

光子 Ising 机的前景光明

(湖北师范大学 谢云龙、南京大学 刘俊明 编译自 Charles Roques-Carmes et al. *Physics*, May 31, 2019)

统计物理中的 Ising 模型最初是用来处理铁磁体问题的。在这一模型中，向上和向下两种状态的自旋占据正方形格点位置，每一个自旋的能量取决于它跟周围自旋的相互作用。对于铁磁系统，每个自旋都倾向于跟周围近邻自旋平行排列。

而在现实生活中，Ising 模型可以跟很多所谓“路径优化”问题联系起来。例如，最基本的旅行路径优化问题就是如此：当在多个城市之间旅行时，旅行者需要寻求连接这些城市的最短路径，以提高效率和缩减开支。这个问题最直接的解法就是穷举所有可能情况，然后找出最短路径。但在实际计算中会发现，所需计算量会随着城市数量的增多呈指数式暴增，穷举法就不再适用。诸如此类的路径优化问题普遍存在于商业活动、科学研究、工程应用等领域，因而这类问题的求解具有很大的现实意义。通过适当的映射，此类路径优化问题可以和 Ising 模型对应起来，然后利用所谓的“Ising 机”的特殊处理器来找出对应于 Ising 模型基态的自旋构型。这一处理方法是目前优化问

题中最高效、最可行的方案。

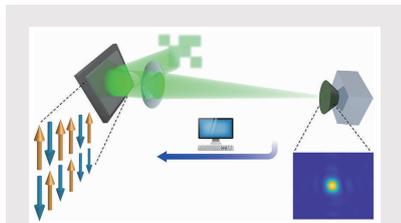
利用光学系统构建光子 Ising 机的原理是将自旋态和相互作用编码到光场的相位和振幅上。这样构建的系统有三方面的优点。首先，光子 Ising 机以光速和双通道并行方式处理数据，运行效率远高于那些原子和磁性 Ising 机。其次，光子 Ising 机可对一个数学过程进行多次运算，但能量损耗却能保持不变。最后，光子的量子特性给系统提供了一个本征的噪音背景，可用来模拟系统热涨落过程。鉴于这些优点，科学家已经发展了多种基于光子的 Ising 机，其中大部分都运行在用光参量振荡器或光纤搭建的网格上。部分光子 Ising 机已经付诸实践，用来求解复杂的优化问题和研究自旋系统的相变问题。但受制于光子的量子退相干和色散效应，这些 Ising 机一般只能做到几百到几千个自旋规模。

来自罗马大学的 Pierangeli 与其合作者，利用空间光场调制技术构建了一种新型的、可集成的 Ising 机，可轻松突破光子 Ising 机的尺度上限，使得机器可以容纳上万个自旋。他们构造的光子 Ising 机采用了两个非常关键的技术：其一，利用多路复用技术一次性编码所有自旋相互作用；其二，摒弃传统的机械网络结构，利用自由空间构建光学网络。首先，他们通过空间光调制器在激光束的波前设定好 0 或 π 相位。这两种相位可分别用来模拟自旋上、下两种状态。其次，他们通过调制光强来设置“自旋”之间的相互作用。这一实验主要有以下 3

个步骤(见图)：(1)发送一束可调幅激光束，通过空间光调制器设定好自旋构型；(2)用相机记录下激光信号，并与原始图像进行比对；(3)更新空间光调制器参数，使前后图像的差别达到最小。这一过程类似于自旋系统中能量最小化过程。经过多次循环后，空间光调制器的输出参数就对应基态的“自旋”构型。

为验证该光子 Ising 机的可行性，Pierangeli 与其合作者首先把相互作用设置成简单的铁磁作用，优化得到的结果和平均场理论低温下的基态构型相同。此外，他们还设计实验，模拟了自旋相互作用随机设定的自旋玻璃态系统。从原理上看，只要调节激光波前编码尺寸，就可构建更大的体系。借助这一特性，就可以研究磁化强度和关联长度等物理量与系统尺寸的标度关系。更有意思的是，该 Ising 机可以通过光子的本征噪音来模拟温度。通过控制噪音大小，应该能够观察到温度变化引起的相变过程。

当然，处理实际问题时往往要考虑更多复杂情况。例如，在旅行路径问题中，常常需要在 Ising 模型上施加一个外场。这一任务在实践中很难实现，因而需要对 Ising 机开展更深入的研究工作，以使其胜任更复杂的任务。Pierangeli 等人的工作让我们看到了利用 Ising 机解决实际问题的曙光，同时也让我们看到光处理器在处理代数运算上的高效率。例如，将诸如深度学习过程等交给光处理器去处理，必将极大推动人工智能的发展。



由 Pierangeli 等人设计的可集成光子 Ising 机之原理图。绿色激光束部分表示 Ising 自旋编码过程。Ising 机通过不断调整输出图像和原始图像(蓝色部分)来优化系统，获得最优输出