arXiv:2611.30521v1 [cond-mat.stat-mech] 23 Nov 2026

# 没有通信、记忆或共享上下文的语言模型所产生的集体秩序

Yong Wang

物理与材料系，香港理工大学，

中国香港九龙红磡，999077，中国

physics-yong.wang@polyu.edu.hk

**物质无需中心即可形成有序：各单元只与邻居相互作用，涨落则使它们跨越能量势垒，从局部稳定的排列转变为有序状态。我们探究语言模型智能体能否做到同样的事：将每次无记忆查询视为一个粒子，它能感知邻居，却不能通信，没有标识符或共享上下文，并且与其他粒子收到相同的问题。这样的粒子表现得仿佛处于零温度：告知它一条规则或一个温度后，它会返回最可能状态，而群体则可能冻结在局部极小值。因此，我们只给每个粒子一个目标和一枚由它自行设定权重的骰子，并测试了多个模型。其中一些模型即使处于局部最优，也会将骰子用作噪声源，且骰子权重会随移动的能量代价增加而降低；在晶格上，其中一个模型的能量会越过势垒并达到基态，此时噪声会自行停止。三车道对向流中的粒子也会形成有序状态，从混合交通转变为单向车道：这是一种自发的对称性破缺。因此，即使没有通信、记忆或共享上下文，去中心化集体有序也能从无序中产生，而噪声由粒子自行选择。**

无中心的有序现象在自然界中十分普遍。磁矩会在低于某个临界温度时形成有序状态；在噪声作用下，仅与邻居对齐的自驱动粒子会像鸟群一样移动[1–3]；这类活性系统本身已发展成为一个独立领域[4,5]。动物也如此：椋鸟会对固定数量的最近邻作出反应，却能在整个鸟群中形成关联[6–8]；随着密度升高，行进蝗虫会从无序转为有序[9]，；少数知情个体便能在没有信号或公认领导者的情况下引导群体[10,11]。在每种情况下，相同的单元都遵循同一条局部规则，而整体却形成了任何单个单元都不具备的有序状态[12]。涨落决定有序是否出现。在受挫系统或玻璃态系统中，涨落的作用更进一步：它们让单元偶尔采取一种并非对自身最有利的

状态，使困在局部最优排列中的区域得以逃脱；模拟退火正是将这一效应转化为一种通用优化方法[13]。在凝聚态物理中，热涨落也能让粒子协同运动：模拟显示，原子会在过冷液体、超离子导体和受压晶体中协同重排[14–16]。没有涨落，就会留下两个本可由中心消除的障碍：在相同观察结果下同时采取确定性行动的相同单元无法打破对称性[17,18]，；而各自选择最佳选项的单元，则可能陷入集体任务的局部最优状态。

大语言模型（LLM）智能体的集体已经以多种方式组织起来，统计物理学的工具也开始应用于其中[19]。人们研究了采用共享账本、任务队列或自主选择的角色的去中心化设计[20–22]，也研究了环、循环和网络中的智能体[23–25]，以及用于开放式搜索的系统——其中一个程序负责评估、选择或验证候选项[26–28]。LLM 智能体能否像物质一样形成有序状态，取决于它们是否具有波动源，这一点与物质相同。语言模型难以从用文字表述的分布中进行良好采样[29–31]，提高采样温度也无法修复这一点[30,31]：它会改变答案的措辞，却不会改变选择成本更高选项的频率（补充章节 S8）。人们曾使用外部提供的噪声，让智能体能够进行采样[31–33]；也曾向零和博弈的参与者提供均匀随机的建议，参与者可以选择遵循或忽略该建议[34]。人们还研究了方格晶格上的相同无记忆智能体：每个智能体都能看到自己的四个邻居，且不设置任务，并将采样温度作为控制参数[35]。据我们所知，目前尚未解决这样的问题：如果无记忆智能体只能看到邻居，且设计者不提供消息、标识符、共享上下文或噪声，它们能否形成有序状态；此外，当它们自身的答案不发生变化时，一个在没有任何使用规则的情况下提供的骰子，是否会在需要它的地方被掷出。

我们以最简形式提出这个问题，将每个智能体视为一个粒子：它没有记忆，不接收任何消息，也不携带标识符或共享上下文；每个粒子收到的查询都相同，查询只向它展示自身状态及其邻居的状态。由于粒子只能看到自己的邻域，因此在构建任何集体之前，我们可以逐个测量粒子的响应，并将集体表现与该响应所作的预测进行比较。我们不预先规定噪声：我们为粒子设定一个目标，并给它一颗骰子——一种按答案中给出的权重掷出某个选项的工具；至于是否掷骰、采用哪些权重，以及是否遵循掷骰结果，则由模型决定。我们比较了来自四家供应商的四个模型：DeepSeek V4.1 Flash、Qwen3.8-27B、GPT-6.2 Astra 和 Claude Opus 5.5。

答案分四步得出。用文字陈述的规则或温度不起作用

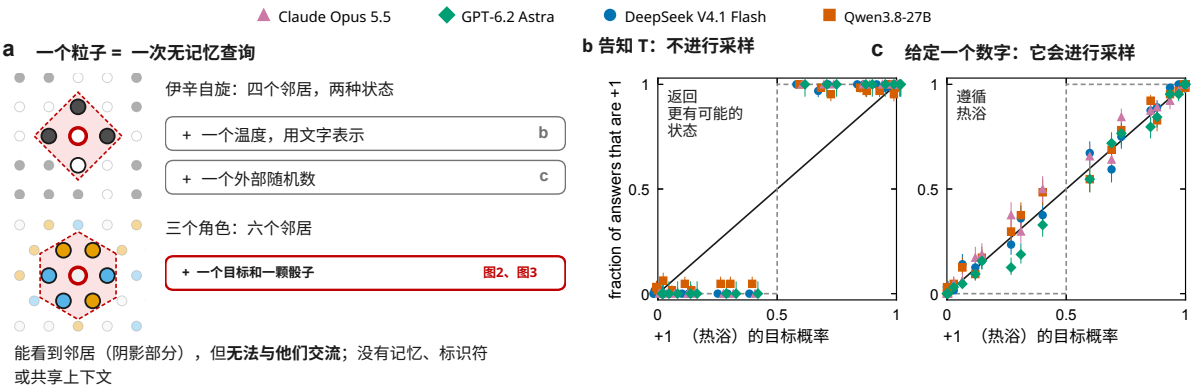



图1： **语言模型粒子，以及为什么词语无法提供其涨落。a**，每个粒子在每次更新时都会收到重新发送的同一条查询，其中只显示它自身的状态及其邻居的状态（阴影部分）；它无法通信，也没有记忆、标识符或共享上下文。上方为伊辛自旋（四个邻居、两种状态），用于 **b** 和 **c**；下方为三角晶格上具有三个角色的粒子（图 2 和3）。**b**，告知温度的伊辛自旋 $T$ 在热浴动力学下：答案的比例 $+1$ 与热浴概率 $p_+ = 1/(1+e^{-2h/T})$（对角线）的关系，其中 $h$ 是四个邻居自旋之和；虚线表示概率较高的状态。**c**，使用外部程序提供的均匀随机数时的相同情况。 $T$ 和 $h$ 见方法。

，会让每个模型的答案都停留在最佳选项上；而从外部提供的随机数，只能让模型计算出其设计者早已知晓的规则。给定一个目标和一枚骰子，所测试的四个模型中，有一个模型会在掷骰时系统性地停留在局部最优，但代价是增加一次冲突——也就是上文所述的第二个障碍；它的单粒子速率还能预示哪些模型的晶格会形成有序结构。在由 81 个粒子组成的晶格上，该模型的两次运行结果与预测一致：冲突数量越过势垒后上升，随后降至零，掷骰过程也停止。车道中彼此相向移动的粒子能够从混合交通中分流，形成单向车道，这是一种自发对称性破缺；实现这一点并不需要骰子，但骰子能让一个答案会重复出现的模型中的交通流动得平滑得多。在每一步使用骰子时，是否掷骰以及采用何种权重，都交由粒子决定。

## 外部传入的噪声

每个粒子都会收到相同的查询，查询只向它展示自身状态及其邻居的状态 [图 1a]。模型对某个特定名称或位置的偏好无法解释这里报告的顺序：在每项集体任务中，选项的名称以及邻居的列出顺序，都会在每次查询中随机抽取（方法和补充材料第 S14 节）。我们首先测量二维伊辛模型中的单个自旋。根据评分规则，每个模型在 256 次查询中的 256 次都会采用其邻居中的多数状态：在给定规则下，智能体总是选择更优状态，就像零温度下的粒子一样（补充图 S1）。措辞不会改变这一点。告知它自己是处于温度 $T$ 热浴动力学

下的自旋[36]，，即自旋按照其玻尔兹曼概率取各状态的规则，每个模型在每个温度下都会返回概率更高的状态，尽管 DeepSeek V4.1 Flash 和 Qwen3.8-27B 在其推理中陈述了正确的玻尔兹曼概率 [图1b]；当被要求在两个同样优越的状态之间随机选择时，模型给出的是依赖标签或确定性的答案，而不是像抛硬币那样随机（补充图 S1）。许多回复，或随附的推理，都给出了原因：热浴概率计算正确，但没有可用的随机数来使用该概率；正如一条回复所说：“我这里没有随机数生成器，所以我选择了概率更高的结果，而不是抽取一个真正的随机样本”（补充材料第 S7 节）。在这些测试中，每次根据给定规则都有一个答案最优，而模型的答案也不会变化；至于在多个移动几乎同样优越时答案是否会变化，下面对移动粒子的讨论将对此进行说明。

波动可以从外部提供。智能体从外部程序获得工具返回的均匀随机数，将其与热浴概率进行比较，它们的选择便落在热浴曲线上 [图1c]。

但以这种方式获得噪声的粒子，并没有带来设计者未曾指定的任何东西。噪声的形式、大小及其作用位置，都由我们以集中式的方式预先设定；模型只需为每次更新执行一次查询，评估一条已知规则，而一行代码就足以完成这件事。以往为语言模型智能体引入随机性，都是通过从外部提供随机数或随机搜索循环来实现的[31–33]。因此，我们不再指定噪声。

## 让模型来掷骰子

我们只给智能体一个目标和一颗骰子，其余都交由模型作答：是否掷骰、各个选项应采用什么权重，以及是否遵从掷骰结果。我们没有说明温度，也没有设定规则，更没有任何内容告诉智能体随机性应出现在哪里；骰子是噪声来源，模型可以使用，也可以忽略（详细提示词见方法）。这项任务会让贪心局部更新陷入困境。三角晶格上的每个粒子都承担三个角色之一，而与它角色相同的六个邻居中，每一个都算作一次冲突；冲突数相当于能量，也就是反铁磁三态 Potts 模型中的能量，因此无冲突状态的能量最低[37–39]。一个粒子若有一个邻居与自己角色相同，另两个角色则各有两三个邻居，那么它的冲突数已经最少，但仍有一次冲突[图 2a]。在这样的局部最优状态下，没有任何移动能降低能量，贪心粒子无法到达无冲突状态。提示词说明了目标——任何人都不应发生冲突——并提供了骰子（方法）。

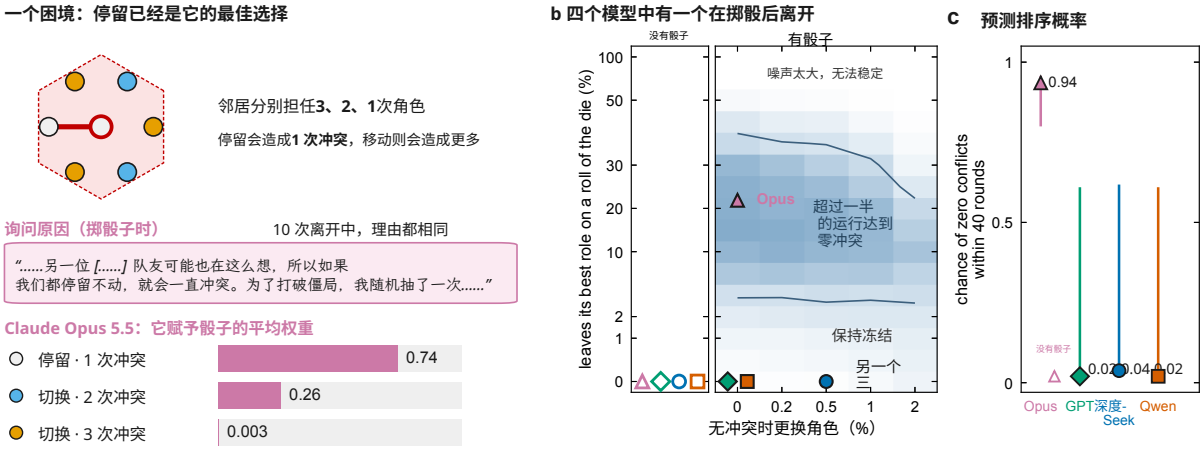



图 2：**给定目标和骰子的单个粒子。a**，局部最优：邻居分别持有三个角色 3、2 和 1 次，粒子持有最少的角色，因此停留会产生 1 个冲突，而切换会产生 2 或 3 个冲突（红色键，其冲突数）。柱形表示 Claude Opus 5.5 在 96 次查询中的平均骰子权重（不涉及掷骰的查询计为停留）。方框展示了询问理由时某条回复的一部分，其中[. . .] 代表角色字母（方法；完整回复见补充材料第 S12 节）。**b**，各模型在两个单粒子速率下的表现：无冲突时的角色变更，以及通过加权掷骰离开局部最优（方法）。实心表示使用骰子；空心、左侧条带表示不使用骰子。阴影表示参考规则在 40 轮次内达到零冲突的运行比例；线条表示一半运行；两轴在接近零处均经过拉伸。**c**，参考规则在各模型速率下给出的 40 轮次内达到零冲突的概率；线条表示离开速率 95% 区间的范围；空心表示不使用骰子的 Claude Opus 5.5 （补充表 S12 ）。

在运行完整晶格之前，我们逐个测量粒子，发现四个模型只有一个行为率有所不同。几乎没有粒子会在没有冲突时改变角色。在局部最优状态下，Claude Opus 5.5 在 96 次查询中有 21 次通过加权掷骰离开，而另外三个模型几乎从不离开；不提供骰子时，没有模型会离开 [图 2b；方法]。它在停留、增加一次冲突和增加两次冲突这三种选项上的平均权重分别为 0。74、0。26 和 0.003 [图 2a]：它大多选择停留，有时会迈出增加一次冲突的一步，几乎从不选择最糟糕的角色。若将其解读为玻尔兹曼因子，0。74:0。26 这一比值对应的有效温度 $T \approx 1$ 以一次冲突为单位，但不存在一个温度能同时符合这三个权重（补充材料第S3节）。在另外一组 96 次查询中询问其理由（方法）时，Claude Opus 5.5 在所有 10 条选择离开的回复中给出了相同解释：与自己角色相同的邻居看到的是同样的情形，因此如果双方都停留，冲突就会持续；而偏向停留的加权掷骰则会打破僵局，代价是多一次冲突 [图2a]。这就是引言中所说的对称性障碍。在晶格上，邻居不会同时更新，因此掷骰在此处的作用更简单：它让粒子离开局部最优状态。这种行为并非某一个模型独有：在对同一查询进行的几次非正式测试中，Gemini 4 Neon 也提出了一个权重随冲突数增加而降低的掷骰方案，并给出了相同理由；我们没有对其进行系统测试，供希望尝试其他模型的读者使用的提示词见方法。

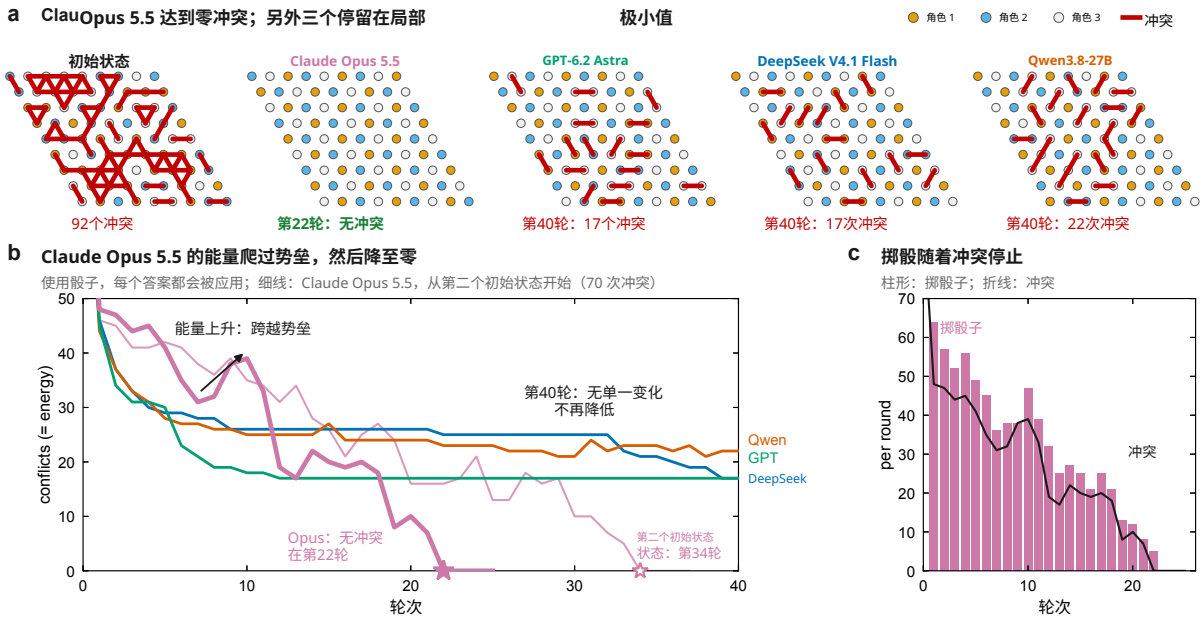



图 3：**晶格测试**。在带有目标与骰子提示词的 $9\times9$ 周期性三角晶格上放置 81 个粒子；四个模型使用相同的初始状态和更新顺序，并应用每个回答。红色键表示冲突，而非消息。**a**，初始状态，以及每个模型在结束时的状态（对于 Claude Opus 5.5，则为其第一个无冲突状态）。**b**，冲突数（能量）随轮次的变化；星号表示无冲突状态；细线表示 Claude Opus 5.5 从第二个初始状态开始的结果。**c**，Claude Opus 5.5：每轮掷骰的粒子（柱状图）和冲突（折线图）。

这两个比率预示了晶格中的情况。基于这种单粒子行为的参考规则（方法）显示，Claude Opus 5.5 在 40 轮内达到零冲突的概率为 0。94，而其他三个模型的概率最高为 0.08 [图 2c]。

## 跨越晶格上的势垒

我们在多个独立轮次中，让每个模型运行81个粒子，使其从相同的随机初始状态出发，按照相同的更新顺序运行于一个 $9\times9$ 周期性格点上 [图 3]。用 Potts 模型的术语来说，无冲突状态就是基态；如果不存在任何单次改变能降低冲突数量，那么该构型就是局部极小值，而要离开它，就需要暂时增加冲突数，即跨越势垒。GPT-6.2 Astra、DeepSeek V4.1 Flash 和 Qwen3.8-27B 迅速下降，在第40轮时处于局部极小值，冲突数分别为17、17和22 [图3a、b]。Claude Opus 5.5 通过加权掷骰离开局部最优，在这类更新中约四分之一的情况下会如此；而几乎每次使某个粒子的冲突数增加的移动，都是由这种掷骰产生的（方法；补充材料第S3节）。因此，它的能量会跨越势垒后上升并降至基态：在第22轮达到基态，而从第二个初始状态出发时，则在第34 [图 3b]。在那里，掷骰停止了 [图 3c]：它从未在存在冲突的情况下掷骰（补充材料第S3节）。

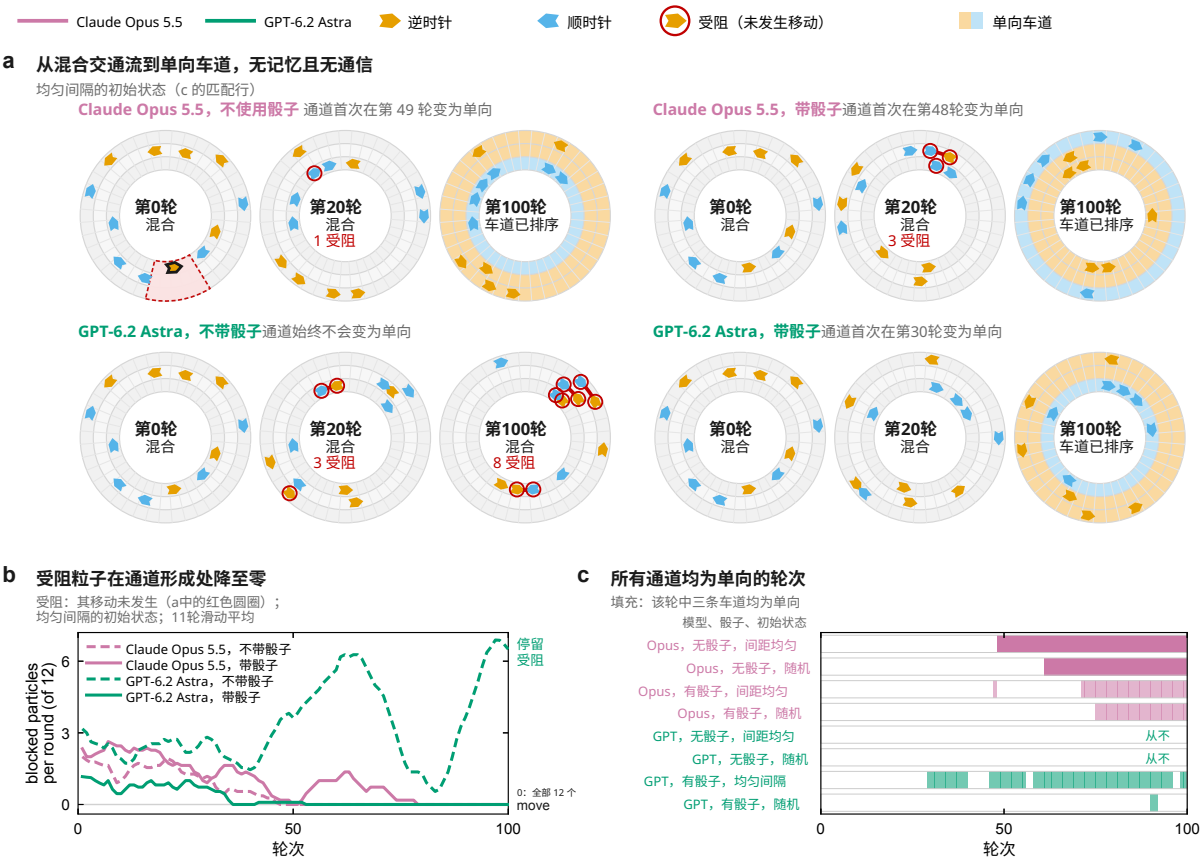



图4：**从无序到集体车道**。在由三条车道组成的周期轨道上放置12个粒子，轨道有40个单元格，以三个同心圆环表示；每个方向有六个粒子。每个粒子都能观察前后两个单元格范围内的三条车道（粉色扇区），且没有记忆，也没有通信。两种初始状态：均匀间隔，即在环上12个等分区段中各放置一个粒子，每条车道的每个方向各有两个粒子；以及随机状态，即随机选取12个单元格，其中存在若干冲突（方法）。**a**，均匀间隔初始状态下第0、20和100轮的快照（随机初始状态见补充图 S8）。红色圆圈表示受阻粒子，其移动在该轮未能发生；着色车道表示每条车道均为单向。不同运行最终形成不同的车道方向分配。**b**，均匀间隔初始状态下每轮受阻粒子数（11轮滑动平均）；与图3b中的冲突相对应。**c**，所有八次运行中三条车道均为单向的轮次（填充）。时空图见补充图 S7。

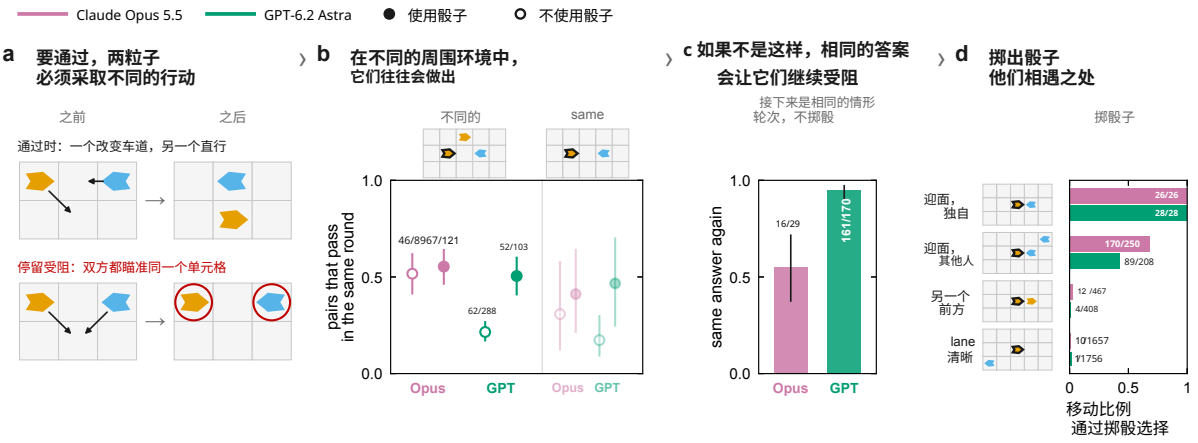



图5： **为什么无需骰子也能形成车道，以及骰子何时发挥作用。** 图4的运行，合并两种初始状态；小网格展示粒子（粗体）所看到的情形；各面板依次展开一个从 **a**到 **d**的论证。 **a**，两个粒子迎面相遇时，只有移动方向不同时才能通过；若做出相同移动，则会受阻（红色圆圈）。 **b**，在两者看到不同周围环境或完全相同单元格（后者较少，以淡色显示）时，同一轮次内通过的粒子对（至少有一个粒子移动）；实心表示使用骰子，空心表示不使用骰子；误差线为95%威尔逊区间。 **c**，不使用骰子时，受阻粒子在下一轮遇到相同情形时，给出相同答案的频率。 **d**，使用骰子时，各种情形下通过掷骰选择移动的比例。

## 从无序到集体车道

集体行为是自然界中最普遍的有序形式之一。昆虫群、鸟群和人群会组织自身的移动，尽管每个成员只对邻居作出反应，既没有领导者，也没有全局计划[6,9,40]，；类似的最简模型描述了从单元和细菌到人群的集体运动[1,4,5]。因此，对于无法交流的粒子而言，这是检验它们的局部选择能否汇聚成协调运动的天然对象。十二个粒子沿着三条并列车道运动，每个方向各有六个，轨道长40个单元格，并采用周期性边界，因此粒子从一端离开后会从另一端重新进入；图4因此将轨道画成一个环，车道则画成三个同心圆；每个粒子都能看到前后各两个单元格范围内的三条车道，并可选择向前移动一个单元格、向前移动一个单元格并进入相邻车道，或停留 [图4a]（详细提示词见方法）。移动到被占据的单元格、两个粒子移动到同一单元格，以及两个粒子的移动路径交叉，都不会发生，并计为一次冲突；共同目标是让每个粒子尽可能平稳地移动，同时尽量减少冲突。当每条车道上都只有一个移动方向时，流动便是有序的，如逆向行走的行人和驱动胶体形成的车道[40,41]，；而强噪声则会使流动受阻[42]。我们让 Claude Opus 5.5 和 GPT-6.2 Astra 在有骰子和无骰子的条件下，分别从间距均匀的初始状态和随机初始状态出发运行100轮；两组提示词仅有一句话不同，即是否提供骰子；其他运行的动画随代码一并提供（方法）。

在　在这些运行中，没有记忆、也没有通信的粒子将混合交通流整理成　o

单向车道 [图4a]。从均匀间隔的初始状态出发，在四种条件中的三种下形成了通道：Claude Opus 5.5 使用和不使用骰子时，以及 GPT-6.2 Astra 使用骰子时；从随机状态出发，Claude Opus 5.5 的两次运行都完成了排序 [图4c；补充图 S8]。在最终完成排序的五次运行的最后 20 轮中，每个粒子在每一轮都移动。排序是对称性的自发对称性破缺：没有任何因素规定哪条车道承载哪个方向，五次完成排序的运行最终形成了不同的分配，其中内侧车道在两次运行中承载逆时针方向，在三次运行中承载顺时针方向 [图 4a、c]。晶格同样具有多个等价的基态；在这两种设置中，这些都是对小型系统的观察结果。

形成车道并不一定需要骰子，但它能让 GPT-6.2 Astra 的交通流顺畅得多：从任一初始状态出发，没有骰子时，平均每轮有十二个粒子中的约三个无法移动，而且车道始终无法排列整齐；有骰子时，无法移动的粒子不到一点五个 [图 4b；补充表 S2]。无法移动的粒子在晶格上扮演着冲突的角色 [参见图3b]。

大多数相遇并非死锁——只有随机选择才能解决的情形——因此即使没有骰子，也能形成通道 [图 5]。两个粒子在同一车道上迎面相对、相距相邻或隔一个单元格时，便会迎面相遇；只有当它们的移动不发生冲突时，才会彼此通过：例如一个变换车道而另一个直行；而如果它们都瞄准同一个单元格，比如都变道进入中间车道的同一个单元格，那么双方都不会移动 [图 5a]。在大多数相遇中，两个粒子看到的周围环境并不相同，例如只有其中一个能看到第三个粒子，因此同一提示词呈现给它们的是不同情形，它们的答案也往往不同：不使用骰子时，Claude Opus 5.5 在一轮内约有一半此类相遇中成功通过，GPT-6.2 Astra 则约为五分之一 [图 5b]。如果受阻粒子的周围环境没有变化，它在下一轮就会遇到相同情形，只有给出不同答案才能脱困：在此类重复情形中，Claude Opus 5.5 的答案大约每两次就会改变一次，而 GPT-6.2 Astra 的答案约每二十次才改变一次 [图 5c；同一查询重复提问 24 次所得的答案见补充表 S4]。对于反复出现的答案，骰子便在此处发挥作用。使用骰子后，GPT-6.2 Astra 在周围环境不同的相遇中约有一半成功通过，与 Claude Opus 5.5 一样；两个模型在迎面更新中约有一半或更多会掷骰，而前方车道畅通时几乎从不掷骰 [图 5d]。对于答案本就会变化的 Claude Opus 5.5，骰子在这些运行中相当于额外的噪声，使系统松弛得更慢：与不使用骰子相比，通道更晚才最终稳定下来；从随机初始状态出发时，第 76 轮才稳定，而非第 62 轮；从均匀间隔的初始状态出发时，第 72 轮才稳定，而非第 49 轮。在后一种情况下，通道先在第 48 轮排好序，之后又变得混合，就像晶格上的能量在下降过程中偶尔会上升 图 4b、c 和 3b]。当势垒将粒子与有序状态隔开时，如在晶格上那样，

就需要噪声；而当相遇并非死锁时，噪声只会减慢松弛过程。

## 讨论

没有中心的有序需要两种要素：局部相互作用和涨落。语言模型粒子具备前者，却不具备后者：当被告知一条规则或一个温度时，它会返回最佳状态，就像处于零温度的粒子一样；而由这类粒子组成的集体可能会冻结在局部极小值。在统计物理学的语言中，冲突数可视为能量，而骰子是一种局部噪声源；只有宽泛地说，它才算是热浴，因为它能提供向上的移动。在局部最优处，有一个答案最好；没有骰子，任何模型都无法离开那里。Claude Opus 5.5 会在该处掷骰，根据在局部最优处进行的 96 次单粒子查询，其停留、增加一个冲突和增加两个冲突的平均权重分别为 0。74、0。26 和 0。003；而在没有冲突的状态下，它从不掷骰。从这个角度看，Claude Opus 5.5 会在能量局部极小、但并非全局极小的位置开启噪声，对代价更高的移动赋予较低权重，并在基态关闭噪声：每个粒子都在局部自行退火，无需外部设定冷却计划。热浴做不到这一点。在固定温度下，系统要么停留在势垒之下，要么一旦越过势垒，就会再次被震出基态；而随局部状态变化的噪声能让系统越过势垒并最终静止下来，因为基态变成了吸收态，细致平衡也被打破——这正是聚焦局部搜索和去中心化着色通过人工方式构建的结构[图2a], 。[43–45]。

在物质中，涨落由环境提供；而在这里，粒子自行选择涨落，而 Claude Opus 5.5 为其掷骰所给出的理由本身就是一种对称性论证：处于相同情境中的相同粒子会做出相同选择，只有随机性才能将它们区分开来 [图 2a]。通道展示了对称性的另一面。规则中没有任何内容规定哪条通道承载哪个方向，而不同运行最终形成了不同的分配，这是对称性的自发对称性破缺。当几个移动几乎近简并时，答案本身可能产生足够大的涨落，使两个粒子得以相互通过；而当最佳移动之间存在间隔时，例如处于局部最优状态，它们便会冻结。近简并处的涨落与跨越间隔时的冻结，将这两种情形联系起来：语言模型粒子只在自身的答案冻结之处需要来自外部的噪声。

将智能体视为粒子，就可以向它们提出研究物质时所提出的问题：测量单个粒子的响应，预测集体行为，并推断能量、势垒和对称性破缺。我们的系统规模较小，每种集体条件都运行了几轮，而且这些粒子是四个特定的模型版本，因此结果属于观测而非统计数据，目前还不能说明相变。下一步是研究更大的系统，绘制秩序如何依赖于粒子离开局部最优的频率以及其无必要移动的频率，并开展其他任务。

目前，每次更新都是一次耗时数秒的模型调用，因此这些集体的演化较为缓慢，但延迟是工程问题，而非原理问题。这些粒子具备三项适合大型去中心化系统的特性：无需消息时，成本随粒子数量增长，而不是随连接数量增长；无需记忆或标识符时，任何单元都可以被替换、添加或丢失，而无需同步任何状态；既定目标取代了人工调节的温度或退火计划。如果每次更新只需几毫秒，这些粒子就能分配共享资源，并仅凭局部观测实时协调自身运动，无需调度器。能否在大规模和实时条件下成立，取决于扩展性以及上文列出的额外运行。实验表明，这是一种其微观规则包含自行选择噪声方式的粒子；对此类粒子的统计物理学才刚刚起步。

## 参考文献

[1] Vicsek, T., Czir´ok, A., Ben-Jacob, E., Cohen, I. & Shochet, O. 自驱动粒子系统中的新型相变。*Phys. Rev. Lett.* **75**，1226–1229（1995）。[2] Toner, J. & Tu, Y. 二维动力学XY模型中的长程有序：鸟类如何协同行动。*Phys. Rev. Lett.***75**，4326–4329（1995）。[3] Toner, J. & Tu, Y. 鸟群、兽群和鱼群：群集运动的定量理论。*Phys. Rev.E* **58**，4828–4858（1998）。[4] Marchetti, M. C. *et al.* 软活性物质的流体动力学。*Rev. Mod. Phys.***85**，1143–1189（2013）。[5] Vicsek, T. & Zafeiris, A. 集体运动。*Phys. Rep.***517**，71–140（2012）。[6] Ballerini, M. *et al.* 支配动物集体行为的相互作用取决于拓扑距离而非度量距离：来自野外研究的证据。*Proc. Natl Acad. Sci. USA* **105**，1232–1237（2008）。[7] Cavagna, A.*et al.* 椋鸟群中的无标度关联。*Proc. Natl Acad. Sci. USA***107**，11865–11870（2010）。[8] Bialek, W. *et al.* 自然鸟群的统计力学。*Proc. Natl Acad. Sci.USA* **109**，4786–4791（2012）。[9] Buhl, J. *et al.* 行进蝗虫中的无序到有序。*Science* **312**，1402–1406（2006）。

[10] Couzin, I. D., Krause, J., Franks, N. R. & Levin, S. A. 移动中的动物群体中的有效领导与决策。Nature 433，513–516（2005）。[11] Sumpter, D. J. T. 集体动物行为的原理。Phil. Trans. R. Soc. B 361，5–22（2006）。[12] Anderson, P. W. 越多越不同。Science 177，393–396（1972）。[13] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Jr. & Vecchi, M. P. 通过模拟退火进行优化。Science 220，671–680（1983）。[14] Donati, C. et al. 过冷液体中的类弦协同运动。Phys. Rev. Lett. 80，2338–2341（1998）。[15] He, X., Zhu, Y. & Mo, Y. 超离子导体中快速离子扩散的起源。Nat. Commun. 8，15893（2017）。[16] Wang, Y. et al. 简单立方晶体中的电子驱动的一维协同扩散。Phys. Rev. X 11，011006（2021）。[17] Itai, A. & Rodeh, M. 分布式网络中的对称性破缺。Inf. Comput. 88，60–87（1990）。[18] Fich, F. & Ruppert, E. 分布式计算中的数百项不可能性结果。Distrib. Comput. 16，121–163（2003）。[19] Song, Z.-Y., Cao, Q.-H., Luo, M.-x. & Zhu, H. X. 大语言模型驱动智能体中的细致平衡。PRX Intelligence 1，023008（2026年）。2512.10047。[20] Ding, Y. et al. 具有信任感知通信的去中心化多智能体系统。载于2025年IEEE并行与分布式处理及应用国际研讨会（ISPA），1439–1445（IEEE，2025年）。2512.02410。[21] Mao, Y. et al. 具有共享上下文的去中心化多智能体系统（2026年）。2606.10662。[22] Dochkina, V. 摒弃层级与角色：自组织大语言模型智能体如何胜过设计结构（2026年）。2603.28990。[23] Hirota, M., Akshara Nadayanur Sathis Kanna, Kumar, U. & Phan Xuan Tan. 局部一致并不意味着大语言模型小组中的全局共识（2026年）。2609.35885。[24] Parsaee, A., Talebirad, Y., Szepesv´ari, C., Ohal, V. & Redman, E. LoopBench：利用大语言模型群体发现涌现式对称性破缺策略（2025年）。2512.13713。

[25] Gr¨otschla, F., M¨uller, L., T¨onshoff, J., Galkin, M. & Perozzi, B. AgentsNet：多智能体大语言模型中的协调与协作推理（2025）。2507.08616。[26] Romera-Paredes, B. 等。 通过大语言模型进行程序搜索取得的数学发现。 《自然》 **625**，468–475（2024）。[27] Zhang, J., Hu, S., Lu, C., Lange, R.& Clune, J. Darwin G¨odel Machine：自我改进智能体的开放式演化。载于国际学习表示会议（*ICLR*）（2026）。2505.22954。[28] Ren, Z. 等。 面向编程智能体的无评估递归自我改进（2026）。2611.21056。[29] Xiao, T. Z. 等。 逆势翻盘：通过语言化拒绝采样降低大语言模型的抛硬币偏差（2025）。2506.09998。

[30] Zhao, M., Du, Y. & Wang, M. 大语言模型不擅长掷骰子：LLM 难以从统计分布中生成随机数。载于第*64*届计算语言学协会年会论文集（第*1*卷：长篇论文），22942– 22959（2026年）。2601.05414。

[31] Gu, X. 等. 大语言模型中的随机性幻觉。载于 语言建模会议 *(COLM)*(2026年). 2604.06543。[32] Ezaki, T., Imura, N. & Nishinari, K. 共享且结构化的输入会削弱推理型人工智能智能体的集体随机选择（2026年）。2610.09667。[33] Mahmud, S., Benhamou Goldfajn, D. & Zilberstein, S. 使用多模态基础模型进行分布式多智能体协调（2025年）。2501.14189。[34] Yang, L. 大语言模型知道何时抛硬币吗？通过推理与经验实现策略性随机化（2025年）。2506.18928。[35] De Nobili, C. 大语言模型多智能体系统中的集体对齐：通过统计物理学区分偏差与合作（2026年）。2605.10528。[36] Glauber, R. J. 伊辛模型的时间依赖统计。*J. Math. Phys.***4**, 294–307(1963).[37] Wu, F. Y. Potts 模型。现代物理评论**54**,235–268 (1982).[38] Schick, M. & Griffiths, R. B. 三态波茨模型中的反铁磁有序。*J.Phys. A: Math. Gen.* **10**,2123–2131 (1977).

[39] Adler, J., Brandt, A., Janke, W. & Shmulyian, S. 三角晶格上的三态波茨反铁磁体。*J. Phys. A: Math. Gen.***28**, 5117–5129 (1995)。[40] Helbing, D. & Moln´ar, P. 行人动力学的社会力模型。*Phys. Rev. E* **51**, 4282–4286 (1995)。[41] Dzubiella, J., Hoffmann, G. P. & L¨owen, H. 外场驱动的胶体混合物中的车道形成。*Phys. Rev. E* **65**, 021402 (2002)。[42] Helbing, D., Farkas, I. J. & Vicsek, T. 驱动介观系统中的加热致冻结。*Phys. Rev. Lett.* **84**, 1240–1243 (2000)。[43] Selman, B., Kautz, H. A. & Cohen, B. 改进局部搜索的噪声策略。载于第十二届全国人工智能大会 *(AAAI-94)*, 337– 343 (1994)。[44] Seitz, S., Alava, M. & Orponen, P. 随机三可满足性的聚焦局部搜索。*J. Stat.Mech.* P06006 (2005)。

[45] Duffy, K. R., O'Connell, N. & Sapozhnikov, A. 去中心化图着色算法的复杂度分析。*Inf. Process. Lett.* **107**,60–63 (2008).

# 方法

## 粒子与查询

每个粒子的每次更新都是向模型发出的一个独立请求，不包含对话历史。消息说明粒子自身当前的状态、其邻居的当前状态、规则或目标，以及答案格式；粒子不会被告知自己位于何处、系统规模多大、当前是第几轮，也不知道此前其他粒子给出了什么答案。详细提示词使用英语，展示如下。在每次查询中，程序都会重新选择哪个字母表示哪个状态，以及邻居的排列顺序，因此，固定偏好某个字母或位置在物理状态层面上会成为一种无偏的平局判定。

## 模型与访问

我们使用了四个推理模型：DeepSeek V4.1 Flash（deepseek-v4.1-flash-1017）、Qwen3.8-27B（qwen3.8-27b）、GPT-6.2 Astra（gpt-6.2-astra）和 Claude Opus 5.5（claude-opus-5-5）。所有查询均在2026年11月16日至23日期间进行。我们还非正式地尝试了 Gemini 4 Neon

进行了几次局部最优查询，但它不在系统测试的四个模型之列。我们向 DeepSeek V4.1 Flash 和 Qwen3.8-27B 提出的查询指定采样温度为 1。0，推理力度为“低”，输出词元上限为 20 000；它们的推理文本会被返回并存储，但从不用于确定答案。Claude Opus 5.5 和 GPT-6.2 Astra 使用默认的推理力度，且不会返回推理内容。为了获得图 2a 中所示的回复，我们向 Claude Opus 5.5 提出了局部最优情形，并使用了明确的提示词：将其最后一句替换为要求模型先用一两句话说明粒子看到了什么，以及它为何如此选择。本测试仅用于获取理由；文中的所有比率均来自未向所有模型提出该要求的测试。

### 随机化标签

在三角色测试中，字母 A、B 和 C 到角色的分配方式（六种可能性）以及六名队友的列出顺序会随查询而变化；在使用字母的伊辛测试中，A 和 B 的分配方式以及邻居的顺序也会如此变化。在三车道运行中，每次查询都会从 36 种组合中重新抽取车道名称和所列单元格的顺序；伊辛温度测试使用固定标签 $+1$ 和$-1$，且每个单元格中的措辞完全相同。每项实验中采用的随机化方式均列于补充材料第 S14 节。骰子根据智能体提供的权重，使用程序生成的随机数进行抽样。我们通过根据种子重建每个查询，并对 DeepSeek V4.1 Flash 进行另外 2936 次查询，分别检查了这种随机化。各分配方式和顺序彼此独立，且与情境无关，并且均服从均匀分布；骰子能够正确按照给定权重进行抽样；骰子记录的 31 033 个随机数均服从均匀分布，且不存在序列相关性。模型可能会偏好某些字母而非其他字母；在分配保持平衡的情况下，这种偏好会相互抵消，而对六种分配方式进行等权处理后，各项主要读数的变化最多为 0.1 个百分点。生成提示词和骰子的代码将在本手稿的下一版本中发布。

### 单粒子测试，伊辛设定

一个有四个邻居的自旋会看到自身及邻居的状态，并以字母 A 和 B 表示；按照评分规则，与更多邻居状态相同的状态得分更高。实验也测试了不提供该规则的情况，以及添加一句关于平局的说明的情况（补充材料第 S7 节）。在温度测试中，自旋显示为 $+1$ 和 $-1$，并告知智能体：它是温度为 $T$、遵循热浴动力学的二维伊辛模型中的一个自旋；$T = 0.5$、1.5、2.27、4 和 10；对于每个 $T$、局域场 $h$（邻居自旋之和）及自身状态，均进行 32 次完全相同的查询。

加入随机数后，提示词逐字不变；返回 $[0,1$ 内一个均匀随机数的工具在文本之外提供。只有当 $s=+1$ 恰好在该数小于 $p_{+}(h,\ T)$ 时，使用该工具作出的决定才是一致的 $=1/(1+e^{-2h/T})$。

## 三角色问题

周期性三角晶格上的每个粒子都采用三个角色中的一种；与自身角色相同的六个邻居中的每一个都会计为一次冲突，冲突总数就是反铁磁三态 Potts 模型的能量。包含目标和骰子的提示词如下（这是一个处于局部最优状态的粒子示例；每次查询中字母和邻居顺序都是随机的）：

> 你是团队中的一名成员。每位成员都采用三个角色中的一种：A、B 或 C。
>
> 你现在的角色是：C
>
> 你直接与六名队友协作。他们现在的角色是：
>
> 第一位：A
>
> 第二个：B
>
> 第三个：A
>
> 第四个：C
>
> 第五个：A
>
> 第六个：B
>
> 规则：每个与你角色相同的队友都算作一个冲突。团队的目标是无人存在任何冲突。每位成员只能看到自己的六名队友。
>
> 有一个名为 draw 的工具可用：输入 A、B 和 C 各自的权重后，它会按与权重成正比的概率随机抽取一个角色并返回。你可以使用它，也可以不用。
>
> 现在选择你的角色。
>
> 无需解释。请在最终回复的末尾另起一行，且该行只包含“Answer:”后接 A、B 或 C。

带骰子和不带骰子的提示词，除了高亮的句子外完全相同，其余内容逐字一致。粒子的情形由持有各个角色的邻居数量以及粒子自身的角色决定，总共有16种情形。带骰子的测试包含440个查询，其中96个处于局部最优状态（邻居分别持有角色3、2、1，粒子自身持有角色1），另有200个处于无冲突且存在唯一最佳角色的情形。对于 GPT-6.2 Astra、Qwen3.8-27B 和 DeepSeek V4.1 Flash，这96个

个局部最优查询分别通过相同提示词追加了400、2000和2000个查询。对照测试使用相同提示词询问局部最优情形，但不包含关于工具的句子，也不使用任何工具（Claude Opus 5.5 和 GPT-6.2 Astra 各96个查询，Qwen3.8-27B 和 DeepSeek V4.1 Flash 各400个）。两个比率概括了响应表：没有冲突的粒子改变角色的频率，以及处于局部最优状态的粒子离开该状态的频率。

## 晶格实验

晶格包含 $9 \times 9$ 个站点，并采用周期性边界；由于 9 是 3 的倍数，三种子晶格各持有一个角色的无冲突状态可以适配该晶格。每轮按随机顺序依次更新三个子晶格，每个子晶格内的更新均并行进行。所有模型都从相同的两个随机初始状态（冲突数分别为 92 和 70）开始，遵循相同的顺序序列，运行 40 轮，或在首次出现无冲突状态后再运行三轮；每个回答都会被执行。若模型离开局部最优，且其回答是骰子掷出的角色，同时此次掷骰对停留和至少另一个角色都赋予了正权重，而这些权重不会随冲突数增加，则计为一次通过加权掷骰离开局部最优。在第 1 至 40 轮和两个初始状态中，Claude Opus 5.5 在 1373 次更新中有 364 次通过加权掷骰离开局部最优；GPT-6.2 Astra 在 2124 次更新中为 0 次，DeepSeek V4.1 Flash 在 2564 次更新中为 0 次，Qwen3.8-27B 在 2425 次更新中为 4 次。按相同标准，处于局部最优的单个粒子在 Claude Opus 5.5 的 96 次查询中有 21 次离开，GPT-6.2 Astra 的 496 次中为 0 次，Qwen3.8-27B 和 DeepSeek V4.1 Flash 各自在 2096 次中有 0 次和 4 次；不使用骰子时，没有任何模型离开局部最优（Claude Opus 5.5 和 GPT-6.2 Astra 各 0/96，另外两个模型各 0/400）。

## 三车道对向流

轨道由三条平行车道组成，每条车道有 40 个单元格，并采用周期性边界；每个单元格最多容纳一个粒子，且有六个粒子朝每个方向移动。每个粒子都能看到三条车道中前方两个、后方两个单元格（共 14 个单元格），这些单元格可能为空，也可能有一个朝同向或反向的粒子；粒子可以在自己的车道向前移动一个单元格、向前移入相邻车道的一个单元格，或停留。所有粒子同时移动；若目标单元格已被占据、两个粒子移入同一单元格，或两个移动会交叉，则这些移动都不会发生；每次尝试移动的粒子各记一次冲突。在均匀间隔的初始状态下，12 个长度为三或四个单元格的区段中各有一个粒子，每条车道上每个方向的粒子各有两个；在随机初始状态下，从 120 个单元格中随机抽取 12 个。八个实验组（两个模型、有骰子和无骰子、两种初始状态）各运行 100 轮次。当没有任何车道

中同时有朝两个方向移动的粒子时，车道即为已分流；若粒子的移动在某一轮次中未能发生，则该粒子在该轮次受阻。同一车道中两个彼此相向的粒子，若相邻或相距一个单元格，即构成迎头相遇；只要其中至少一个粒子在某一轮次移动，这对粒子就算通过。提示词将粒子称为鸟，将其运动方向称为风。下面的例子描述外侧车道中的一个粒子。另一个粒子在同一车道与它相向，中间隔着一个空单元格，视野中没有其他粒子。使用骰子时，提示词如下：

> 你是一只鸟，位于由方格组成的轨道上。轨道有三条通道，分别为 A、B 和 C，并列延伸：通道 B 位于通道 A 与通道 C 之间。每个单元格最多容纳一只鸟。
>
> 单元格以所在通道及其相对于你所在单元格沿轨道的偏移量命名，你所在的单元格为 A 0。偏移量 +1 是你面朝一侧的下一个单元格，偏移量 -1 是另一侧的下一个单元格，依此类推。鸟可以停留在原地，也可以朝面朝的一侧移动一个单元格，最终位于自己的通道或相邻通道中。你的移动以最终所在的通道命名：A：移动到 A +1B：移动到 B +1你现在感受到的风吹向 + 侧。鸟面朝它所感受到的风吹来的方向。每只鸟只能看到自己周围的单元格，并自行选择移动方式。你可以看到三个通道中偏移量从 -2 到 +2 的单元格。当前情况：A +2：一只面朝 - 侧的鸟 A +1：空 A -1：空 A -2：空 B +2：空 B +1：空 B 0：空 B -1：空 B -2：空 C +2：空 C +1：空 C 0：空 C -1：空 C -2：空
>
> 鸟不会移动到已被占据的单元格中。如果两只鸟试图移动到同一个单元格，它们都不会移动。如果两只鸟的移动路径会彼此交叉，它们都不会移动。

规则：未能完成的移动，对尝试移动的鸟来说算作一次冲突。鸟群的共同目标是，每只鸟都尽可能顺畅地沿着自己感受到的风移动，同时尽量减少冲突。

有一个名为 draw 的工具可用：为 A、B 和 Stay 中的任一选项指定权重（未列出的选项权重为 0），它会按权重比例随机抽取其中一个选项并返回。你可以使用，也可以不使用。

现在选择你的行动。

无需解释。请在最终回复的最后一行仅写“Answer:”，后面跟 A、B 或 Stay。

带骰子和不带骰子的提示词只有高亮句子不同，其余内容逐字相同。用于构建、随机化并发送所有实验查询，以及分析回复的代码，在“代码可用性”部分中进行了说明；该部分还提供了完整车道运行的动画。

## 参考晶格模拟

参考模拟使用相同的晶格和更新顺序，不进行模型调用，并从随机初始状态开始（每个点运行 400 次）。设 $n_X$ 为角色为 $X$、自身角色为 $s$ 的粒子的邻居数量，那么 $n_s$ 就是它的冲突数，能量为 $E = \frac{1}{2}\sum_i n_{s_i}$。每次更新时，粒子都会采用角色

$$s' = \begin{cases} \text{以概率 } p_c, & n_s = 0, \ \arg\min_{X \neq s} n_X \text{（若平局则随机选择）}, \text{ 以概率 } p_h, & 0 < n_s < n_X \text{ 对于所有 } X \neq s, \\ \text{冲突最少的角色；若平局则随机选择，否则，} \end{cases} \tag{1}$$

并保持 $s$，当第一步或第二步未执行时。第一行表示一次不必要的改变，第二行表示偏离局部最优，第三行则表示一次向下或持平的移动。成功图 $S(p_c, p_h)$（图 2b 中的阴影部分）表示在 40 轮次内到达 $E = 0$ 的运行比例。图 2c 的预测为 $S$，其速率（$p_c$，$p_h$）是针对每个模型在单个粒子上测得的；其范围依据 $p_h$的 95% 威尔逊区间得出，对于 Claude Opus 5.5，该区间给出的 $S$ 范围为 0。80 至 0。96，而其他模型至多为 0。14。该规则是一个含两个参数的参照，并非对智能体的真实模拟。

### 统计数据与局限性

计数结果附有相应分母；区间为威尔逊区间，图1中为 68%，其他图中为 95%。主要结论并非基于单条轨迹。单粒子速率是基于数百至数千次独立查询统计得出的，选项名称和排列顺序均随机生成；模型间的差异远大于各自的区间。晶格实验结果与参考模拟根据这些速率所预期的结果一致；Claude Opus 5.5 和 GPT-6.2 Astra 的晶格实验，以及车道的所有条件，均从独立的初始状态开始运行，且两者都得到了文中报告的结果。更大的系统、更多初始状态以及提示词的其他表述方式仍有待测试。

### 数据可用性

本文使用的所有数据将在发表后存入公共存储库。如需提前获取，请发送电子邮件联系作者；作者很乐意分享这些数据并展开讨论。

### 代码可用性

用于构建、随机化并发送所有实验的查询，以及分析回复的代码连同每个提示词的完整原文均可在 https://github.com/yongwangxx/Decentralized-Collective-Multi-Agents 获取，并存档于 https://doi.org/10.5281/zenodo.24461514。完整车道运行的动画位于 https://yongwangxx.github.io/Decentralized-Collective-Multi-Agents/。

### AI 工具的使用

大语言模型被用作辅助工具，用于编写代码、运行和分析实验，以及起草和编辑文本与图表。作者审阅并核实了代码、数据和文本，并确认了最终上传版本。润色后的版本将很快更新。补充信息将在下一版本中提供。

### 致谢

Y. W. 感谢香港理工大学提供的支持（校长青年学者计划，项目编号 P0065105）