lisofsky, S. Kühn, M.L. Kringelbach, J. Schwarzbach, U. Lindenberger, G. Deco, Reliable local dynamics in the brain across sessions are revealed by wholebrain modeling of resting state activity, *Hum. Brain Mapp.* (2019) <http://dx.doi.org/10.1002/hbm.24572>.

[8] S. Dehaene, J.P. Changeux, A hierarchical neuronal network for planning behavior, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 94 (1997) 13293–13298, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.94.24.13293>.

[9] A. Irajy, Z. Fu, E. Damaraju, T.P. DeRamus, N. Lewis, J.R. Bustillo, R.K. Lenroot, A. Belger, J.M. Ford, S. McEwen, D.H. Mathalon, B.A. Mueller, G.D. Pearlson, S.G. Potkin, A. Preda, J.A. Turner, J.G. Vaidya, T.G.M. van Erp, V.D. Calhoun, Spatial dynamics within and between brain functional domains: A hierarchical approach to study time-varying brain function, *Hum. Brain Mapp.* 40 (2019) 1969–1986, <http://dx.doi.org/10.1002/hbm.24505>.

[10] K. Friston, Hierarchical models in the brain, *PLoS Comput. Biol.* 4 (2008) e1000211, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000211>.

[11] H.-J. Park, K. Friston, Structural and functional brain networks: from connections to cognition, *Science* 342 (2013) 1238411, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1238411>.

[12] D. Vidaurre, S.M. Smith, M.W. Woolrich, Brain network dynamics are hierarchically organized in time, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 114 (2017) 12827–12832, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1705120114>.

[13] J.A.S. Kelso, B. Tuller, Toward a theory of apractic syndromes, *Brain Lang.* 12 (1981) 224–245, [http://dx.doi.org/10.1016/0093-934X\(81\)90016-X](http://dx.doi.org/10.1016/0093-934X(81)90016-X).

[14] J.P. Changeux, Climbing brain levels of Organisation from Genes to Consciousness, *Trends Cogn. Sci.* (2017) 168–181, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2017.01.004>.

[15] M.I. Rabinovich, A.N. Simmons, P. Varona, Dynamical bridge between brain and main, *Trends Cogn. Sci.* 19 (2015) 453–461, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2015.06.005>.

[16] J.A.S. Kelso, S.L. Bressler, S. Buchanan, G.C. DeGuzman, M. Ding, A. Fuchs, T. Holroyd, A phase transition in human brain and behavior, *Phys. Lett. A* 169 (1992) 134–144, [http://dx.doi.org/10.1016/0375-9601\(92\)90583-8](http://dx.doi.org/10.1016/0375-9601(92)90583-8).

[17] W.R. Shirer, S. Ryali, E. Rykhlevskaia, V. Menon, M.D. Greicius, Decoding subject-driven cognitive

states with Whole-Brain connectivity patterns, *Cereb. Cortex.* 22 (2011) 158 165, <http://dx.doi.org/10.1093/cercor/bhr099>

[18] J.A. Roberts, L.L. Gollo, R.G. Abeysuriya, G. Roberts, P.B. Mitchell, M.W. Woolrich, M. Breakspear, Metastable brain waves, *Nature Commun.* 10 (2019) 1056, <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-08999-0>.

[19] J.J. Gibson, *The Ecological Approach to Visual Perception*, Psychology Press, 2014.

[20] R.W. Gibbs Jr., *Embodiment and Cognitive Science*, Cambridge University Press, 2005.

[21] M.I. Rabinovich, R. Huerta, P. Varona, V.S. Afraimovich, Transient cognitive dynamics, metastability, and decision making, *PLoS Comput. Biol.* 4 (2008) e1000072, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000072>.

[22] S.L. Bressler, J.A.S. Kelso, Cortical coordination dynamics and cognition, *Trends Cogn. Sci.* 5 (2001) 26 36, [http://dx.doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01564-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01564-3).

[23] E. Tognoli, J.A.S. Kelso, The metastable brain, *Neuron* 81 (2014) 35 48, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuron.2013.11.011>.

[24] P. Ashwin, M. Timme, Nonlinear dynamics: when instability makes sense, *Nature* 436 (2005) 36 37, <http://dx.doi.org/10.1038/436036>.

[25] I.T. Jolliffe, *Principal Component Analysis*, Springer-Verlag New York, ISBN: 978-0-387-95442-4, 2002, p. 2002.

[26] A. Fuchs, J.A.S. Kelso, H. Haken, Phase transitions in the human brain: Spatial mode dynamics, *Int. J. Bifurcation Chaos* 2 (1992) 917 939, <http://dx.doi.org/10.1142/S0218127492000537>.

[27] A.T. Baria, B. Maniscalco, B.J. He, Initial-state-dependent, robust, transient neural dynamics encode conscious visual perception, *PLOS Comput. Biol.* 13 (2017) 1 29, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005806>.

[28] M.H. Herzog, T. Kammer, F. Scharnowski, Time slices: What is the duration of a percept?, *PLOS Biol.* 14 (2016) e1002433, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pbio.1002433>.

[29] M.I. Rabinovich, K.J. Friston, P. Varona, *Principles of Brain Dynamics: Global State Interactions*, MIT Press, Cambridge, MA, 2012.

[30] R.M. Hutchison, J.B. Morton, It s a matter of time: Reframing the development of cognitive control as a modification of the brain s temporal dynamics, *Dev. Cogn. Neurosci.* 18 (2016) 70 77, <http://dx.doi.org/10.1016/j.dcn.2015.08.006>.

[31] M.J. McPherson, F.S. Barrett, M. Lopez-Gonzalez, P. Jiradejvong, C.J. Limb, Emotional intent

modulates the neural substrates of creativity: An fMRI study of emotionally Targeted improvisation in Jazz Musicians, *Sci. Rep.* 6 (2016) 18460, <http://dx.doi.org/10.1038/srep18460>.

[32] M. Rabinovich, A. Volkovskii, P. Lecanda, R. Huerta, H.D. Abarbanel, G. Laurent, Dynamical encoding by networks of competing neuron groups: winnerless competition, *Phys. Rev. Lett.* 87 (2001) 68102, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.068102>.

[33] M.I. Rabinovich, P. Varona, A.I. Selverston, H.D.I. Abarbanel, Dynamical principles in neuroscience, *Rev. Modern Phys.* 78 (2006) 1213 1265, <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.78.1213>. [34] M. Rabinovich, R. Huerta, G. Laurent, Transient dynamics for neural processing, *Science* 321 (2008) 48 50, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1155564>. [35] M.I. Rabinovich, P. Varona, Discrete sequential information coding: Heteroclinic cognitive dynamics, *Front. Comput. Neurosci.* 12 (2018) 73, <http://dx.doi.org/10.3389/fncom.2018.00073>.

[36] J.M. Shine, M. Breakspear, P.T. Bell, K.A. Ehgoetz Martens, R. Shine, O. Koyejo, O. Sporns, R.A. Poldrack, Human cognition involves the dynamic integration of neural activity and neuromodulatory systems, *Nat. Neurosci.* 22 (2019) 289 296, <http://dx.doi.org/10.1038/s41593-018-0312-0>.

[37] Z. Ma, N. Zhang, Temporal transitions of spontaneous brain activity, *Elife* 7 (2018) e33562, <http://dx.doi.org/10.7554/eLife.33562>.

[38] G. Buzsáki, D. Tingley, Space and time: The hippocampus as a sequence generator, *Trends Cogn. Sci.* 22 (2018) 853 869, <http://dx.doi.org/10.1016/J.TICS.2018.07.006>.

[39] G. Cona, C. Semenza, Supplementary motor area as key structure for domain-general sequence processing: A unified account, *Neurosci. Biobehav. Rev.* 72 (2017) 28 42, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.10.033>.

[40] T.P. Meehan, S.L. Bressler, Neurocognitive networks: Findings, models, and theory, *Neurosci. Biobehav. Rev.* 36 (2012) 2232 2247, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.08.002>.

[41] J.R. King, S. Dehaene, Characterizing the dynamics of mental representations: The temporal generalization method, *Trends Cogn. Sci.* 18 (2014) 203 210, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2014.01.002>.

[42] K.J. Friston, Transients, metastability, and neuronal dynamics, *Neuroimage* 5 (1997) 164 171, <http://dx.doi.org/10.1006/nimg.1997.0259>.

[43] M. Rabinovich, I. Tristan, P. Varona, Neural dynamics of attentional cross-modality control, *PLoS One* 8 (2013) e64406, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0064406>.

[44] A. Venaille, P. Varona, M.I. Rabinovich, Synchronization and coordination of sequences in two neural ensembles, *Phys. Rev. E* 71 (2005) 61909, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.71.061909>.

[45] L.M. Jones, A. Fontanini, B.F. Sadacca, P. Miller, D.B. Katz, Natural stimuli evoke dynamic sequences of states in sensory cortical ensembles, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104 (2007) 18772–18777, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0705546104>.

[46] V. Afraimovich, I. Tristan, R. Huerta, M.I. Rabinovich, Winnerless competition principle and prediction of the transient dynamics in a Lotka Volterra model, *Chaos* 18 (2008) 43103, <http://dx.doi.org/10.1063/1.2991108>.

[47] S. Ishihara, K. Kaneko, Magic number 7.2 in networks of Threshold Dynamics, *Phys. Rev. Lett.* 94 (2005) 058102, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.058102>.

[48] C. Bick, M.I. Rabinovich, Dynamical origin of the effective storage capacity in the brain's working memory, *Phys. Rev. Lett.* 103 (2009) 218101, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.218101>.

[49] M.I. Rabinovich, V.S. Afraimovich, C. Bick, P. Varona, Information flow dynamics in the brain, *Phys. Life Rev.* 9 (2012) 51–73, <http://dx.doi.org/10.1016/j.plrev.2011.11.002>.

[50] M.I. Rabinovich, I. Tristan, P. Varona, Hierarchical nonlinear dynamics of human attention, *Neurosci. Biobehav. Rev.* 55 (2015) 18–35, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.04.001>.

[51] P. Varona, M.I. Rabinovich, Hierarchical dynamics of informational patterns and decision-making, *Proc. R. Soc. B* 283 (2016) 20160475, <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2016.0475>.

[52] M.I. Rabinovich, M.K. Muezzinoglu, I. Strigo, A. Bystritsky, Dynamical principles of emotion-cognition interaction: Mathematical images of mental disorders, *PLoS One* 5 (2010) e12547, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.012547>.

[53] K.E. Bouchard, N. Mesgarani, K. Johnson, E.F. Chang, Functional organization of human sensorimotor cortex for speech articulation, *Nature* 495 (2013) 327–332, <http://dx.doi.org/10.1038/nature11911>.

[54] A. Bystritsky, A.A. Nierenberg, J.D. Feusner, M. Rabinovich, Computational non-linear dynamical psychiatry: a new methodological paradigm for diagnosis and course of illness, *J. Psychiatr. Res.* 46 (2012) 428–435, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpsychires.2011.10.013>.

[55] V.S. Afraimovich, V.P. Zhigulin, M.I. Rabinovich, On the origin of reproducible sequential activity in neural circuits, *Chaos* 14 (2004) 1123, <http://dx.doi.org/10.1063/1.1819625>. [56] D.S. Bassett, N.F. Wymbs, M.A. Porter, P.J. Mucha, J.M. Carlson, S.T. Grafton, Dynamic reconfiguration of human brain networks during learning, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 108 (2011) 7641–7646, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1018985108>.

[57] F. Janoos, R. Machiraju, S. Singh, I. Kos, Spatio-temporal models of mental processes from fMRI, *Neuroimage* 57 (2011) 362–377, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.03.047>.

- [58] N. Kriegeskorte, M. Mur, P. Bandettini, Representational similarity analysis connecting the branches of systems neuroscience, *Front. Syst. Neurosci.* 2 (2008) 4, <http://dx.doi.org/10.3389/neuro.06.004.2008>.
- [59] P. Hagoort, MUC (Memory, Unification, Control) and beyond, *Front. Psychol.* 4 (2013) 416, <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00416>.
- [60] C.M. Michel, T. Koenig, EEG microstates as a tool for studying the temporal dynamics of whole-brain neuronal networks: A review, *NeuroImage* 180 (2017) 577 593, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.11.062>.
- [61] J. Creaser, P. Ashwin, C. Postlethwaite, J. Britz, Noisy network attractor models for transitions between EEG microstates, 2019, arXiv:1903.05590.
- [62] K.J. Friston, W. Penny, Posterior probability maps and SPMs, *Neuroimage* 19 (2003) 1240 1249, [http://dx.doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\) 00144-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1053-8119(03) 00144-7).
- [63] W. Penny, K. Friston, Mixtures of general linear models for functional neuroimaging, *IEEE Trans. Med. Imaging* 22 (2003) 504 514, <http://dx.doi.org/10.1109/TMI.2003.809140>.
- [64] O. Josephs, R. Turner, K. Friston, Event-related fMRI, *Hum. Brain Mapp.* 5 (1997) 243 248, [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0193\(1997\)5:4](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-0193(1997)5:4).
- [65] K.J. Friston, C. Buechel, G.R. Fink, J. Morris, E. Rolls, R.J. Dolan, Psychophysiological and modulatory interactions in neuroimaging, *Neuroimage* 6 (1997) 218 229, <http://dx.doi.org/10.1006/nimg.1997.0291>.
- [66] K.J. Friston, C.D. Frith, P. Fletcher, P.F. Liddle, R.S.J. Frackowiak, Functional topography: Multidimensional scaling and functional connectivity in the brain, *Cereb. Cortex.* 6 (1996) 156 164, <http://dx.doi.org/10.1093/cercor>
- [67] K.A. Norman, S.M. Polyn, G.J. Detre, J.V. Haxby, Beyond mind-reading: multi-voxel pattern analysis of fMRI data, *Trends Cogn. Sci.* 10 (2006) 424 430, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2006.07.005>.
- [68] K. Friston, C. Chu, J. Mourão Miranda, O. Hulme, G. Rees, W. Penny, J. Ashburner, Bayesian decoding of brain images, *Neuroimage* 39 (2008) 181 205, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.08.013>.
- [69] S.M. Polyn, V.S. Natu, J.D. Cohen, K.A. Norman, Category-specific cortical activity precedes retrieval during memory search., *Science* 310 (2005) 1963 1966, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1117645>.
- [70] P. beim Graben, A. Hutt, Attractor and saddle node dynamics in heterogeneous neural fields, *EPJ Nonlinear Biomed. Phys.* 2 (2014) 4, <http://dx.doi.org/10.1140/epjnbp17>.

- [71] M.J. Field, Patterns of desynchronization and resynchronization in heteroclinic networks, *Nonlinearity* 30 (2016) 516 557, <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6544/aa4f48>.
- [72] P. Ashwin, S. Coombes, R. Nicks, Mathematical frameworks for Oscillatory Network Dynamics in neuroscience, *J. Math. Neurosci.* 6 (2016) 2, <http://dx.doi.org/10.1186/s13408-015-0033-6>.
- [73] M.I. Rabinovich, R. Huerta, P. Varona, Heteroclinic synchronization: ultrasubharmonic locking, *Phys. Rev. Lett.* 96 (2006) 141001, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.014101>.
- [74] M.I. Rabinovich, V.S. Afraimovich, P. Varona, Heteroclinic binding, *Dyn. Syst. Int. J.* 25 (2010) 433 442, <http://dx.doi.org/10.1080/14689367.2010.515396>.
- [75] O. Weinberger, P. Ashwin, From coupled networks of systems to networks of states in phase space, *Discrete Contin. Dyn. Syst. - B* 23 (2018) 2021 2041, <http://dx.doi.org/10.3934/dcdsb.2018193>.
- [76] V. Afraimovich, M. Rabinovich, P. Varona, Short guide to modern Nonlinear Dynamics, in: M.I. Rabinovich, K. Friston, P. Varona (Eds.), *Princ. Brain Dyn. Glob. State Interact.*, MIT Press, Cambridge, MA, 2012, p. 313.
- [77] J. Guckenheimer, P. Holmes, Structurally stable heteroclinic cycles, *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.* 103 (1988) 189 192, <http://dx.doi.org/10.1017/S0305004100064732>.
- [78] R.M. May, W.J. Leonard, Nonlinear aspects of competition between three species, *SIAM J. Appl. Math.* 29 (1975) 243 253, <http://dx.doi.org/10.1137/0129022>.
- [79] F.H. Busse, K.E. Heikes, Convection in a rotating layer: A simple case of Turbulence, *Science* 208 (1980) 173 175, <http://dx.doi.org/10.1126/science.208.4440.173>.
- [80] D. Hansel, G. Mato, C. Meunier, Clustering and slow switching in globally coupled phase oscillators, *Phys. Rev. E* 48 (1993) 3470 3477, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.48.3470>.
- [81] H. Kori, Y. Kuramoto, Slow switching in globally coupled oscillators: robustness and occurrence through delayed coupling, *Phys. Rev. E* 63 (2001) 046214, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.63.046214>.
- [82] P. Ashwin, J. Borresen, Encoding via conjugate symmetries of slow oscillations for globally coupled oscillators, *Phys. Rev. E* 70 (2004) 026203, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.70.026203>.
- [83] P. Ashwin, O. Burylko, Y. Maistrenko, Bifurcation to heteroclinic cycles and sensitivity in three and

four coupled phase oscillators, *Physica D* 237 (2008) 454 466, <http://dx.doi.org/10.1016/j.physd.2007.09.015>.

[84] M.J. Field, Heteroclinic networks in homogeneous and heterogeneous identical cell systems, *J. Nonlinear Sci.* 25 (2015) 779 813, <http://dx.doi.org/10.1007/s00332-015-9241-1>.

[85] L.P. Shilnikov, A.L. Shilnikov, D.V. Turaev, L.O. Chua, *Methods of Qualitative Theory in Nonlinear Dynamics*, World Scientific, New Jersey, 1998.

[86] C. Bick, M. Rabinovich, On the occurrence of stable heteroclinic channels in Lotka Volterra models, *Dyn. Syst.* 25 (2010) 97 110, <http://dx.doi.org/10.1080/14689360903322227>.

[87] M. Krupa, Robust heteroclinic cycles, *J. Nonlinear Sci.* 7 (1997) 129 176, <http://dx.doi.org/10.1007/BF02677976>.

[88] P. Ashwin, G.P. King, J.W. Swift, Three identical oscillators with symmetric coupling, *Nonlinearity* 3 (1990) 585 602, <http://dx.doi.org/10.1088/0951-7715/3/3/003>.

[89] A. Lohse, Stability of heteroclinic cycles in transverse bifurcations, *Physica D* 310 (2015) 95 103, <http://dx.doi.org/10.1016/J.PHYSD.2015.08.005>.

[90] N. Agarwal, A. Rodrigues, M. Field, Dynamics near the product of planar heteroclinic attractors, *Dyn. Syst.* 26 (2011) 447 481, <http://dx.doi.org/10.1080/14689367.2011.605784>.

[91] V.S. Afraimovich, M.A. Zaks, M.I. Rabinovich, Mind-to-mind heteroclinic coordination: Model of sequential episodic memory initiation, *Chaos* 28 (2018) 053107, <http://dx.doi.org/10.1063/1.5023692>.

[92] V.S. Afraimovich, G. Moses, T. Young, Two-dimensional heteroclinic attractor in the generalized Lotka Volterra system, *Nonlinearity* 29 (2016) 1645 1667, <http://dx.doi.org/10.1088/0951-7715/29/5/1645>.

[93] M. Voit, H. Meyer-Ortmanns, A hierarchical heteroclinic network: Controlling the time evolution along its paths, *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 227 (2018) 1101 1115, <http://dx.doi.org/10.1140/epjst/e2018-800040-x>.

[94] P. Ashwin, C. Postlethwaite, On designing heteroclinic networks from graphs, *Physica D* 265 (2013) 26 39, <http://dx.doi.org/10.1016/j.physd.2013.09.006>.

[95] P. beim Graben, A. Hutt, Detecting recurrence domains of dynamical systems by symbolic dynamics, *Phys. Rev. Lett.* 110 (2013) 154101, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.154101>.

[96] A. Hutt, P. beim Graben, Sequences by metastable attractors: Interweaving dynamical systems and

experimental data, *Front. Appl. Math. Stat.* 3 (2017) 11, <http://dx.doi.org/10.3389/fams.2017.00011>.

[97] I. Tsuda, Hypotheses on the functional roles of chaotic transitory dynamics, *Chaos* 19 (2009) 015113, <http://dx.doi.org/10.1063/1.3076393>. [98] I. Tsuda, Chaotic itinerancy and its roles in cognitive neurodynamics, *Curr. Opin. Neurobiol.* 31 (2015) 67–71, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conb.2014.08.011>.

[99] Y. Kifer, The exit problem for small random perturbations of dynamical systems with a hyperbolic fixed point, *Israel J. Math.* 40 (1981) 74–96, <http://dx.doi.org/10.1007/BF02761819>.

[100] E. Stone, P. Holmes, Random perturbations of Heteroclinic Attractors, *SIAM J. Appl. Math.* 50 (1990) 726–743, <http://dx.doi.org/10.1137/0150043>.

[101] D. Armbruster, E. Stone, V. Kirk, Noisy heteroclinic networks, *Chaos* 13 (2003) 71–79, <http://dx.doi.org/10.1063/>

[102] Yu. Sokolov, R. Kozma, M. Rabinovich, Noise effects in a dynamic model of attentional switching, in: *Proceedings of the 2014 Biomedical Sciences and Engineering Conference, Oak Ridge, TN, 2014*, pp. 1–4, <http://dx.doi.org/10.1109/bsec.2014.6867748>.

[103] T. Nowotny, M.I. Rabinovich, Dynamical origin of independent spiking and bursting activity in neural microcircuits, *Phys. Rev. Lett.* 98 (2007) 128106, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.128106>.

[104] R. Huerta, M. Rabinovich, Reproducible sequence generation in random neural ensembles, *Phys. Rev. Lett.* 93 (2004) 238104, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.238104>.

[105] X. Zhang, G. Chen, Constructing an autonomous system with infinitely many chaotic attractors, *Chaos* 27 (2017) 071101, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4986356>.

[106] E. Dong, Z. Zhang, M. Yuan, Y. Ji, X. Zhou, W. Zenghui, Ultimate boundary estimation and topological horseshoe analysis on a parallel 4D hyperchaotic system with any number of attractors and its multi-scroll, *Nonlinear Dynam.* (2019) <http://dx.doi.org/10.1007/s11071-018-04751-3>.

[107] V. Zaburdaev, S. Denisov, J. Klafter, Lévy walks, *Rev. Modern Phys.* 87 (2015) 483–530, <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.87.483>.

[108] R. Marois, J. Ivanoff, Capacity limits of information processing in the brain, *Trends Cogn. Sci.* 9 (2005) 296–305, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2005.04.010>. [109] A. Baddeley, Working memory, *Science* 255 (1992) 556–559, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1736359>.

[110] G.A. Alvarez, P. Cavanagh, The capacity of visual short-term memory is set both by visual in-

formation load and by number of objects, *Psychol. Sci.* 15 (2004) 10 11, <http://dx.doi.org/10.1111/j.0963-7214.2004.01502006.x>.

[111] H.L. Swanson, What develops in working memory? A life span perspective, *Dev. Psychol.* 35 (1999) 986 1000, <http://dx.doi.org/10.1037/0012-1649.35.4.986>.

[112] K. Oberauer, R. Kliegl, A formal model of capacity limits in working memory, *J. Mem. Lang.* 55 (2006) 601 626, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jml.2006.08.009>.

[113] J.N. Rouder, R.D. Morey, N. Cowan, C.E. Zwillig, C.C. Morey, M.S. Pratte, An assessment of fixed-capacity models of visual working memory, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105 (2008) 5975 5979, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0711295105>.

[114] F. Edin, T. Klingberg, P. Johansson, F. McNab, J. Tegnér, A. Compte, Mechanism for top-down control of working memory capacity., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 106 (2009) 6802 6807, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.09>

[115] M.I. Rabinovich, P. Varona, Robust transient dynamics and brain functions, *Front. Comput. Neurosci.* 5 (2011) 24, <http://dx.doi.org/10.3389/fncom.2011.00024>.

[116] M.P. van den Heuvel, O. Sporns, Rich-club organization of the human connectome, *J. Neurosci.* 31 (2011) 15775 15786, <http://dx.doi.org/10.1523/jneurosci.3539-11.2011>.

[117] K. Patterson, M.A. Lambon Ralph, The Hub-and-Spoke Hypothesis of semantic memory, in: *Neurobiol. Lang.*, 2015, pp. 765 775, <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-407794-2.00061-4>.

[118] D.R. Hofstadter, *Le Ton Beau de Marot: In Praise of the Music of Language*, Basic Books, New York, NY, USA, 1997.

[119] J.A.S. Kelso, *Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior*, MIT Press, Cambridge, 1997.

[120] J.A.S. Kelso, An essay on understanding the mind, *Ecol. Psychol.* 20 (2008) 180 208, <http://dx.doi.org/10.1080/1>

[121] R. Chiou, G.F. Humphreys, J. Jung, M.A. Lambon Ralph, Controlled semantic cognition relies upon dynamic and flexible interactions between the executive semantic control and hub-and-spoke semantic representation systems, *Cortex.* 103 (2018) 100 116, <http://dx.doi.org/10.1016/J.CORTEX.2018.02.018>.

[122] M.A.L. Ralph, E. Jefferies, K. Patterson, T.T. Rogers, The neural and computational bases of semantic cognition, *Nat. Rev. Neurosci.* 18 (2017) 42 55, <http://dx.doi.org/10.1038/nrn.2016.150>.

- [123] M. Norgaard, S.N. Emerson, K. Dawn, J.D. Fidlou, Creating under pressure, *Music Percept. Interdiscip. J.* 33 (2016) 561 570, <http://dx.doi.org/10.1525/mp.2016.33.5.561>.
- [124] V.A. Makarov, C. Calvo, V. Gallego, A. Selskii, Synchronization of heteroclinic circuits through learning in chains of neural Motifs, *IFAC-PapersOnLine* 49 (2016) 80 83, <http://dx.doi.org/10.1016/J.IFACOL.2016.07.986>.
- [125] R. Binney, R. Ramsey, Social Semantics: The role of conceptual knowledge and cognitive control in a neurobiological model of the social brain, *Neurosci. Biobehav. Rev.* 112 (2020) 28 38, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.07.003>.
- [126] A.E. Walton, M.J. Richardson, P. Langland-Hassan, A. Chemero, Improvisation and the self-organization of multiple musical bodies, *Front. Psychol.* 6 (2015) 313, <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00313>.
- [127] K.J.W. Craik, *The Nature of Explanation*, Cambridge University Press, Cambridge, 1943.
- [128] M. MacLeod, N.J. Nersessian, Interdisciplinary problem-solving: Emerging modes in Integrative Systems Biology, *Eur. Jnl. Phil. Sci.* 6 (2016) 401 418, <http://dx.doi.org/10.1007/s13194-016-0157-x>.
- [129] P. Johnson-Laird, *Mental Models*, Harvard University Press, 1989, <http://dx.doi.org/10.1177/1538513202001003>.
- [130] P.N. Johnson-Laird, *How We Reason*, Oxford University Press, 2006.
- [131] B.J. Baars, *A Cognitive Theory of Consciousness*, Cambridge University Press, 1988.
- [132] S. Dehaene, M. Kerszberg, J.-P. Changeux, A neuronal model of a global workspace in effortful cognitive tasks, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 95 (1998) 14529 14534, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.95.24.14529>.
- [133] K. Finc, K. Bonna, M. Lewandowska, T. Wolak, J. Nikadon, J. Dreszer, W. Duch, S. Kühn, Transition of the functional brain network related to increasing cognitive demands, *Hum. Brain Mapp.* 38 (2017) 3659 3674, <http://dx.doi.org/10.1002/hbm.23621>.
- [134] B.J. Baars, Global workspace theory of consciousness: toward a cognitive neuroscience of human experience, *Prog. Brain Res.* 150 (2005) 45 53, [http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6123\(05\)50004-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6123(05)50004-9).
- [135] G. Tononi, An information integration theory of consciousness, *BMC Neurosci.* 5 (2004) 42, <http://dx.doi.org/10.1186/1471-2202-5-42>. [136] R.G. Shulman, D.L. Rothman, *Brain Energetics and Neuronal Activity: Applications to fMRI and Medicine*, Wiley, 2005, <http://dx.doi.org/10.1002/0470020520>.
- [137] F.J. Esteban, J.A. Galadí, J.A. Langa, J.R. Portillo, F. Soler-Toscano, Informational structures: A

dynamical system approach for integrated information, *PLOS Comput. Biol.* 14 (2018) 1 33, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005500>

[138] R.W. Rieber (Ed.), *The Collected Works of L.S. Vygotsky*, Springer US, Boston, MA, 1999, <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-4833-1>.

[139] T. Shallice, Dual functions of consciousness, *Psychol. Rev.* 79 (1972) 383 393, <http://dx.doi.org/10.1037/h0033133>

[140] P.N. Johnson-Laird, *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*, *Cogn. Sci.* 4 (1983) 71 115, [http://dx.doi.org/10.1016/S0364-0213\(81\)80005-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0364-0213(81)80005-5).

[141] M. Benedek, T. Schües, R.E. Beaty, E. Jauk, K. Koschutnig, A. Fink, A.C. Neubauer, To create or to recall original ideas: Brain processes associated with the imagination of novel object uses, *Cortex.* 99 (2018) 93 102, <http://dx.doi.org/10.1016/J.CORTEX.2017.10.024>.

[142] B.I. Cohn-Sheehy, C. Ranganath, Time regained: how the human brain constructs memory for time, *Curr. Opin. Behav. Sci.* 17 (2017) 169 177, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.08.005>.

[143] S. Teki, T.D. Griffiths, Working memory for time intervals in auditory rhythmic sequences, *Front. Psychol.* 5 (2014) 1329, <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01329>.

[144] S. Teki, B.-M. Gu, W.H. Meck, The persistence of memory: how the brain encodes time in memory, *Curr. Opin. Behav. Sci.* 17 (2017) 178 185, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.09.003>.

[145] R.E. Beaty, Y.N. Kenett, A.P. Christensen, M.D. Rosenberg, M. Benedek, Q. Chen, A. Fink, J. Qiu, T.R. Kwapil, M.J. Kane, P.J. Silvia, Robust prediction of individual creative ability from brain functional connectivity, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 115 (2018) 1087 1092, <http://dx.doi.org/10.1073/PNAS.1713532115>.

[146] C. Müller, *Metaphors Dead and Alive, Sleeping and Waking: A Dynamic View*, University of Chicago Press, Chicago, 2008, <http://dx.doi.org/10.7208/chicago/9780226548265.001.0001>.

[147] M. Ellamil, C. Dobson, M. Beeman, K. Christoff, Evaluative and generative modes of thought during the creative process, *Neuroimage* 59 (2012) 1783 1794, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.08.008>.

[148] T. Clevenger, R. Edwards, Semantic distance as a predictor of metaphor selection, *J. Psycholinguist. Res.* 17 (1988) 211 226, <http://dx.doi.org/10.1007/BF01686356>.

[149] M. Faust, Y.N. Kenett, Rigidity, chaos and integration: hemispheric interaction and individual differences in metaphor comprehension., *Front. Hum. Neurosci.* 8 (2014) 511, <http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2014.00511>.

[150] Y.N. Kenett, D. Anaki, M. Faust, Investigating the structure of semantic networks in low and high creative persons, *Front. Hum. Neurosci.* 8 (2014) 407, <http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2014.00407>.

[151] Y.N. Kenett, M. Faust, A semantic network cartography of the creative mind, *Trends Cogn. Sci.* 23 (2019) 271 274, <http://dx.doi.org/10.1016/J.TICS.2019.01.007>.

[152] J. Sun, Z. Liu, E.T. Rolls, Q. Chen, Y. Yao, W. Yang, D. Wei, Q. Zhang, J. Zhang, J. Feng, J. Qiu, Verbal creativity correlates with the temporal variability of brain networks during the resting state, *Cereb. Cortex.* 29 (2018) 1047 1058, <http://dx.doi.org/10.1093/cercor/bhy010>.

[153] K.P. Madore, D.R. Addis, D.L. Schacter, Creativity and memory, *Psychol. Sci.* 26 (2015) 1461 1468, <http://dx.doi.org/10.1177/0956797615591863>.

[154] M. Benedek, A. Fink, Toward a neurocognitive framework of creative cognition: the role of memory, attention, and cognitive control, *Curr. Opin. Behav. Sci.* 27 (2019) 116 122, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.11.000>.

[155] R.E. Beaty, P. Seli, D.L. Schacter, Network neuroscience of creative cognition: mapping cognitive mechanisms and individual differences in the creative brain, *Curr. Opin. Behav. Sci.* 27 (2019) 22 30, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.08.013>.

[156] S. Hanslmayr, B.P. Staresina, H. Bowman, Oscillations and episodic memory: Addressing the synchronization/Desynchronization Conundrum, *Trends Neurosci.* 39 (2016) 16 25, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tins.2015.11.000>.

[157] J.J. Foxe, A.C. Snyder, The role of Alpha-Band Brain Oscillations as a sensory suppression mechanism during selective attention, *Front. Psychol.* 2 (2011) 13, <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00154>.

[158] S. Agnoli, M. Zanon, S. Mastria, A. Avenanti, G.E. Corazza, Enhancing creative cognition with a rapid right-parietal neurofeedback procedure, *Neuropsychologia* 118 (2018) 99 106, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.08.013>.

[159] A. Fink, M. Benedek, EEG alpha power and creative ideation, *Neurosci. Biobehav. Rev.* 44 (2014) 111 123, <http://dx.doi.org/10.1016/J.NEUBIOREV.2012.12.002>.

[160] A. Fink, B. Graif, A.C. Neubauer, Brain correlates underlying creative thinking: EEG alpha activity in professional vs. novice dancers, *Neuroimage* 46 (2009) 854 862, <http://dx.doi.org/10.1016/J.NEUROIMAGE.2009.02.030>.

[161] Y.N. Kenett, What can quantitative measures of semantic distance tell us about creativity?, *Curr. Opin. Behav. Sci.* 27 (2019) 11 16, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.08.010>.

[162] K.J. Gilhooly, E. Fioratou, S.H. Anthony, V. Wynn, Divergent thinking: Strategies and ex-

ecutive involvement in generating novel uses for familiar objects, *Br. J. Psychol.* 98 (2007) 611–625, <http://dx.doi.org/10.1111/j.2044-8295.2007.tb00467.x>.

[163] M. Benedek, F. Franz, M. Heene, A.C. Neubauer, Differential effects of cognitive inhibition and intelligence on creativity, *Pers. Individ. Dif.* 53 (2012) 480–485, <http://dx.doi.org/10.1016/J.PAID.2012.04.014>.

[164] O.M. Kleinmintz, T. Ivancovsky, S.G. Shamy-Tsoory, The twofold model of creativity: the neural underpinnings of the generation and evaluation of creative ideas, *Curr. Opin. Behav. Sci.* 27 (2019) 131–138, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.11.004>.

[165] J. Heinonen, J. Numminen, Y. Hlushchuk, H. Antell, V. Taatila, J. Suomala, Default Mode and executive networks areas: Association with the Serial order in divergent Thinking, *PLoS One* 11 (2016) e0162234, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0162234>.

[166] L. Aziz-Zadeh, S.-L. Liew, F. Dandekar, Exploring the neural correlates of visual creativity, *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* 8 (2012) 475–480, <http://dx.doi.org/10.1093/scan/nss021>.

[167] R. Arden, R.S. Chavez, R. Grazioplene, R.E. Jung, Neuroimaging creativity: A psychometric view, *Behav. Brain Res.* 214 (2010) 143–156, <http://dx.doi.org/10.1016/J.BBR.2010.05.015>.

[168] M. Benedek, R. Beaty, E. Jauk, K. Koschutnig, A. Fink, P.J. Silvia, B. Dunst, A.C. Neubauer, Creating metaphors: The neural basis of figurative language production, *Neuroimage* 90 (2014) 99–106, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.12.046>.

[169] A.P. Yonelinas, M. Ritchey, The slow forgetting of emotional episodic memories: an emotional binding account, *Trends Cogn. Sci.* 19 (2015) 259–267, <http://dx.doi.org/10.1016/J.TICS.2015.02.009>.

[170] V.N. Salimpoor, D.H. Zald, R.J. Zatorre, A. Dagher, A.R. McIntosh, Predictions and the brain: how musical sounds become rewarding, *Trends Cogn. Sci.* 19 (2015) 86–91, <http://dx.doi.org/10.1016/J.TICS.2014.12.001>.

[171] T. Karapanagiotidis, B.C. Bernhardt, E. Jefferies, J. Smallwood, Tracking thoughts: Exploring the neural architecture of mental time travel during mind-wandering, *Neuroimage* 147 (2017) 272–281, <http://dx.doi.org/10.1016/J.NEUROIMAGE.2016.12.031>.

[172] A.K. Roopun, M.A. Kramer, L.M. Carracedo, M. Kaiser, C.H. Davies, R.D. Traub, N.J. Kopell, M.A. Whittington, Temporal interactions between Cortical Rhythms, *Front. Neurosci.* 2 (2008) 145–154, <http://dx.doi.org/10.3389/neuro.01.034.2008>.

[173] J.M. Beggs, D. Plenz, Neuronal avalanches in Neocortical Circuits, *J. Neurosci.* 23 (2003) 11167

11177, <http://dx.doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-35-11167.2003>.

[174] S. di Santo, P. Villegas, R. Burioni, M.A. Muñoz, Landau-Ginzburg theory of cortex dynamics: Scale-free avalanches emerge at the edge of synchronization, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 115 (2018) E1356 E1365, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1712989115>.

[175] S.R. Miller, S. Yu, D. Plenz, The scale-invariant, temporal profile of neuronal avalanches in relation to cortical oscillations, *Sci. Rep.* 9 (2019) 16403, <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-52326-y>.

[176] M.I. Rabinovich, A.L. Fabrikant, Stochastic self-modulation of waves in nonequilibrium media, *J. Exp. Theor. Phys.* 77 (1979) 617 629.

[177] I. Iacopini, S. Milojević, V. Latora, Network Dynamics of Innovation processes, *Phys. Rev. Lett.* 120 (2018) 48301, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.048301>.

[178] M.-F. Danca, Hidden transient chaotic attractors of Rabinovich Fabrikant system, *Nonlinear Dynam.* 86 (2016) 1263 1270, <http://dx.doi.org/10.1007/s11071-016-2962-3>.

[179] M.-F. Danca, N. Kuznetsov, G. Chen, Unusual dynamics and hidden attractors of the Rabinovich Fabrikant system, *Nonlinear Dynam.* 88 (2017) 791 805, <http://dx.doi.org/10.1007/s11071-016-3276-1>.

[180] D. Dudkowski, S. Jafari, T. Kapitaniak, N.V. Kuznetsov, G.A. Leonov, A. Prasad, Hidden attractors in dynamical systems, *Phys. Rep.* 637 (2016) 1 50, <http://dx.doi.org/10.1016/J.PHYSREP.2016.05.002>.

[181] J.A.S. Kelso, Multistability and metastability: understanding dynamics coordination in the brain, *Philos. Trans. R. Soc. B* 367 (2012) 906 918, <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2011.0351>.

[182] K.R. Scherer, Emotions are emergent processes: they require a dynamic computational architecture, *Philos. Trans. R. Soc. B* 364 (2009) 3459 3474, <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2009.0141>.

[183] A. de Rooij, P.J. Corr, S. Jones, Creativity and Emotion: Enhancing creative thinking by the Manipulation of computational feedback to determine emotional intensity, in: *Proc. 2017 ACM SIGCHI Conf. Creat. Cogn.*, ACM, New York, NY, USA, 2017, pp. 148 157, <http://dx.doi.org/10.1145/3059454.3059469>.

[184] C.J. Limb, A.R. Braun, Neural substrates of spontaneous musical performance: an fMRI study of jazz improvisation, *PLoS One* 3 (2008) e1679, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0001679>.

[185] C. Koch, M. Massimini, M. Boly, G. Tononi, Neural correlates of consciousness: progress and problems, *Nat. Rev. Neurosci.* 17 (2016) 307 321, <http://dx.doi.org/10.1038/nrn.2016.22>.

- [186] G.L. Baker, J.B. Gollub, *Chaotic Dynamics: An Introduction*, Cambridge University Press, 1996.
- [187] D. Clewett, L. Davachi, The ebb and flow of experience determines the temporal structure of memory, *Curr. Opin. Behav. Sci.* 17 (2017) 186 193, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.08.013>.
- [188] L.D. Hestermann, J. Wagemans, R.T. Krampe, Task-set control, chunking, and hierarchical timing in rhythm production, *Psychol. Res.* (2018) 1 18, <http://dx.doi.org/10.1007/s00426-018-1038-z>.
- [189] J. Lagarde, J.A.S. Kelso, Binding of movement, sound and touch: multimodal coordination dynamics, *Exp. Brain Res.* 173 (2006) 673 688, <http://dx.doi.org/10.1007/s00221-006-0410-1>.
- [190] J.B. Hutchinson, N.B. Turk-Browne, Memory-guided attention: control from multiple memory systems, *Trends Cogn. Sci.* 16 (2012) 576 579, <http://dx.doi.org/10.1016/J.TICS.2012.10.003>.
- [191] T.W. Buchanan, Retrieval of emotional memories, *Psychol. Bull.* 133 (2007) 761 779, <http://dx.doi.org/10.1037/2909.133.5.761>.
- [192] A.C. Holland, E.A. Kensinger, Emotion and autobiographical memory, *Phys. Life Rev.* 7 (2010) 88 131, <http://dx.doi.org/10.1016/J.PLREV.2010.01.006>.
- [193] S. Fayolle, S. Gil, S. Droit-Volet, Fear and time: Fear speeds up the internal clock, *Behav. Process.* 120 (2015) 135 140, <http://dx.doi.org/10.1016/J.BEPROC.2015.09.014>.
- [194] K.J. Jantzen, F.L. Steinberg, J.A.S. Kelso, Brain networks underlying human timing behavior are influenced by prior context, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 101 (2004) 6815 6820, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0401300101>.
- [195] D. Ballotta, F. Lui, C.A. Porro, P.F. Nichelli, F. Benuzzi, Modulation of neural circuits underlying temporal production by facial expressions of pain, *PLoS One* 13 (2018) e0193100, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0193100>.
- [196] A. Schirmer, W.H. Meck, T.B. Penney, The socio-temporal brain: Connecting people in time, *Trends Cogn. Sci.* 20 (2016) 760 772, <http://dx.doi.org/10.1016/J.TICS.2016.08.002>.
- [197] P. Arena, L. Fortuna, D. Lombardo, L. Patanè, M.G. Velarde, The winnerless competition paradigm in cellular nonlinear networks: Models and applications, *Int. J. Circuit Theory Appl.* 37 (2009) 505 528, <http://dx.doi.org/10.1002/cta.v37:4>.
- [198] M.I. Rabinovich, P. Varona, in: T.J. Prescott, N.F. Lepora, A. Mura, P.F.M.J. Verschure (Eds.), *The Dynamical Modeling of Cognitive Robot-Human Centered Interaction*, in: *Lect. Notes Comput. Sci.*,

Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 228–237, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-31525-1_20.

[199] F. Herrero-Carrón, F.B. Rodríguez, P. Varona, Bio-inspired design strategies for central pattern generator control in modular robotics, *Bioinspiration Biomim.* 6 (2011) 016006, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-3182/6/1/016006>.

[200] C. Calvo Tapia, I.Y. Tyukin, V.A. Makarov, Fast social-like learning of complex behaviors based on motor motifs, *Phys. Rev. E* 97 (2018) 052308, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.97.052308>.

[201] L.P. Noldus, A.J. Spink, R.A. Tegelenbosch, Ethovision: a versatile video tracking system for automation of behavioral experiments., *Behav. Res. Methods Instrum. Comput.* 33 (2001) 398–414.

[202] M.I. Rabinovich, P. Varona, Consciousness: Sequential dynamics, robustness and mental disorders, *JAMA Psychiatry.* 74 (2017) 771–772, <http://dx.doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2017.0273>.

[203] G. Deco, M.L. Kringelbach, V.K. Jirsa, P. Ritter, The dynamics of resting fluctuations in the brain: Metastability and its dynamical cortical core, *Sci. Rep.* 7 (2017) 3095, <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-017-03073-5>.

[204] T.H. Alderson, A.L.W. Bokde, J.A.S. Kelso, L. Maguire, D. Coyle, Metastable neural dynamics in Alzheimer's disease are disrupted by lesions to the structural connectome, *Neuroimage* 183 (2018) 438–455, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.08.033>.

[205] R. Latorre, P. Varona, M.I. Rabinovich, Rhythmic control of oscillatory sequential dynamics in heteroclinic motifs, *Neurocomputing* 331 (2019) 108–120, <http://dx.doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2018.11.056>.