

• 科学技术哲学 •

交叉科学中的解释尺度与认知迭代

Scales of Explanations and Epistemic Iteration in Interdisciplinary Sciences

朱晶 / ZHU Jing

(华东师范大学哲学系, 上海, 200241)
(Department of Philosophy, East China Normal University, Shanghai, 200241)

摘要: 复杂系统的尺度效应与学科对应的解释尺度之间的矛盾, 阻碍了交叉科学合作中跨越并链接不同解释尺度, 也给人工智能技术与科学研究的结合带来深层次挑战。已有的哲学研究提出整合性多元主义来分析交叉研究, 但被认为牺牲了解释关联性与理论深度, 尚未阐明交叉整合的具体路径。本文以聚集诱导发光这一前沿交叉研究领域为例, 论证科研人员以介观尺度为中介来寻求不同尺度解释, 并通过链接不同尺度解释来持续实现方法互动和认知迭代, 从而获得连贯解释、推进理论深度。在阐明交叉整合路径的基础上, 本文旨在对整合性多元主义观点提出修正, 主张整合需要依赖具体的解释尺度来实现方法互动与认知迭代, 推进解释内在关联性与理论深度, 才能真正实现交叉。

关键词: 解释尺度 人工智能驱动的科学 整合性多元主义 学科交叉 聚集诱导发光

Abstract: The contradiction between scale effects in complex systems and discipline-specific explanatory scales impedes the bridging of different explanatory scales in interdisciplinary collaboration, and it also poses profound challenges for integrating AI technology with scientific research. Existing philosophical research has proposed integrative pluralism as a framework for analyzing interdisciplinary studies, yet this approach is criticized for sacrificing explanatory connectivity and theoretical depth, and it has yet to articulate specific pathways for interdisciplinary integration. This paper uses aggregation-induced emission (AIE)—a frontier interdisciplinary research area—as a case study to demonstrate how researchers employ the mesoscale as an intermediary to seek explanations across different scales, and achieve continuous methodological interaction and epistemic iteration by linking scale-specific explanations. As a result, researchers generate coherent explanations and advance theoretical depth. By elucidating these pathways of interdisciplinary integration, this paper aims to go beyond the integrative pluralism perspective, arguing that genuine interdisciplinarity requires integration that relies on specific explanatory scales to enable methodological interaction and epistemic iteration, thereby promoting the intrinsic connectivity of explanations and theoretical depth.

Key Words: Scales of explanations; AI for science; Integrative pluralism; Interdisciplinary research; Aggregation-induced emission

中图分类号: B089.2; N031 DOI: 10.15994/j.1000-0763.2026.09.006 CSTR: 32281.14.jdn.2026.09.006

基金项目: 上海市哲学社会科学规划课题“合成科学中的交叉合作认识论研究”(项目编号: 2025BZX001); 上海市科技创新行动计划专项(项目编号: 24DZ2301600)。

收稿日期: 2026 年 1 月 21 日

作者简介: 朱晶(1981-)女, 湖北天门人, 华东师范大学哲学系教授, 研究方向为科学实践哲学、化学与医学哲学、科学传播与科学政策。Email: jzhu@philo.ecnu.edu.cn

科学解释是科学哲学领域富有争议的话题。尽管寻求解释是科研的重要目标之一,但复杂系统的尺度效应与学科对应的解释尺度之间的矛盾,阻碍了交叉科学合作中跨越不同解释尺度,也带来人工智能(后文简称AI)与科学结合时的错位。AI增强型研究聚焦更狭窄的科学主题,降低了后续研究的参与度,减缓了知识拓展。^[1]

AI在当下科研中的应用高度集中于少数领域,如蛋白质设计、材料科学、基因组分析,^[2]大量科学热点问题尚未被AI工具充分探索,如不对称合成、森林与气候变化、磁性材料、病毒机制。这些尚未被AI工具充分探索的领域呈现共同特征:动态复杂性、非线性与尺度效应。要处理多尺度动态复杂系统,需要学科交叉、链接不同解释尺度。然而,科研人员往往专注学科所对应的解释尺度。从粒子物理、量子计算、化学、材料和细胞生物学,再到能源、大气、天文学,对应各自的时空尺度。学科持续专业化与交叉需要克服不同认识论差异这一悖论,也给AI与科学的交叉带来深层次挑战。

上述现象背后共同的科学与哲学问题是,不同学科面对同一研究主题进行交叉合作时,如何处理解释尺度上的认知边界、差异并成功推进交叉研究?考虑到科研目标与方法、研究者兴趣的多样性,学者们提出整合性多元主义(integrative pluralism)的哲学主张来分析交叉研究。以米切尔(Sandra Mitchell)为代表,整合性多元主义者承认表征的部分性、理论与数据的视角性,强调在不同学科领域可能存在多种有效但互不兼容的理论或模型。为此,科学应当整合不同尺度解释,而不是追求统一终极解释或理论。^[3]这种既强调学科多元又主张跨学科交叉整合的立场,被用来分析交叉科学的本质、机制和挑战。^[4]但也遇到诸多批评,包括:它过于强调语境敏感性;^[5]整合可能牺牲解释内在关联性,长期依赖整合性多元主义会阻碍系统性与深度理解,尚未阐明交叉整合的具体路径。^[6]尽管遇到争议,整合性多元主

义作为分析交叉研究的理论框架,依然受到肯定。留下的问题是,科研人员在实践中整合不同解释尺度的过程、标准与认知价值是什么?如何在强化整合性多元主义实践的同时,缓解其固有的哲学困境?

为此,本文将首先辨析整合性多元主义的哲学立场,分析其优势和存在的问题,指出介观尺度是研究学科交叉实践中的理论承诺与认识论差异的切入点。接着以聚集诱导发光(Aggregation-induced Emission, AIE)这一前沿交叉研究领域的诞生与发展为例,分析科研人员如何以介观尺度为中心来识别不同解释尺度的认识论差异,并通过链接不同尺度来持续实现方法互补和认知迭代(epistemic iteration)。进而论证:整合不能自然实现认知迭代,通过科研人员的不同视角与方法在介观尺度的动态互动才能实现迭代,进而获得解释连贯性、推进理论深度。最后,本文期望提供一种比整合性多元主义框架更为细致的分析,来思考交叉研究中的重要互动方式,给出关于整合过程更全面的说明。

需要指出的是,本文的研究重点在于探讨不同解释尺度的沟通过程是如何推进交叉科学领域^①,希望理解成功的交叉整合实现的具体方式。为此,本文既不是简单描述科学实践中成功整合的实际案例,也不是从哲学角度评价什么是好的科学解释,或最终解释该现象的究竟是什么。综上,本文将着重分析介观尺度的解释如何沟通不同解释尺度,科研人员在寻求解释的过程中,方法、概念和工具等是如何被综合运用并实现认知迭代。

一、交叉科学实践中的整合性多元主义

交叉整合不同领域研究策略所具有的认知价值,已受到科学家和哲学家的广泛认可。^[7]但是不同领域的认知成果在交叉时如何实现整合(integration),一直是个哲学难题。笔者将首先分析整合性多元主义的不同主张,指出

①本文使用“交叉科学”一词,指一系列交叉研究领域与交叉学科的集合。

这些主张为理解交叉研究提供了富有希望的起点,但是远没有提供有效的交叉策略。

1. 三类主张

按照研究者对整合的程度、整合发生在哪些层面等问题的不同切入点,笔者将这些研究大致分为三类:局部与零散的整合性多元主义,跨视角的整合性多元主义,以及积极规范的多元主义。虽然有学者对科学多元主义者的不同立场进行了分类,^[8]试图寻找这些立场的共同特征,但笔者重点关注整合性科学多元主义,目的是考察这些不同的立场是如何讨论交叉整合。

第一类主张以米切尔为代表,既承认部分性又强调整合,^[9]认为对复杂现象的探究并没有一个终极统一理论,^[3]试图化解形而上学预设、认识论诉求与科学实践之间的落差。以蛋白质结构研究为例,由于其结构复杂,蛋白质结构研究中不同方法、模型和表征方式各自提供部分视角,这意味着没有单一的方法能够完全描述蛋白质的复杂结构。通过联合精修等方法,被认为可以整合不同数据,得到更准确和稳健的模型。^[10]不过,米切尔侧重于讨论复杂系统涌现性带来的部分性,对于整合究竟发生在什么层面、整合的具体过程并没有深入展开,整合的标准并不明确。另外,如果某一尺度的研究对于复杂系统没有因果贡献,联合精修这种方法也失去了意义。^[11]

第二类主张以马西米(Michela Massimi)为代表,认为科学视角是历史语境化的,不同视角可以相互交叉、评估和协调。当两个领域依赖不同经验或概念工具来解释同一现象的不同方面时,可以通过一个领域填补另一个领域的空白来实现整合。以高能物理领域不一致的科学模型能够彼此共存为例,她认为只要理解得当,众多看似互斥的模型在方法论上恰恰推进了科学前沿。^[12]卢比(Stéphanie Ruphy)也主张可兼容的多元主义和跨学科合作。^[13]不过,这类观点虽强调合作性整合、解决视角分歧,但是并没有具体阐明整合是否能够以及如何达成。

第三类是以张夏硕(Hasok Chang)为代表的积极规范的多元主义,主张不同类型的本

体论支持连贯的科学活动,强调分析科学实践中的不同认知活动与操作。^[14]在多元主义立场上,米切尔赞同张夏硕的积极实在论。^[15]王巍等学者肯定了科学多元主义,但认为“积极”与“规范”都不太恰当,互动(interactive)可能是更合适的态度。互动也包含竞争、合作与整合,科史哲的学者只需要成功“描述”认知多元主义在科学研究中的意义,自然就能发挥规范功能。^[16]与互动描述认知多元主义的主张类似,古德温(William Goodwin)通过分析量子化学与有机化学在交叉整合时受到策略约束和概念适应性难题,提出成功的互动需要不同领域技术和概念彼此适应。^[17]尽管如此,这类研究并非针对同一交叉研究项目或问题,也尚未讨论整合研究在认知上的重要特征是什么。

2. 整合层面、过程与价值

以上三类主张虽然都赞同科学研究有不同类型的认知活动,但侧重于说明整合对于解决复杂问题为什么是必要的,尚未清晰阐述整合发生在何种层面、整合具体是如何发生的,以及整合的认知价值是什么。涉及解释问题时,米切尔在强调整合的同时,也保留了彼此割裂且缺乏深层次联系的局部解释。马西米虽然强调不同领域的推进可以改进解释,但是弥合解释空白并不构成两个领域的整合。比如,分子生物学可以填补经典遗传学提出的机制中的“黑箱”细节,并且这样做可以改进经典解释,但并不一定会构成整合。古德温仅仅识别科学实践中的整合实例,并不足以获得整合应该包括什么的精确理解。尽管如此,这些工作均意识到,多元主义在讨论领域差异时可行,整合性多元主义是推进交叉科学研究的一种实用策略。

有关多尺度建模的讨论与新近的有关解释尺度的哲学研究,不约而同地注意到介观尺度,主张超越不同解释尺度的还原论、涌现等形而上学问题,转向科研人员在实际研究中所遇到的待解释问题。^[18],^[19]进一步地,伍德沃德(James Woodward)指出哲学研究应该多关注微观和宏观之间的中间尺度。中间尺度不是“原则上可省略”的,这种省略会忽略了科学实践的核心任务:为何科学实践中会出现介观特征。

真正有价值的问题是:为何科研人员在实际研究中需要并保留中间层?中间层如何促进科学成功?^[20]这些问题均有待解答。鉴于整合性多元主义被认为是推进交叉科学的实用策略,笔者将介观尺度视作研究学科交叉实践中理论承诺与认识论差异的切入点,来拓展已有研究对整合过程以及整合认知价值的缺失环节。

二、寻找不同尺度的解释

在辨析了整合性多元主义的优势与问题之后,笔者将通过考察科研人员围绕聚集诱导发光现象来寻求解释的过程中,遇到的三个相关挑战来论述不同视角和方法交叉的过程。在分析中,更加关注科研现实中的解释,并采用伍德沃德的干预主义解释进路,即:如果解释项中的因素以不同方式变化,被解释项将表现出何种差异。这些因素被称为差异制造者。

1. 聚集诱导发光:从微观到宏观

聚集诱导发光(AIE)现象是2001年科研人员偶然发现的反常现象。^[21]一类在溶液中不发光或者发光微弱的分子聚集后,带来发光增强而不是发光淬灭。这一发现相当令人惊讶,因为根据传统假设,分子聚集会出现荧光淬灭现象。此后,世界范围内的科研人员围绕AIE展开了研究。研究概念、研究机构均呈指数增长,研究领域涉及物理化学、纳米科学、分子生物学、材料科学、微生物学、药学、凝聚态物理、数学、能源与燃料、光谱等多个学科,并逐渐形成了聚集体交叉研究领域。^[22]

围绕AIE展开交叉研究的科研人员,有的关注哪些材料能够发光,有的关注如何提高材料的发光性能,有的关注发光现象涉及的双光子吸收效应如何应用到仪器、医疗和能源等领域。这些问题促使多个领域的科研人员探索不同尺度的因素如何影响发光。新现象与基于分子结构的传统荧光淬灭解释不符,除了分子聚集体这一介观尺度,还需要评估从微观尺度

到宏观尺度中的哪些因素会影响到发光。为此,AIE研究领域为本文在哲学层面探索不同解释尺度的交叉整合,提供了很好的案例。

2. 聚集为何会发光:寻找制造差异的因素

为了解释聚集为何会发光,科研人员开始合成一系列AIE小分子,比如四苯基乙烯和多芳基吡咯。小分子体系结构明确,化学、电学和光物理等性质相对简单,为寻找解释发光现象的差异制造因素提供支撑。按照经典的分子结构理论,在单个分子层级(level)^①对于结构与功能关系的传统解释,分子聚集会导致荧光淬灭。比如,芘分子由于具有一个高度共轭的平面大 π 键体系,共振稳定性很高。加入水后,芘分子会形成具有强 π - π 相互作用的激基复合物,导致荧光淬灭。为什么当噻咯衍生物聚集时,发光会增强?在这些实验的基础上,结合一系列聚集后发光的小分子结构,科研人员先提出分子内旋转受限理论。^[23]为了验证分子内旋转受限机制,科研人员通过两大类别的差异制造者来进行实验,使分子内旋转不容易进行。第一类是改变外部环境(降低温度、增大黏度和施加压力等),看它是否影响分子之间的相互作用,从而带来发光。第二类是对分子结构本身进行修饰,比如利用共价键等锁住外围的转子,比较分子内部结构是如何影响分子之间的相互作用。在这两类条件下,科研人员发现AIE分子发光增强,证实了分子内旋转受限是导致AIE效应的差异制造者。相比平面结构的芘分子,噻咯分子具有扭曲的螺旋桨构型,分子聚集时借助分子间和疏水相互作用限制了分子内旋转,从而聚集发光。

随着合成的AIE分子库增多,科研人员发现除了旋转,分子也可振动。旋转和振动都属于分子内运动,对AIE现象的解释从分子内旋转受限扩展至更通用的分子内运动受限模型,并将运动受限与能量耗散途径结合起来。即,孤立的有机分子从激发态回到基态时,能量耗散有不同的途径。在溶液中,碳-碳双键容易由

①在尺度(scale)和层级(level)的划分和使用上,本文采用巴特曼(Robert W. Batterman)的提法,将微观、介观和宏观视作不同尺度(scale),将光子、分子、细胞、天体等实体视作不同层级(level)。尺度的大小并不是绝对的,而是相对于研究现象和问题来界定。层级的数量也会因科研人员研究问题的不同而有所差异。

于分子内运动而非辐射地耗散激发态能量，因而不发光。在聚集态下，分子之间的相互作用使得碳-碳双键的扭转运动受到限制，抑制了非辐射跃迁，使得辐射跃迁通道打开，实现荧光增强。这种解释被称为聚集诱导辐射跃迁或抑制非辐射跃迁机制，被解释项相关的差异制造因素所在的尺度，是分子层级之上的聚集体。

3. 为何发光性能有差异：追踪并量化制造差异的因素

鉴于高效的发光材料在电子学、材料和生物学领域潜在的应用价值，针对AIE现象提出分子内运动受限解释后，科研人员试图从更精细的层面来回答为何会发光、为何发光性能有差异，希望能够提高材料的发光效率。要实现此目标，需要在不同制造差异的因素中，通过定量评估贡献，找出哪些因素具有相对重要性的影响，才能做出精细解释。

在哪些因素会影响分子从激发态回到基态的能量辐射方式上，科研人员根据实验结果提出了不同假设。这些影响因素包括：分子间的共平面性和相互作用、激发态的双键旋转受到限制而阻止顺反异构化、侧链基团会改变分子聚集形态、有机离子的形成。仅根据实验结果，科研人员无法评估这些影响因素的定量贡献，也无法比较孤立分子与分子聚集时能量耗散的途径、分子聚集时相互作用的方式对能量耗散的过程有何影响，为此，量子化学的理论推导与计算模拟方法被引入。

从第一性原理出发，将单个分子结构优化采用量子力学和分子动力学的方法，结合分子层级以下的电子结构、电荷分布、轨道、电子-振动耦合等信息，科研人员追踪、计算并比较影响分子发光量子效率的因素，定量得到分子激发态能量衰减速率常数，建立结构性能关系。计算化学的研究表明，空间位阻、温度变化和分子聚集会影响分子内转动受限，大幅度影响分子的无辐射衰减速率常数，而辐射跃迁常数却对这些因素响应很小。^[24]在此基础上，精细化了分子聚集后发光需要实现的条件，不仅支持了解释AIE现象的分子内运动受限理论，还实现了对分子聚集体的发光效率的定量预测。

为此，量子力学的计算方法通过深入到分子以下的微观层级来建立计算辐射跃迁常数的计算模型，构建了实验宏观可测量与微观物理量之间的联系。这种方法不仅以一种受控且精细调整的方式检验被解释项对特定候选解释项变量变化的依赖性，系统评估了根据实验所得出的一系列影响因素及其定量贡献，解释为何发光性能有差异，还对于聚集为何会发光给出了更加精细的解释。

4. 为何在不同尺度环境中能够选择性发光：解释重叠区域

在量子力学计算与聚集体层级解释的整合下，科研人员能够从结构来调控AIE现象，进而设计一系列新材料，从小分子拓展到大分子、共晶、聚合物等不同结构体系。^[23]在此基础上，如何才能让AIE材料在现实复杂环境（比如生理环境、大气环境）中实现选择性发光？复杂环境下的实用目标，对发光的要求从聚集体尺度拓展到了多尺度。

这些实用目标主要包含两类。第一类是开发具有应用价值的发光器件。比如光电材料，除了需要调控光物理性质，还要实现与电学、力学、声学或热学性能的协同效应。第二类是利用发光性能来进行生物检测或治疗。比如，近红外发光具有很好的生物组织穿透性，在生物成像领域有应用前景，则需要AIE材料在生理环境中响应周围环境变化，针对不同细胞器、细胞、组织结构或个体等温度环境或代谢差异，实现选择性发光。^[25]总体而言，这两类目标都需要解释复杂环境中的协同效应与发光的动态过程。

围绕如何解释复杂环境中的协同效应与动态过程，科研人员采用几种不同方式展开研究。^[26]共同特点是寻找解释的重叠区域。第一种是考虑到物质结合时的相互作用这一共同的解释因素。即，AIE材料与不同生命尺度的物质相互结合，与AIE聚合物分子间结合的相互作用。通过设计及结构调控AIE聚合物的骨架及侧链，针对不同细胞器、细胞或者组织结构及代谢差异，考察是否实现相应的选择性成像。比如，在微生物和哺乳动物生理环境下，增加

AIE聚合物的侧链可以选择性地实现与活性细胞结合。第二种是从抑制AIE材料分子内的作用出发,考虑到材料既可以作为电子空穴传输层又可以作为发光层,从而解释光电协同效应。第三种是反向设计,主动促进而不是抑制分子内运动,实现辐射与非辐射跃迁之间的平衡以最大化地利用激发态能,从而解释单分子多模态诊疗的动态过程。

以上三种方式,都是通过寻找解释的重叠区域来获得解释。这些工作,通过协同解释光与其他效应,从解释单一的发光行为拓展到解释不同环境尺度中的选择性发光,拓展了解释的应用范围。另一方面,通过调控分子在聚集状态下运动程度来控制衰减时间,从而解释光动力学过程,拓展解释了为什么同一种AIE材料在不同环境下表现出不同的光物理行为,提高了解释的精度与效力。此外,有一些工作虽然没有直接促进对AIE现象的解释,但是在解释协同效应的过程中间接促进了其他领域展开理论研究,比如生物组织的光成像机制,光物理学、材料学、医学、分子生物学、诊断学等。总之,围绕实用目标展开的解释,虽然依然还是围绕分子内运动受限这一核心解释展开,但是解释的精度与效力得到提高,解释的范围与领域得到拓展。

三、解释尺度互动带来认知迭代与交叉整合

本文旨在深化对交叉实践中整合层面、过程与价值的哲学理解。因此,在探讨交叉研究中寻求解释给交叉整合所带来的具体价值之前,有必要简要回应一个前提性问题:这些解释究竟为何能够推动真实科研实践中的互动交叉。

聚集为何发光、为何发光性能有差异、为何在不同尺度环境中能够选择性发光,这三个阶段所寻求的解释呈现递进性。每个阶段都可以视作寻找、追踪以及定量判断解释项中差异制造者的贡献。但是在科研实践中,每一阶段所真正能够涉及的待解释问题深度与解释尺度,受限于科研目标、认识论标准以及合适的

方法。AIE现象虽是化学领域的科研人员最早发现并展开研究,但它没有发生化学变化,是光物理现象,由分子层级之上的聚集体层级所产生。这意味着,AIE现象在发现之初,便是一个跨学科、跨解释尺度的交叉领域。

在三个寻求解释的阶段,求真与实用的目标使得科研人员对解释的要求逐渐精细、解释尺度逐渐增加,进而带动不同方法交叉互动,互动过程中又拓展了解释的范围、提高了解释效力与连贯性。具体而言,在第一阶段,围绕为何聚集诱导发光而不是发光淬灭这一反常现象,光物理技术用于测量发光强度、效率和寿命,合成实验用于获得不同结构分子,两者结合后被用于寻找差异制造因素。科研人员将宏观结果与经典分子结构结合,在理论上推理出分子运动受限这一解释。而在第二阶段,寻求解释一致性的求真要求与将AIE材料实用化的目标,共同推动科研人员解释为何发光性能有差异。量子力学计算模拟方法被用来追踪并量化差异制造因素,科研人员在实验结果与微观尺度解释上建立联系,对影响因素进行定量评估,实现预测发光效率的目标。量子力学计算在微观尺度、分子层级与聚集体这一介观尺度之间建立链接,量子力学计算结果能够被用来拓展解释聚集诱导磷光、聚集诱导延迟荧光等新现象,增强了解释的预测性、精度、内在一致性和连贯性。在第三阶段,科研人员希望扩大AIE材料在真实复杂环境下的应用范围、实现光与其他效应的复合功能,于是寻求解释复杂环境中的协同效应与发光的动态过程。实验方法与电子结构理论计算、分子动力学模拟、光动力学分析等精密化方法发生互动,让科研人员能够以更加多元、有效与精确的方式来探索AIE材料为何在动态、多尺度的复杂环境下选择性发光,在这个过程中展开交叉研究。结果是,从解释单一的发光行为拓展到解释不同环境尺度中的选择性发光,从解释发光效率拓展到解释光动力学过程,拓展了解释范围、进一步提高了解释精度与效力。

接下来的问题是,认知迭代和获得理论深度是如何发生的?第一阶段基于实验与分子结

构层级对AIE现象的解释,科研人员能够从利用分子运动受限理论来设计不同的结构。第二阶段将实验结合量子力学计算给出的定量解释与预测,使得科研人员迭代为从结构来调控AIE现象。第三阶段对协同效应与动态过程的解释,让科研人员能够理解真实复杂环境如何在不同尺度影响分子之间的作用以及分子内部运动,最终将分子运动受限理论与不同尺度的现象结合,实现认知进一步迭代,能够设计多功能材料并用于器件和诊疗。也就是说,不同阶段的解释不仅促进了交叉研究中的理解,还让科研人员能够利用解释来实现实用目标。与此相对应的是,通过认知迭代,分子运动受限理论提高了预测精度,在拓展检验范围的过程中提高了一致性与广泛性,该理论还通过应用来丰富了实用性成果。综合而言,对聚集诱导发光现象提供了丰富且相互关联的理解,既阐明宏观背景,又揭示微观机制,从而获得理论深度。值得注意的是,认知迭代不一定直接带来理论深度,因为解释和真理并非科学研究的唯一目标。但是交叉研究面向的实用目标会推进与解释性目标相关的科学理解,比如合成新的具有选择性发光性能的材料,用于诊断和治疗,从而获得新尺度上的动态信息,建立了系统性关联,从而推进理论深度。

简而言之,整合的前提是方法、概念或视角的多样性,但是整合并不能自动发生。当真实的科研面向现实问题时,对解释的要求逐渐精细、解释尺度逐渐增加,通过聚焦于待解释的问题与现实目标来进行方法互动、认知迭代才能实现真正的整合。如果不经过程认知迭代,对同一个现象的不同解释可以并行、解释也不是越全面越好,比如关于吸血蝙蝠共享食物行为,两者解释的是同一行为,但解释内容不同,且互不替代。

四、介观尺度链接交叉科学中的多尺度

解释尺度整合实现的层面和价值是什么?在新近的哲学讨论中,人们认识到解释相关的变量通常位于介观尺度上。^[18],^[19]伍德沃德也

指出选择适当的变量是一个科学问题,而不是哲学问题。^[27]为何科研人员在实际研究中需要并保留中间层?中间层如何促进科学成功?从干预主义的反事实解释进路出发,本文将结合交叉科学实践中科研人员的务实性选择,提出并论证:介观尺度是整合交叉研究的适当层面。除了在介观尺度可以找到影响被解释项的稳定性、稳健性或可预期性的变量,还缘于科研人员获得这些变量的可用性,利用介观尺度来向微观与宏观拓展。

在AIE案例中,分子运动受限理论最早是基于聚集体这一介观尺度提出。科研人员从有机分子的经典结构理论来分析分子之间的作用方式,进而推理性解释聚集诱导发光而不是淬灭现象。介观尺度的分子结构这一变量不仅具有稳定性,还由于结构模型可提高理论的可理解性。^[28]科研人员不需要复杂计算就可以利用它进行推理、调控结构并设计实验,实验结果既可以结合量子力学计算模型来沟通向下的微观尺度,又可以结合光动力计算等方法来沟通向上的生命与材料宏观尺度。如上文所述,在寻求为何在不同尺度环境中能够选择性发光的解释时,科研人员依然还是从影响分子之间的相互作用因素出发,要么考虑AIE材料与其他环境物质的结合如何影响分子之间相互作用,要么考虑抑制AIE材料分子内作用,要么反向设计、主动促进而不是抑制分子内运动。总之,利用聚集体层级的分子运动受限,科研人员既容易通过适当的方法来获得与分子结构相关的稳定变量,还可以调控分子的运动程度,实现材料的选择性发光性能。

虽然交叉科学日益受到重视,但是如何支持交叉科学实践的哲学贡献依然有待丰富。在交叉中存在分歧或差异的不是科学知识,而是方法与辩护原则。面对不同视角带来的实验结果分歧,米切尔提出联合精修法来进行整合,比如通过互校系统性误差,在无重叠区域判断不兼容,在重叠区域缩小不确定性,从而获得比单一方法更精确的预测。^[15]科研人员利用米切尔提出的联合精修法来分析蛋白质结构,结果却表明精修效果关键取决于晶型本身,^[29]而

不是利用X-射线与核磁共振两种检测方法来实现互补。为何联合精修法失效?本文认为,原因在于这两种方法背后依赖同一解释尺度,联合精修并没有促进对生物大分子结构的解释深度。与米切尔的主张不同的是,本文提出不仅要找出重叠区域,还要找到合适的解释尺度重叠区域。当下可行的重叠区域是介观尺度。介观尺度可以作为协调交叉科学中认识论差异的桥梁,通过中间向外拓展的策略,既能联系微观尺度的基础理论,又能对接实验数据,还能作为探究工具来启发宏观尺度的应用。这一方法论不仅出于实用,更是理解复杂多尺度系统组织与功能特征的认知必要。

在讨论了交叉研究中的解释尺度与认知迭代问题后,本文尝试回应开篇提出的AI与科学结合为何会出现错位问题。AIE领域在推进交叉研究之初遇到的困难,与AI结合科学不足的几个领域具有共同性:学科与交叉要对应的解释尺度之间的矛盾。正是因为这些挑战,2024年AI驱动的蛋白质研究中,蛋白质功能预测所占比例(8.4%)和结构预测所占的比例(7.6%),要远远高于合成蛋白质设计(0.7%)。^[30]要依据结构与功能的关系来设计蛋白质,使其在动态体系和环境中实现特定功能,并非易事。解决蛋白质复杂功能问题,还需要多学科的多种方法和模型结合来提供整合性视角。以不对称合成为基础的点击化学具有很强的跨学科影响力,^[31]但不对称方法在用于工业化合成时会遇到尺度效应,降低合成成本依然面临困难。也是因为跨尺度的困难,多数AI方法与科学结合,依然停留在原子或分子的官能团尺度,缺乏对复杂问题进行解释。^[32]

为此,AIE领域围绕介观尺度展开探索并整合交叉研究的案例,给我们如下启示。首先,交叉研究应打破原有的不同学科对应不同解释尺度或者解释实体的划分,以介观尺度作为桥梁,推进不同学科方法互补与认知迭代。其次,今天的科研模式在强调数据和计算工作时,不能忽略实验室工作在沟通不同解释尺度之间的重要性。合成实验贯穿AIE研究中不同解释尺度的始终。AI与科学的结合,不能局限于优化

对现有数据的分析,还需要有能够扩展感知与实验能力的AI系统,使科学家能够从以往无法触及的领域采集新型数据。再者,AIE中不同解释尺度的变量整合,与数据的自发整合不一样,还涉及要实现的目标、方法、变量的可及性与可用性、解释与模型的可理解性。为此,AI驱动科研的过程中,还要考虑数据如何给所对应的不同解释尺度提供证据,以及解释自身的探索性作用和实用价值。机器在科学发现中增强了人类的部分认知能力,而不是对人类原有认知方法的模拟。^[33]总之,AI与科学的结合还要以理解科学发现自身的轨迹为基础,特别是科学家在处理复杂多尺度系统时选取的认知策略与方法。

需要承认的是,本文并非要为交叉科学提供一种整体性的解决方案,也不仅仅是描述成功的交叉整合是如何发生,而是针对当下的交叉实践中遇到的解释尺度难题、整合性多元主义作为交叉研究策略时遇到的哲学困境,为整合性多元主义做出一种局部性的辩护并进行修正。整合性多元主义依然是分析交叉研究的一种有效框架,但是整合的过程需要依赖具体的解释尺度来进行认知迭代,才能不牺牲理论深度与解释内在关联性,真正实现学科交叉,带来交叉科学群。

[参考文献]

- [1] Hao, Q., Xu, F., Li, Y., et al. 'Artificial Intelligence Tools Expand Scientists' Impact but Contract Science's Focus' [J]. *Nature*, 2026, 649(8099): 1237-1243.
- [2] Wang, H., Fu, T., Du, Y., et al. 'Scientific Discovery in the Age of Artificial Intelligence' [J]. *Nature*, 2023, 620(7972): 47-60.
- [3] Mitchell, S. 'The Landscape of Integrative Pluralism' [J]. *Theoria*, 2023, 38(3): 261-297.
- [4] Robinson, B., Gonnerman, C., O'Rourke, M. 'Experimental Philosophy of Science and Philosophical Differences Across the Sciences' [J]. *Philosophy of Science*, 2019, 86(3): 551-576.
- [5] Bolinska, A. 'A Monist Proposal Against Integrative Pluralism About Protein Structure' [J]. *Erkenntnis*, 2024, 89(4): 1711-1733.
- [6] Milkowski, M. 'A Delicate Balancing Act: Integrative

- Pluralism and the Pursuit of Unified Theories'[J]. *Foundations of Science*, 2025, 30(4): 905–924.
- [7] Milkowski, M., Hohol, M. 'Explanations in Cognitive Science: Unification Versus Pluralism'[J]. *Synthese*, 2021, 199(1): 1–17.
- [8] Pascual-Alba, J. 'What is It Like to Be a Scientific Pluralist? Looking for the Lowest Common Denominator as a Way Towards a Positive Stance'[J]. *Synthese*, 2025, 206(5): 234.
- [9] Santos, G., Vallejos, G., Vecchi, D. 'A Relational-constructionist Account of Protein Macrostructure and Function'[J]. *Foundations of Chemistry*, 2020, 22(3): 363–382.
- [10] Mitchell, S., Gronenborn, A. 'After Fifty Years, Why Are Protein X-ray Crystallographers Still in Business?'[J]. *British Journal for the Philosophy of Science*, 2017, 68(3): 703–723.
- [11] Deulofeu, R., Suárez, J. 'Pluralism and Complexity Without Integration? A Critical Appraisal of Mitchell's Integrative Pluralism'[J]. *Theoria*, 2023, 38(3): 299–317.
- [12] Massimi, M. 'Perspectival Modeling'[J]. *Philosophy of Science*, 2018, 85(3): 335–359.
- [13] Ruphy, S. *Scientific Pluralism Reconsidered: A New Approach to the (Dis)Unity of Science*[M]. Pittsburgh: Pittsburgh University Press, 2016, 33.
- [14] Chang, H. 'Epistemic Activities and Systems of Practice: Units of Analysis in Philosophy of Science After the Practice Turn'[A], Soler L., Zwart, S., Lynch, M., et al. (Eds.) *Science After the Practice Turn in the Philosophy, History, and Social Studies of Science* [C], New York: Routledge, 2014, 67–79.
- [15] Mitchell, S. 'Through the Fractured Looking Glass'[J]. *Philosophy of Science*, 2020, 87(5): 771–792.
- [16] 王巍、乔宇. 张夏硕科史哲思想评析[J]. 自然辩证法研究, 2024, 40 (11) : 102–108.
- [17] Goodwin, W. 'Strategic Constraints on Interacting Fields: Quantum Chemistry and Organic Chemistry'[J]. *Philosophy of Science*, 2024, 91(5): 1058–1067.
- [18] Rice, C. 'Beyond Reduction and Emergence: A Framework for Tailoring Multiscale Modeling Techniques to Specific Contexts'[J]. *Biology & Philosophy*, 2024, 39(4): 12.
- [19] Batterman, R., Green, S. 'Steel and Bone: Mesoscale Modeling and Middle-out Strategies in Physics and Biology'[J]. *Synthese*, 2021, 199(1-2): 1159–1184.
- [20] Woodward, J. 'Some Reflections on Robert Batterman's a Middle Way'[J]. *Studies in History and Philosophy of Science*, 2024, 106: 21–30.
- [21] Luo, J., Xie, Z., Lam, J., et al. 'Aggregation-induced Emission of 1-methyl-1, 2, 3, 4, 5-pentaphenylsilole'[J]. *Chemical Communications*, 2001, (18): 1740–1741.
- [22] Zhu, J., Jiang, X. 'How Does Aggregation-induced Emission Aggregate Interdisciplinary Research?'[J]. *Aggregate*, 2024, 5(2): e451.
- [23] Mei, J., Leung N., Kwok, R., et al. 'Aggregation-Induced Emission: Together We Shine, United We Soar!'[J]. *Chemical Reviews*, 2015, 115(21): 11718–11940.
- [24] Zhang, T., Ma, H., Niu, Y., et al. 'Spectroscopic Signature of the Aggregation-Induced Emission Phenomena Caused by Restricted Nonradiative Decay: A Theoretical Proposal'[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2015, 119(9): 5040–5047.
- [25] Tu, Y., Zhao, Z., Lam, J., et al. 'Aggregate Science: Much to Explore in the Meso World'[J]. *Matter*, 2021, 4(2): 338–349.
- [26] 韩鹏博 等. 聚集诱导发光[J]. 化学进展, 2022, 34(1): 1–130.
- [27] Woodward, J. 'The Problem of Variable Choice'[J]. *Synthese*, 2016, 193(4): 1047–1072.
- [28] 朱晶、姜雪峰. 化学研究中的结构模型: 理论化与科学理解的工具[J]. 哲学分析, 2023, 14 (6) : 153–166.
- [29] Schiro, A., Carlon, A., Parigi, G., et al. 'On the Complementarity of X-ray and NMR Data'[J]. *Journal of Structural Biology: X*, 2020, 4: 100019.
- [30] Maslej, N., Fattorini, L., Perrault, R., et al. 'The AI Index 2025 Annual Report'[EB/OL]. <https://hai.stanford.edu/ai-index/2025-ai-index-report>. 2025–04–26.
- [31] Zhu, J., Chen, M., Liang, H., et al. 'Research Strategies in Click Chemistry: Measuring Its Cognitive Contents and Knowledge Flow'[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2023, 34(2): 107936.
- [32] Wu, Z., Chen, J., Li, Y., et al. 'From Black Boxes to Actionable Insights: A Perspective on Explainable Artificial Intelligence for Scientific Discovery'[J]. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 2023, 63(24): 7617–7627.
- [33] 贾玮晗、董春雨. 机器可以实现科学发现吗?——机器智能在科学发现中的价值与限度[J]. 北京师范大学学报(社会科学版), 2025, (1) : 151–158.