**利用深生成模型学习量子光学实验中纠缠的可解释表示**

Daniel Flam Shepherd，1,2岁，Tony Wu，1 Gu Xuemei，3 Alba[[1]](" \l "_ftn1" \o ")

Cervera Lierta，1,4 Mario Krenn，1,4,2,5,6和Al'an Aspuru-Guzik1,4,2,7，[[2]](" \l "_ftn2" \o ") ‡

1

*多伦多大学计算机系，安大略多伦多，M5S 2E4，加拿大*

2 *加拿大安大略省多伦多人工智能矢量研究所M5S 1M1*

3

*合肥科学技术国家级国家级物理科学实验室，中国科学技术大学近代物理系，合肥，安徽，230026，中国*

4

*多伦多大学化学系，多伦多，安大略，M5G 1Z8，加拿大*

5 *人工智能高级研究所（IARAI），奥地利维也纳1030*

6

*马克斯·普朗克光科学研究所（MPL），91058 Erlangen，德国*

7

*加拿大安大略省多伦多市加拿大高级研究所M5G 1Z8*

量子物理实验产生了一些有趣的现象，比如干涉或纠缠，这是许多未来量子技术的核心特性。量子实验的结构与其纠缠特性之间的复杂关系对于量子光学的基础研究至关重要，但很难直观地理解。我们提出了量子光学实验的第一个深层生成模型，其中变分自动编码器（QOVAE）在实验装置的数据集上进行训练。在一系列计算实验中，我们研究了库瓦的学习表示及其对量子光学世界的内部理解。我们证明了QOVAE学习了量子光学实验的无敌表示，以及实验结构和纠缠之间的关系。我们证明了QOVAE能够为高度纠缠的量子态生成新的实验，这些量子态具有与其训练数据相匹配的特定分布。重要的是，我们能够完全解释QOVAE如何构造它的潜在空间，找到我们完全可以用量子物理学来解释的奇怪模式。研究结果表明，我们如何在复杂的科学领域成功地使用和理解深层生成模型的内部表示。QOVAE和我们调查中的见解可以立即应用于整个系统的其他物理系统

基础科学研究。

# 一、导言

从经典物理学的角度来看，量子力学包含了一系列似乎违反直觉的现象。实验量子物理学是研究与这些现象和宇宙量子力学性质有关的基本问题的一部分。量子纠缠[1–3]是最难与我们的现实图景相协调的现象之一，也是所有量子技术和应用的基础。因此，尤其是量子光学实验不仅用于测试量子物理学的基础[4-6]，它们也是多种量子技术的核心，包括通信[7]和计算[8-10]。这里我们考虑的量子光学实验包括单个光学元件或装置，例如激光器、分束器或非线性晶体。复杂的量子现象，如多光子干涉效应[11–14]，很难直观地理解。因此，一般来说，实验结构与其纠缠性质之间的联系——即所谓的结构-性质关系——对于人类来说很难理解，这导致这些技术的潜力尚未被发现。

为了继续推进基础研究和量子技术，研究人员开发计算方法有利于设计新的量子硬件，同时提供对结果的概念性理解[15]。例如，Melvin算法学习用有用的元素扩展自己的工具箱[16]，或基于图形的拓扑优化器，允许提取新的人类可解释概念[17]。或遗传优化[21]与其他参数化学习[20]一起工作。这些努力并不是通过使用在实验示例上训练的学习表示法来直接生成量子光学实验。这样的方法将使我们能够利用特定纠缠实验的先验知识生成，并允许我们在模型的学习表示中直接探索实验结构与纠缠之间的关系。因此，在这项工作中，我们专注于使用深度无监督学习[23]，并建立量子光学实验的生成模型。

深度生成模型在过去几年中产生了重大影响，它们成功地应用于各种数据，包括图像[24]、文本[25,26]和音频[27]。特别是，在化学科学中，利用深层生成模型取得了许多进展[28]。具体而言，可变自动编码器（VAE）[29]已用于分子设计，以生成类药物化合物[30,31]、聚合物[32]和金属有机框架[33]。当这些基本的分子分布在一个大的数据集上被训练时，他们能够完全有效地学习这些分子分布的基本规则。

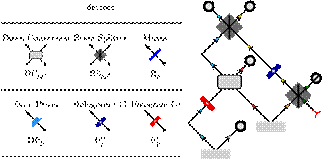
我们从分子生成性设计领域获得启发，并研究深度生成模型是否有可能通过学习量子光学实验的分布来了解纠缠与实验结构之间的复杂关系。对于我们的模型，量子光学变分自动编码器（QOVAE），我们利用了在量子光学实验装置上训练的变分自动编码器架构。我们进行了大量调查，以了解QOVAE可以学习什么以及如何学习。我们证明了QOVAE可以学习生成各种各样的新颖实验，几乎完全从产生纠缠态的实验空间。此外，我们还看到，该模型能够在其训练的实验中学习特定的纠缠分布。通过分析其潜在空间，我们发现QOVAE学习了一种可解释的实验表征，并对实验结构和纠缠之间的关系进行了令人惊讶的解读。

**二、量子光学实验&**

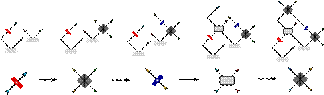
# 瓜葛

*实验。*为了表示实验的离散结构，我们使用了一系列光学设备，如图1所示。每个序列唯一地决定了系统的最终量子态和纠缠特性。每个实验中的量子系统都是一个四光子系统，其初始状态由一个双自发参量下转换过程（SPDC）创建，该过程通过实验生成两个光子对。这些SPDC过程可以产生多体纠缠[36,37]，以光子固有轨道角动量（OAM）编码的高维纠缠[38–40]，以及它们的组合[41,42]。实验是使用一组基本元件进行的，这些元件包括分束器、反射镜、多芬棱镜、单模OAM下变频器和全息图[43]。全息图和多芬棱镜分别具有与光束中的OAM和相位相对应的离散参数。每个实验都可以按顺序表示，序列中的每个元素都代表一个设备，该设备在图形中的位置是唯一标识的，通过光子在序列中的传播及其顺序来指定。我们使用一个包含6个设备的工具箱（图1），在4个光子路径上运行，最多有2个空路径。

*瓜葛*我们研究的系统是一个高维四光子量子态。量化



a） 设备工具箱和示例实验



哈布斯*判定元件*−→ H1c−→ 直流−→ 学士学位*公元前屋宇署*

b） 作为其设备序列的示例实验

图1:a）左边是一个工具箱，里面有任何实验中可能用到的设备。所有元素都用于标准量子光学实验室[34]，包括路径恒等式纠缠技术[35]。对于包含的每个设备，都是：其名称、可视化和由其作用路径编写的操作员子脚本：一条路径p或两条路径p，p0。（右）量子光学实验的一个例子。每个实验都涉及四条光子路径，从一个SPDC晶体开始，到一个探测器结束，探测器由一个黑色轮廓的灰色圆圈表示。路径由箭头指定，并分别用蓝色、灰色、红色和黄色对光子a、b、c、d进行颜色编码。此外，每个实验最多可以有两条空路径e、f，颜色编码为绿色和紫色箭头。空光子路径开始时没有晶体，显示为红色的三颗星，结束时没有探测器，探测器符号带有斜线。b） 在a）中定义实验的设备序列：首先是图形，然后是a）中工具箱中每个设备的可视化，最后是设备操作员序列。

纠缠，我们从离散的施密特秩向量（SRV）推导出纠缠熵[44]。SRV是由所有二分体或子系统的施密特秩组成的向量，对于四个粒子，其大小为七。对于纠缠的总体测量，我们使用所有子系统纠缠熵的总和，我们将其表示为S，其中S>0的实验是纠缠的，S=0的实验是非纠缠的。有关量子态和纠缠计算的更多细节，请参阅补充资料。

|  |
| --- |
| 图2:QOVAE的视觉描绘。首先，使用卷积神经网络将序列表示的实验编码为随机潜在表示，并使用另一个深度递归神经网络进行重构。在潜在空间上是纠缠度量S，它被显示为潜在空间z的函数。函数箭头显示从紫色的低纠缠区域向 |

黄色的高纠缠区。

# 三、 量子光学变分自动编码器

对于我们的QOVAE模型，我们使用变分自动编码器来学习量子实验序列的分布。QOVAE模型由两个神经网络组成：一个编码器将量子光学实验x映射到一个连续的潜在表示z，另一个解码器从潜在表示z重构实验x。编码器和解码器都由深度神经网络参数化。图2显示了主模型。对于数据，我们将一个实验顺序表示为矩阵中的一系列热列向量xt，其中x=[x1，…，xt，…，xt]∈ R.这里，T是最大实验长度（设备数量），D是工具箱中的设备数量。这被输入到QOVAE的编码器中，该编码器通过使用1D卷积层学习表示，该卷积层用于生成潜在空间的平均值和对数标准偏差。解码器使用实验的潜在表示，使用递归神经网络生成实验序列。有关QOVAE、如何训练以及编码器/解码器的更多详细信息，请参见方法部分。*T*×D

为了训练QOVAE，我们使用Melvin计算机算法生成量子光学实验的训练数据集。我们以产生纠缠态（S>0）的实验为目标，因此我们将数据集分为纠缠设置pdata（xS>0）和非纠缠设置pdata（xS=0）。总的来说，我们生成了一个包含大约20万（千）个实验的数据集，其中一半产生了多体纠缠态。根据生成的实验，我们只使用最多有6个分束器或下变频器（双路径设备）的设置。为了进行我们的研究，我们训练了两个模型，第一个是在约80K纠缠实验的数据集上（限制后），具有6维潜在空间（QOVAE高），第二个是在约35K纠缠和非纠缠实验的数据集上，具有2维潜在空间（QOVAE低）。

# 四、 结果和讨论

在训练两个模型后，我们进行了大量实验来评估QOVAE及其学习的表征。我们使用随机潜在向量生成量子光学实验，进行潜在空间研究，并评估从模型生成的实验的纠缠特性。从实验中，我们提取了一系列结果，我们将在以下段落中讨论这些结果，并以粗体显示重要结论。

**库瓦学会了几乎完全从纠缠量子光学实验中产生新的、独特的实验。**在训练QOVAE High后，我们随机抽取10公里

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 测量 | QOVAE实验随机实验 | |
| 纠缠 | 0.93 | 0.47 |
| 独特性 | 0.99 | — |
| 新颖性 | 0.99 | — |

|  |
| --- |
| a） QOVAE生成的实验与训练实验的比较。  纠缠熵  b） 比较QOVAE High和训练实验的纠缠分布。  图3：（a）来自第一个数据集（左）的训练实验，以及QOVAE High生成的实验。（b） 使用QOVAE High和训练实验生成的实验计算所有七个系统双分区的纠缠熵和施密特秩分布图 |

表一：QOVAE High或随机生成的实验的纠缠度、唯一性和新颖性比率

潜伏期载体，并对其进行解码，生成10K实验。在本实验中，我们研究了QOVAE仅从产生纠缠态的量子光学实验装置空间生成新数据的能力。我们想观察QOVAE是否可以忽略无纠缠实验的空间（产生无纠缠态或完全没有状态），同时生成新颖独特的纠缠实验设置。

|  |
| --- |
| 图4：来自QOVAE的潜在空间插值的三个示例。每个插值都是在不同纠缠度的实验之间进行的。沿着插值路径选择的初始和最终实验被封闭在一个矩形中，并且沿着两个路径之间的路径显示四个实验。每个下面 |

我们使用一些基本指标对10K取样实验进行分析，结果如表一所示。首先，我们计算实验的纠缠度，并确定纠缠和未纠缠实验之间的比率（表一第1行）。接下来，我们计算采样实验的唯一性，即去除重复实验后纠缠实验数与纠缠实验数的比值。最后，我们计算了新颖性，即没有出现在训练数据中的独特实验的比率。QOVAE能够生成大约93%的纠缠实验，几乎所有实验都是独特和新颖的（即不在训练数据中）这些结果大约是随机抽样的两倍。有效地，QOVAE可以从产生纠缠量子态的实验量子光学装置的空间中产生纠缠量子态，这些纠缠量子态在训练数据中也找不到，并且不都是相同的装置。这些结果有力地表明，学习到的内部重复实验是纠缠度量S。

QOVAE的语句编码有意义的结构纠缠关系。

**QOVAE可以学习它所训练的纠缠态的分布。**

图3（a）显示了来自QOVAE High及其训练数据的15个随机实验样本。从图中，我们可以通过比较两个样本中实验的图形结构来评估模型在生成类似于训练实验的实验方面的学习程度。我们可以看到，两组样本都有相似的设备：1-5个单路径和1-4个双路径设备，以及空路径，其中训练实验中有11个，QOVAE中有10个。因此，我们得出结论，QOVAE学习的分布与训练集相似。接下来，我们评估由QOVAE High学习到的纠缠分布。假设QOVAE High可以学习创建具有纠缠态分布的实验。在这种情况下，每个双分区或子系统的纠缠分布在训练数据和模型的实验之间应该是相似的。为了验证这一点，我们从模型和训练数据中取样10K个实验，并计算每个取样实验的所有七个bi分区的纠缠熵和施密特秩。现在我们要比较训练数据和模型之间的值分布。我们通过每个子系统的分布图直观地实现了这一点。为了绘制每个分区的七个分布，我们使用核密度估计器[45]来估计施密特秩的纠缠熵密度和直方图。图3 b）显示了QOVAE和训练数据的结果分布图。

我们可以从图3 b）中的分布图中看到，在前四个子系统（前四列）中，QOVAE High成功地了解到训练纠缠分布有两个模式（或峰值）。对于最后三个子系统图（最后三列），QOVAE High能够了解到在训练分布中存在单一纠缠模式。因此，我们得出结论，对于系统的每个分区，QOVAE已经学会匹配纠缠的训练分布。

|  |
| --- |
| 图5：（左）使用随机搜索发现最高纠缠度的量子光学实验。（右）通过搜索QOVAE的潜在空间发现的前三个实验。 |

除了之前的实验之外，我们还测试了QOVAE Low是否学会了区分其训练数据中的两种分布：纠缠实验pdata的分布（xS>0）和非纠缠实验pdata的分布（xS=0）。我们测试QOVAE Low是否能产生训练数据中相同比例的纠缠与非纠缠实验。和之前一样，我们通过采样随机向量z从QOVAE生成10K实验∼ N（0，I），然后对这些矢量进行解码，生成10K量子光学实验。我们计算了每个实验S的纠缠度，发现其中54%的设置S>0，因此是纠缠的。这意味着QOVAE在训练数据中再现了相同的双峰分布，即纠缠与非纠缠实验。

**QOVAE根据纠缠度学习准连续嵌入。**

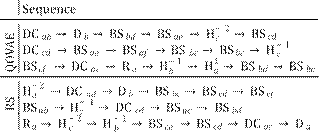
我们根据纠缠度量S分析了潜在空间的平滑度。具体来说，我们测试了接近潜在空间的实验是否具有类似的纠缠特性。这可以通过在潜在空间中从实验的一个潜在表示z1插值到另一个z2，并在从z1开始的路径上解码实验来实现→ z2。我们对路径使用球面线性插值[46]，并沿路径以5个等距步长进行解码。

总的来说，我们展示了来自QOVAEs潜在空间的三个插值，如图4所示。为了观察模型是否了解到与纠缠度相对应的实验装置之间的相似性概念，我们从不同的纠缠度S中进行插值。图4中显示的第一个在不产生纠缠态（S=0）的实验和QOVAE Low的实验之间进行插值。在产生高维纠缠态（S>0）的实验之间，来自QOVAE High的最后两次插值，在S=5.55的实验之间的第二次插值，以及在S=2.77和S=5.55之间的最后一次插值。

对于第一次插值，沿插值路径解码的实验保留初始/最终实验的纠缠，实验沿路径保持不纠缠。类似地，在第二次插值中，解码实验将纠缠维持在S≈ 5.0的初始和最终实验”。在最后一次插值中，沿路径解码的实验装置的纠缠度从S=2.77线性增加到最终实验的纠缠度S=5.55。

该实验表明，QOVAE学习了量子光学实验的一个相当平滑的表示，该表示对实验结构和纠缠特性之间的相似性进行了编码。

**QOVAE可用于高效搜索**



表二：图5中的实验按升序排列。

**在潜在空间中寻找新的高度纠缠的量子装置。**

我们使用QOVAE来寻找产生高维纠缠态的新实验。我们在QOVAE High（仅在纠缠实验中训练）的潜在空间中使用随机搜索。我们将潜在空间中的随机搜索与直接在实验装置序列上的随机搜索进行了比较。我们希望找到能够产生最大可能纠缠度的系统的实验。我们正在有效地比较以下优化

max S（xπ）对max S（f（z）），

**十、***π*∈X z∈Z

其中xπ∈ X是随机抽样量子光学实验空间中的实验，Z是QOVAE的学习潜空间。通过对潜在向量z进行随机采样，将学习到的潜在向量用作代理优化空间∼ N（0，I），然后计算S（f（z）），其中f是QOVAE解码器。

|  |
| --- |
| c） 最后一台设备的类型d）最后一台设备的功能  图6：对QOVAE低颜色的二维潜在空间的探索a）通过纠缠测量S，b）通过长度，c）通过最后一个设备，以及d）最后一个设备的功能。 |

我们以相同的迭代次数（10K）对这两种搜索进行了一次随机搜索，并显示了我们通过随机抽样在设备序列和QOVAE中发现的前3个实验设置，如图5所示。表二显示了顺序表示的相同实验。在QOVAE的潜在空间中搜索发现了总体上具有更高纠缠度的实验。这证明了在搜索新的高纠缠度实验时，使用量子光学实验的学习表示法的实用性。

**QOVAE学习一种可解释的表达。**

由于QOVAE Low只有两个潜在维度，我们可以直接绘制潜在空间，并根据结构-属性关系解释潜在空间。这些曲线图有助于解释我们在之前的实验中获得的结果。

我们通过将每个训练示例编码到潜在空间来执行这种解释，并观察显著的结构和不同的设置集群（见图6）。现在，我们可以使用相应训练示例的纠缠度量对潜在空间中的每个点进行颜色编码。我们在潜在空间中发现了一个非常清晰的未缠结区域（紫色），另一个结构被缠结（见图6a）。这是一个有趣且令人兴奋的结果，因为该模型完全是在没有相应纠缠信息的情况下训练的，只是使用了设置的结构。这一结果表明，该模型隐含地区分了纠缠和非纠缠实验。为了理解QOVAE是如何做到这一点的，我们分析了对应于三个不同区域的训练示例，一个是无纠缠区域A），一个是共享纠缠态和无纠缠态B），另一个是仅包含纠缠态C）。

在区域A），我们发现了三个不同的团簇，它们都不包含纠缠态。我们发现，所有三个集群都只包含四个设备的实验，而在区域B）和C）中，所有设置的设备长度都是九。因此，我们首先了解到，QOVAE根据光学设备的数量对训练示例进行编码。我们通过根据设置的长度对潜在空间进行颜色编码来确认这一点，如图6b所示。

然而，装置的大小不能单独对潜在空间的特殊结构及其纠缠分布负责。毕竟，区域B）和C）有相同数量的元素，但是B）包含纠缠和未纠缠的设置，而C）只包含纠缠的设置。我们进一步分析了这两个区域，发现在区域B）的每个设置中，最后一个元素总是H−b 2在C）中总是DCac。因此，我们了解到，设置的最后一个元素是QOVAE用于分离设置的第二个属性，我们可以通过按最终元素对所有点进行颜色编码来确认（见图6c）。

有了这一新的见解，我们终于可以解释为什么两个区域B）和C）具有不同的纠缠特性：每个设置（通过构造）中的初始两个元素由路径a、B中的非线性晶体和路径C、d中的一个组成，这在所有四条路径中创建了一个相关态。为了在叠加中获得第二个相关态（因此纠缠），设置需要在四条路径中创建另一个相关组合。只有另外两种方法是通过在路径ac和bd或路径ad和bc中创建相关性，这可以用图论的方式理解[47,48]。在区域C）中，最后一个元素是路径ac中的晶体，这已经产生了必要的相关性。在这个设置中，前八个元素只需要在路径bd中创建另一个关联来创建纠缠，而在区域B）中，需要创建完全关联的状态，这是不太可能发生的。我们可以通过将所有可能的最后元素聚集成八个官能团来进一步加强我们的解释。例如，所有全息图对纠缠性质的影响相同，因此我们可以将它们组合成一个官能团。

从这个结果中，我们能够在量子物理意义上充分解释QOVAE所了解到的结构-性质关系。有了这个新的理解，我们也可以解释我们在以前的实验中观察到的性质。例如，编码在纠缠方面是平滑的，因为光学元件的数量显著地决定了从设置内部建立的可能关联。

# 五、结论

|  |
| --- |
|  |
|  |  |

我们提出了量子光学硬件设计的第一个深度生成模型QOVAE。深层生成模型被广泛使用，但在复杂的科学领域中，从未有过对其内部表征的研究或理解。在一系列复杂的计算实验中，我们研究了库瓦的量子世界内部图景。QOVAE能够生成新的纠缠实验，学习纠缠分布，并被证明在其潜在空间中平滑插值——这也可以用于有效地搜索新的高度纠缠实验。当绘制QOVAE的潜在空间时，我们发现了复杂的内部结构，令人惊讶的是，QOVAE以无监督的方式隐式地发现了纠缠量子实验的特性。我们的研究结果不仅仅是设计新的量子光学——它们解决了科学领域中黑箱模型[49,50]的可解释性和可解释性问题。这是特别有希望的，因为了解这些模型所学到的东西可以带来新的计算机启发的科学见解和发现。原则上，QOVAE可以直接应用于其他物理科学领域，例如用于量子计算的新量子电路的设计。目前，噪声中尺度量子（NISQ）计算算法[51–53]有望在众多应用中超越经典计算能力。这些方法中的大多数都需要良好的先验知识来有效地探索并表示参数和解的空间。所有可能的量子电路所形成的指数大的希尔伯特空间，使得在这些电路的结构-性质关系还没有完全理解的情况下，这项任务在计算上很困难。QOVAE学习领域专家理解的有意义表示的能力可以提供关于希尔伯特空间如何在这些参数化量子电路中组织的见解。库瓦在量子光学实验中学习了一种无畏的纠缠表示法。我们与QOVAE的合作是物理科学领域的一个例子，它打开了深层生成模型的黑匣子，发展了有前途的科学见解。

# 致谢

A.A.-G.感谢加拿大150研究主席计划、加拿大工业研究主席计划以及谷歌公司以谷歌聚焦奖的形式提供的支持。M.K.感谢FWF（奥地利科学基金）通过第J4309号埃尔文·施罗丁格奖学金提供的支持。两位作者声明，没有相互竞争的利益。

[1] E.Schr¨odinger，“分离系统之间概率关系的讨论”，《剑桥哲学学会数学学报》31555（1935）。

[2] A.爱因斯坦、B.波多尔斯基和N.罗森，“物理现实的量子力学描述能被认为是完整的吗？”物理回顾47777（1935）。

[3] J.S.Bell，“关于爱因斯坦-波多尔斯基-罗森悖论”，物理-物理-菲齐卡1195-200（1964）。

[4] M.Giustina，M.A.Versteegh，S.Wengerowsky，J.Handsteiner，A.Hochrainer，K.Phelan，F.Steinlechner，J.Kofler，J.-˚A.Larsson，C.Abella&apos;n，et al.，“纠缠光子贝尔定理的无漏洞重大测试”，《物理评论快报》115250401（2015）。

[5] L.K.Shalm，E.Meyer Scott，B.G.Christensen，P.Bierhorst，M.A.Wayne，M.J.Stevens，T.Gerrits，S.Glancy，D.R.Hamel，M.S.Allman，et al.，“本地现实主义的强无漏洞测试”，《物理评论快报》115250402（2015）。

[6] K.-W.Bong，A.Utreras Alarco&apos;n，F.Ghafari，Y.-C.Liang，n.Tischler，G.Cavalcanti，G.J.Pryde和H.M.Wiseman，“关于wigner的朋友悖论的一个强大的不可去定理”，自然物理学16，1199（2020）。

[7] 尹俊彦、曹永彦、李永海、任俊光、廖世凯、张立群、蔡文贵、刘永彦、李宝丽、戴海峰等，“基于卫星纠缠的量子密钥分配”，物理评论快报119200501（2017）。

[8] A.Peruzzo，J.McClean，P.Shadbolt，M.-H.Yung，X.-Q.Zhou，P.J.Love，A.Aspuru Guzik和J.L.O&apos;brien，“光子量子处理器上的变分本征值求解器”，自然通信5，1（2014）。

[9] S.Paesani，Y.Ding，R.Santagati，L.Chakhmakhchhyan，C.Vigliar，K.Rottwitt，L.K.Oxenløwe，J.Wang，M.G.Thompson和A.Laing，“硅芯片中光量子态的产生和采样”，《自然物理学》第15925期（2019）。

[10] 钟海山，王海峰，邓玉华，陈美华，彭丽华，罗玉华，秦俊华，吴德民，丁克强，胡玉华等，“利用光子的量子计算优势”，科学3701460（2020）。

[11] L.Wang，X.Zou和L.Mandel，“无诱导发射的诱导相干”，物理评论A 444614（1991）。

[12] T.Herzog，J.Rarity，H.Weinforter和A.Zeilinger，“通过干涉阻碍双光子创造”，《物理评论快报》72629（1994）。

[13] A.J.门森、A.E.琼斯、B.J.梅特卡夫、M.C.蒂希、S.巴尔兹、W.S.科尔塔默和I.A.沃尔姆斯利，“可分辨性和多粒子干涉”，物理评论快报118153603（2017）。

[14] 冯丽泰、张敏敏、刘德成、郑耀强、郭国平、戴德胜、郭国强、克雷恩、任正非，

“硅芯片中四光子态起源之间的非局域量子干涉观测”，arXiv:2103.14277（2021）。

[15] M.Krenn、M.Erhard和A.Zeilinger，《计算机启发的量子实验》，《自然评论物理学》2649（2020）。

[16] M.Krenn、M.Malik、R.Fickler、R.Lapkiewicz和A.Zeilinger，“新量子实验的自动搜索”，《物理评论快报》116（2016），10.1103/Physervlett。116.090405.

[17] M.Krenn，J.Kottmann，N.Tischler和A.AspuruGuzik，“通过量子光学实验的有效自动设计进行概念理解”，《物理评论》X11031044（2021）。

[18] P.Knott，“量子态工程和计量学的搜索算法”，新物理杂志18，073033（2016）。

[19] R.Nichols，L.Mineh，J.Rubio，J.C.Matthews和P.A.Knott，“用遗传算法设计量子实验”，量子科学与技术4045012（2019）。

[20] L.O&apos;Driscoll，R.Nichols和P.A.Knott，“设计量子实验的混合机器学习算法”，量子机器智能1，5（2019）。

[21]A.A.梅尔尼科夫、H.鲍尔森·诺特鲁普、M.克雷恩、V.邓伊科、M.蒂尔什、A.泽林格和H.J.布里格尔，“主动学习机器学会创造新的量子实验”，《美国国家科学院刊》第115期，第1221-1226页（2018年）。

[22]J.M.Arrazola，T.R.Bromley，J.Izac，C.R.Myers，K.Bra&apos;dler和N.Killoran，“光子量子计算机上状态制备和门合成的机器学习方法”，量子科学与技术4024004（2019）。

[23]R.Salakhutdinov，“学习深层生成模型”，《统计及其应用年鉴》2361（2015）。

[24]A.Razavi、A.v.d.Oord和O.Vinyals，“使用vq-vae-2生成不同的高保真图像”，arXiv预印本arXiv:1906.00446（2019）。

[25]S.R.鲍曼、L.维尔尼斯、O.维亚尔斯、A.M.戴、R.乔泽福维奇和S.本吉奥，“从连续空间生成句子”，arXiv预印本arXiv:1511.06349（2015）。

[26]S.Semeniuta，A.Severyn和E.Barth，“用于文本生成的混合卷积变分自动编码器”，arXiv预印本arXiv:1702.02390（2017）。

[27]A.Roberts，J.Engel，C.Raffel，C.Hawthorne和D.Eck，在国际机器学习会议（PMLR，2018）第4364-4373页。

[28]B.Sanchez Lengeling和A.Aspuru Guzik，“使用机器学习的反向分子设计：物质工程的生成模型”，《科学》361，360（2018）。

[29]D.P.Kingma和M.Welling，“自动编码变量贝叶斯”，arXiv预印本arXiv:1312.6114（2013）。

[30]R.Go&apos;mez Bombarelli，J.N.Wei，D.Duvenaud，J.M.Herna&apos;ndez Lobato，B.Sa&apos;nchez Lengeling，D.Sheberla，J.Aguilera Iparraguirre，T.D.Hirzel，R.P.Adams和A.Aspuru Guzik，“使用数据驱动的连续分子表示的自动化学设计”，ACS中央科学4，268（2018）。

[31]W.Jin，R.Barzilay和T.Jaakkola，“用于分子图生成的连接树变分自动编码器”，arXiv预印本arXiv:1802.04364（2018）。

[32]W.Jin，R.Barzilay和T.Jaakkola，“使用结构母题的分子图的分层生成”，国际机器学习会议，4839

(2020).

[33]姚志强，B.萨恩切斯·伦格林，N.S.博比特，B.J.布西奥，S.G.H.库马尔，S.P.柯林斯，T.伯恩斯，T.胡泰康，O.K.法哈，R.Q.斯努尔等，“具有深层生成模型的纳米多孔晶体网状材料的逆向设计”，自然机器智能3，76（2021）。

[34]潘俊华，陈中斌，吕春云，韦恩富特，

A.Zeilinger和M.Zukowski，“多光子纠缠与干涉测量学”，现代物理学评论84777（2012）。

[35]M.Krenn、A.Hochrainer、M.Lahiri和A.Zeilinger，“路径身份的纠缠”，物理评论信函118080401（2017年）。

[36]D.Bouwmeester，J.-W.Pan，M.Daniell，H.Weinferter和A.Zeilinger，“三光子格林伯格-霍恩-泽林格纠缠的观察”，《物理评论快报》821345–1349（1999）。

[37]姚志强、王天强、徐炳、吕海华、潘国胜、鲍志强、彭志强、吕春云、陈耀安、潘俊华，“八光子纠缠的观测”，《自然光子学》6225（2012）。

[38]L.Allen，M.W.Beijersbergen，R.J.C.Spreeuw和J.P.Woerdman，“光的轨道角动量和拉盖尔-高斯激光模式的转换”，物理评论A 458185–8189（1992）。

[39]J.Romero，D.Giovannini，S.Franke Arnold，S.M.Barnett和M.J.Padgett，“增加高维双光子轨道角动量纠缠的维数”，《物理评论》A 86（2012），10.1103/physreva。86.012334.

[40]M.Krenn、M.Huber、R.Fickler、R.Lapkiewicz、S.Ramelow和A.Zeilinger，“一个（100 x 100）维纠缠量子系统的产生和确认”，《美国国家科学院院刊》1116243–6247（2014）。

[41]M.Erhard、M.Malik、M.Krenn和A.Zeilinger，“实验性格林伯格-霍恩-Zeilinger量子比特纠缠”，自然光子学12，759（2018）。

[42]Y-H.罗，H-S.钟，M.Erhard，X-L.王，L-C.彭，M.Krenn，X.Jiang，L.Li，N-L.Liu，C-Y.Lu，A.Zeilinger和J-W.Pan，“高维量子隐形传态”，物理评论信123，070505（2019）。

[43]J.Leach、M.J.Padgett、S.M.Barnett、S.Franke Arnold和J.Courtial，“测量单个光子的轨道角动量”，《物理评论快报》88

（2002），10.1103/physrevlett。88.257901.

[44]M.Huber和J.I.De Vicente，“多体系统中多维纠缠的结构”，《物理评论快报》110030501（2013）。

[45]D.W.Scott，《多元密度估计：理论、实践和可视化》（John Wiley&Sons，2015）。

[46]K.Shoemake，《第12届计算机图形与交互技术年会论文集》（1985）第245-254页。

[47]M.Krenn，X.Gu和A.Zeilinger，“量子实验和图形：作为完美匹配的相干叠加的多党态”，《物理评论快报》119240403（2017）。

[48]X.Gu、M.Erhard、A.Zeilinger和M.Krenn，“量子实验和图ii：量子干涉、计算和状态生成”，《美国国家科学院院刊》116，4147（2019）。

[49]C.Rudin，“停止解释高风险决策的黑箱机器学习模型，而是使用可解释模型，”自然机器智能1206

(2019).

[50]L.H.Gilpin、D.Bau、B.Z.Yuan、A.Bajwa、M.Specter和L.Kagal，2018年IEEE第五届数据科学和高级分析国际会议（DSAA）（IEEE，2018）第80-89页。

[51]J.Preskill，“nisq时代及以后的量子计算”，量子2，79（2018）。

[52]M.Cerezo，A.Arrasmith，R.Babbush，S.C.Benjamin，

S.Endo，K.Fujii，J.R.McClean，K.Mitarai，X.Yuan，L.Cincio和P.J.Coles，“变分量子算法”，自然评论物理，1（2021）。

[53]K.Bharti，A.Cervera Lierta，T.H.Kyaw，T.Haug，S.Alperin Lea，A.Anand，M.Degroote，H.Heimonen，J.S.Kottmann，T.Menke，et al.，“噪声中尺度量子（nisq）算法”，arXiv预印本arXiv:2101.08448（2021）。

[54]M.Mirhosseini，O.S.Magan〜a-Loaiza，M.N.O&apos;Sullivan，

B.Rodenburg、M.Malik、M.P.J.Lavery、M.J.Padgett、D.J.Gauthier和R.W.Boyd，“扭曲光下的高维量子密码术”，《新物理杂志》1703033（2015）。

[55]A.C.Dada，J.Leach，G.S.Buller，M.J.Padgett和E.Andersson，“实验性高维双光子纠缠和广义贝尔不等式的违反”，《自然物理学》第7677–680页（2011年）。

**补充材料**

# 1.方法

*A.潜变量模型*

考虑离散数据或连续数据的I.I.D样本的一些数据集X Z。我们假设数据是通过一些不可观测的连续随机变量生成的，这样联合分布可以写成p*θ*（x，z）=p（x | z）p（z）。*θθ*

真正的后验可以通过贝叶斯规则找到，即p（z | x）=p（x | z）p（z）/p（x），*θθθθ*

但由于边际似然p（x）的存在，这个问题很难解决，它可以计算为*θ*

zp（x）=p（x | Z）p（Z）dz，*θθθ*

由于可能性是潜在变量的复杂非线性函数，因此也很难处理。

数据的边际可能性由单个数据点的边际可能性之和组成：

*N*

logp（X）=logp（x1，…，xN）=logp（xi）。*θθ*十、*θ*

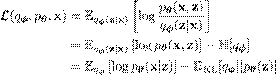
*我*=1

*B变分贝叶斯*

通过定义真后验q（z | x）的近似值，我们可以将单个边缘似然重写为logp（x）=DKL[q（z | x）| p（z | x）]+L（q），*φθφθφPθ,***十、**

其中，右边的第一项是近似后验概率与真实后验概率的KL散度。由于KL为正值，logp（x）≥ L（q），*θφPθ,***十、**

因此，L（q）是边际可能性的下界，称为ELBO，可以写成*φPθ,***十、**

*.*

我们想要优化L（q）关于变分和生成参数的变分下界。*φPθ,***十、***φ,θ*

*C随机梯度变分贝叶斯（SGVB）*

SGVB介绍了ELBO及其导数的一个简单实用的估计量。在特定选择的近似后验概率q（z | x）下，我们可以使用一些辅助噪声[29]的可微变换来重新参数化随机变量z，如下所示：*φ*

**Z**)在哪里。

我们现在可以通过抽样进行区分，并形成elbo的蒙特卡罗估计值，如下所示：

*,*

并简单地利用梯度

*.*

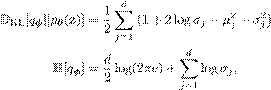
*D平均场假设*

在平均场变分推理中[？]，我们指定了一个近似的后验概率，例如，对角多元高斯函数：

*d qφ*（z | x）=（zi |x）=N（）。Y*Qφµ,σ*2

*我*=1

我们可以重新参数化z）并计算KL散度和熵，



先验p（z）=N（0，I），其中d是潜变量的维数。在变分自动编码器（VAE）中，我们使用神经网络对编码器和解码器进行参数化，如下节所述。

*E编码器*

我们的编码器是一个对角高斯，其参数是从数据流形到潜在空间的映射。我们的数据，量子光学实验∈ R、 用T元素表示的序列，每个元素来自一个由d个可能的设备组成的工具箱，*D*×T

*,*

其中log=g（x）。首先，g由三层卷积神经网络组成，h=Conv1d3（Conv1d2（Conv1d1（x）））。*µ,σ φ*

一个单层呈现这种形式

**十、**0 =Conv1d（x）=ReLU（，

w在哪里∈ Ris是卷积滤波器张量，由nf滤波器组成，每个滤波器具有长度和d特征。*NF*×`×d

层输出也是x0∈ R*NF*×T−`+1.

对于输入层，这只是d=d工具箱中用于创建任何实验的设备数量。ReLU（·）是按元素校正的线性单位函数，是一种卷积算子，它输出具有以下元素的张量

*,*

w&apos;f在哪里∈ Ris在序列（实验）中对tth元素（设备）进行操作的fth卷积滤波器的第个权重向量。*D*

编码器g的第二个组件是一个具有三层的MLP，它映射来自卷积神经网络的平坦输出h。关于潜在分布的参数

*µ,* 对数=MLPg（展平（h））。*σ*

*f、 译码器*

对于观测模型，每个数据点都是可能的设备元素的d元素工具箱中的一系列设备，因此我们可以将数据建模为独立的类别，其平均向量使用神经网络从潜在样本映射而来，

*TPθ*（x | z）=范畴（），=1Y*P***十、***TT*

哪里∈ [0,1]d是工具箱中每个设备的概率向量。我们的编码器将这些概率输出为=f（z）。*P***十、***TP*1*,...,PT,...,PTθ*

首先，f由一个三层递归神经网络组成，每个神经网络都带有选通递归单元（GRU），h=GRU3（GRU2（GRU1（MLPf（z））），

其中，MLPf是单层MLP，带有ReLU（.）激活。单层h=GRU（x）的形式为

**zxh**0t=σ（W+U）−1+b），rt=σ（Wrxt+Urht−1.*我T我T我*+bhr），

**H***,*

其中W、U、b是GRU层的参数。z0t和rt分别是更新和重置门向量，σ是S形函数。第一个GRU层的输入是向量的T长度序列[MLPf（z），…，MLPf（z）]。RNN的输出使用softmax层=softmax（Wht+b）t=1，。。。T*P***十、***T*

*g、 培训和数据详细信息*

我们手动对两个Qovae进行了初始超参数搜索。我们使用网格搜索找到了一组初始的训练超参数。我们发现在大约1600个时期进行了培训，以产生更好的验证准确性和ELBO值。我们使用SGD和Adam优化器[29]以低学习率训练QOVAE∼ 10−4.使用tensorflow的KERAS机器学习软件包进行培训。所有模型都在白鲸超级计算机上的V100节点上训练。最小批量网格为{32,64128256}，最佳批量大小为64。两种模型的所有实验的模型架构都是相同的。我们使用网格搜索来搜索编码器和解码器架构。对于卷积层，我们在6、12、18、36个滤波器号上搜索长度为3、4、5的解码器和编码器中的MLP，在每个层中考虑32、64、128、256个隐藏单元。对于GRU层，我们考虑大小为128的隐藏状态，以及映射到GRU层的64单位层。为了使用随机搜索/Melvin生成数据，为了随机抽样一个实验xπ=（xπ），我们首先抽样一个实验长度`∼ 统一{1，…，T}，然后用替换πi从工具箱中采样`设备xπ∼ 一致{1，…，D}。接下来，我们计算实验的总纠缠度S，并对xS>0或xS=0的纠缠度进行分类。1*,...,xπ`我*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **装置** | **代币** | **视力的** | **活动** | **操作人员** |
| 下转换 | DownConv（ψ，p，p0） |  | |ψi+| `ip |− `ip0P*`* | DCpp0 |
| 分束器 | BS（ψ，p，p0） |  |  | BSpp0 |
| 镜子 | Ref（ψ，p） |  | |`知识产权−→ 我|− `知识产权 | Rp |
| 多夫棱镜 | DP（ψ，p） |  | |`知识产权−→ ieiπ`|− `知识产权 | 民进党 |
| 全息图 | OAMHolo（ψ，p，n） |  | |`知识产权−→ |` + 夹 | H*NP* |
| 全息图 | OAMHolo（ψ，p，−n） |  | |`知识产权−→ |` − 夹 | H−p n |

表III：设备主表分为列，显示1）标准设备名称2）用于实验设置序列表示的令牌，用于将任何设置转换为一个热向量序列3）用于实验设置图形表示的设备视觉4）操作员设备表示作用于系统状态的设备5）操作员在该状态下对任何特定设备执行的操作

# 2.量子态

*a、 量子系统*

我们正在研究四光子系统中两对OAM纠缠光子的多体纠缠。状态由光子的OAM表示，OAM是光子的轨道角动量。每个最大纠缠量子光学实验装置将产生一些状态，它们生活在希尔伯特空间中，希尔伯特空间由单个子系统的张量积定义，张量积由光子a、b、c、d定义，由H=Ha给出⊗血红蛋白⊗Hc⊗高清

                              |ψi=Xα|ψi（1）*ijklijkl*

*ijkl*∈`橡树油

我们可以将系统中的一般状态定义为所定义的基态的叠加

                        |ψijkli=|iia⊗ |三角帆⊗ |基奇⊗ |盖子（2）

                                         iia | jib | kic | lid | i，j，k，li（3）

其中，i，j，k，l是光子的OAM量子数，OAM态提供了多级qudit系统的合适物理实现，该系统已被证明可提高量子密钥分配方案的鲁棒性。通常，光子OAM状态采用离散整数值m∈ Z和OAM~。7种OAM模式的原理验证实验−3.→ 3已被证明[54]。

*`*橡树油= {−M−`,−M−` + 1.−1,0,1,...,m`− 1，m`}

其中m`是设置可以达到的最大OAM数，并且−M−` 是能到达的最小的。这意味着每个OAM量子数可以



图7：两个SPDC晶体形成初始状态

采取可能的行动−` +m`+1离散值，因为系统由四个光子组成（i∈ {a，b，c，d}）希尔伯特空间的维数是（m）−`+ m`+1），每个基特居住在CQ（m）中−`i+m+1）Q*我我我我`我*

*b、 初始状态和SPDC*

在这里，初始状态由双自发参数下转换（SPDC）过程创建。SPDC是实验产生光子对的广泛来源。多个SPDC过程可用于产生多体纠缠，因为二维偏振纠缠是众所周知的[36,37]。然而，我们使用的不是偏振，而是光子的OAM[38–40，55]，这是基于光子波函数的空间结构的离散高维自由度。示例1的输入状态是来自SPDC的双重发射，这导致初始状态是乘积状态| 0ia | 0ib的形式⊗ |0ic | 0id，具有一般形式和任意顺序

*dc*

                             |ψi=N |`ia |− `ib+| ic |− `id（4）十、

*`*=−dc，其中dc是所考虑的SPDC的最高阶，对于光子对a、b和c，d.N是一个归一化常数。在创建数据集时，我们只考虑初始状态的DC＝0。

                                  |ψi=|0ia |0ib+|0ic | 0id（5）

这是两个初始SPDC设备产生的非规范化状态，当我们可视化实验时，我们将其描述为两个灰色矩形，以描述晶体，如图7所示。

**算法1：**状态计算

1: ∼ pdata（x）**输入x**

2:|ψ0i=|0ia | 0ib+| 0ic | 0id**初始化**

    三：哦

7: ←− 部分种族（|ψi）8：←− −Tr（日志）*ρ* **s***ρρ*

9:=P=P（ρ）+P（ρ）*sk sKj Saj我知道我*

10: **回来***s*



# 3.态和纠缠计算

为了计算具有SPDC过程|ψ0i=|0ia |0ib+|0ic |0id初始状态的某些实验装置x的状态，我们通过从定义实验的光学设备序列中提取定义的操作符来定义该状态将经历的操作集。对于每个xt∈ x我们有一个相应的操作符Ot，它根据表2通过作用于它来改变状态。然后，我们将四个态的方序| i | i |进行规范化，使每个态的方序| i |改变⊗|ψi/hψ|ψi。如果没有四个粒子，或者状态由一个基态组成，那么实验就没有纠缠。

现在我们必须使用前面段落和算法1中计算的系统最终态来量化和计算系统中的纠缠。因为我们的状态生活在希尔伯特空间H=HA⊗ 血红蛋白⊗ HC⊗ 高清as

                                  |ψi=|iia |起重臂| kic |盖（6）十、*αijkl*

*ijkl*

系统的密度矩阵如下所示：

*ρ* =|ψihψ=X X*αijklαi*0*J*0*K*0*L*0|ijklihi0j0k0l0 |（7）

*ijkl i*0*J*0*K*0*L*0

我们需要跟踪每个子系统或光子ρa，ρb，ρc，ρd的四个约化密度矩阵。例如，对于a，我们可以通过追踪其他子系统来计算ρa=Trbcd（ρ）。显式：ρa=hl | dhk | chj | b·|ψihψ|·| jib | kic | lid（8）十、

*jkl*

其他三个可以用类似的方式计算。我们还需要跟踪每个光子对ρab，ρac，ρad的三个约化密度矩阵。同样，在光子对ab的情况下，我们可以通过追踪其他子系统来计算ρab=Trcd（ρ）。明确地说：生成数据集的梅尔文算法–1。生成随机量子光学设置

2.计算其态和纠缠度3。根据纠缠度添加到相应的数据集

*ρab*= 十、香港| c⊗ hl | d·|ψihψ|·| kic⊗ |盖子（9）

*吉隆坡*

另外两个可以用类似的方式计算。我们感兴趣的是两个主要的矢量量化系统的纠缠度；1） 冯·诺依曼熵向量∈ Rand 2）施密特秩向量r∈ Z7 7

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 哪里 |  |  |
|  |  |  秩（ρa） )  秩（ρ） *B* |

                ρc  S（ρc）  等级(

                  

*ρ* =  ρd s= S（ρd） r= 秩（ρd） (10)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |    秩（ρac） 秩（ρad） |

     ρab S（ρab） 等级(

为了解释SRV，考虑3个粒子的简单情况和具有（4，2，2）SRV的状态I i。

) (11)

在这里，第一个粒子与其他两个粒子是四维纠缠的，而第二个和第三个粒子都只与其他粒子是二维纠缠的。此外，S（·）是由

(12)

其中ps是量子系统ρa的本征值。

纠缠熵是衡量构成两部分复合量子系统的两个子系统之间量子纠缠度的一种度量。给定复合系统的纯二分量子态，约化密度矩阵描述子系统的状态。纠缠熵是任何子系统约化密度矩阵的冯·诺依曼熵。如果非零，则子系统处于混合状态，两个子系统纠缠。

我们将纠缠度量S定义为系统所有二分体的所有纠缠熵之和

*s*= 十、*s*（ρaj）+十、*s*（ρi）（13）

*J*6=a i

假设量子系统由n个粒子组成，则系统的二分是将系统分为A和b两部分的分区，分别包含n1和n2粒子，其中n1+n2=n。二分纠缠熵是关于这个二分纠缠定义的。

|  |
| --- |
| 图8：QO实验装置的图表，其状态在下一节中计算 |

# 4.示例状态计算

使用Symphy python包中的符号代数自动进行状态计算。为了演示的目的，让我们考虑一个简单的量子光学实验的状态计算，如图8所示，实验中的器件序列通过操作符的序列在状态上操作。

                           学士学位→ H1b→ 直流→ R→ H1a（14）*公元前光盘C*

从初始状态|ψ0i=|0ia |0ib+|0ic | 0id开始，我们应用每个运算符，以找到以下公式给出的最终状态：

|ψi=H1a·R·DC·H1b·BS·|ψ0i*C光盘公元前*

设置中的第一个设备是光子路径b和c上的分束器，操作员BSbc作用于初始状态，将b和c KET替换为它们的叠加

接下来，设备H1b将向所有b KET添加1个OAM，这样光子b的2个零OAM变成| 0ib−→ |1ib

然后应用设备DCc，d

|ψi=|ψi+|0ic | 0id+|− 1ic | 1id）+1ic |− 1id

然后应用设备Rc和设备H1a，我们翻转c并添加一个i预因子，以及增加kets a的OAM。然后我们将状态平方化并标准化：

|ψi→ |ψi⊗ |ψi和

我们只剩下以下有助于四维纠缠的项：

|ψi=|1,1，−1.−1i+|1,1,0,0i+|1,1,1,1i

# 5.进一步的实验

|  |
| --- |
|  |
|  |  |

图9：学习结构分布我们明确检查QOVAE High是否学习了训练分布的全局属性。我们观察生成的实验中设备的分布，告诉我们模型对训练实验的显式结构了解到了什么。通过绘制直方图，捕捉从训练数据和QOVAE的随机实验样本中发现的每个实验的基本元素设备数量的分布，我们可以看到QOVAE捕捉训练数据的结构分布有多好。为此，我们从QOVAE High及其训练数据中取样10公里的实验，然后绘制实验装置编号的历史程序图。我们重点介绍了主要器件，包括全息图、多芬棱镜和反射器件的数量，以及下变频器和分束器等双程器件的数量。我们可以看到，该模型准确地了解了实验中平均存在多少DPs和R。对于双路径设备来说，直方图是相似的，QOVAE对它们都有相当好的倾斜，但稍微低估了。对于全息图，我们也得到了一个像样但不精确的匹配。总的来说，可以肯定地说，QOVAE在训练实验中了解了全球结构。

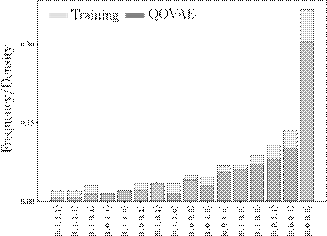


图10：状态分布为了评估QOVAE high是否在训练数据中学习到量子状态的分布，我们直接比较基频kets | iia⊗ |三角帆⊗ |基奇⊗ |根据来自QOVAE的10K取样实验装置和训练数据计算的状态中出现的lid。为了做到这一点，我们在这里绘制了两个样本中光子OAM模式为零或一的基KET直方图。很明显，0或1 OAM的基频KET在QOVAE产生的量子态或训练实验产生的量子态中以相同的频率出现。

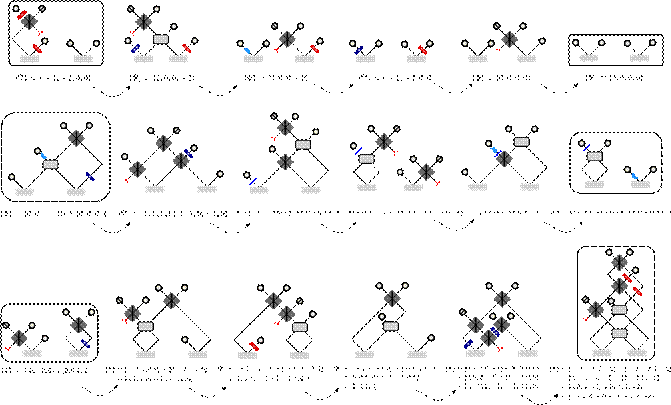


图11：不同量子态之间的插值为了证明QOVAE学习了一个潜在的表示，它编码了任何实验量子态的相似性度量，我们在不同的态之间提供了三个插值。第一种是使用QOVAE Low在两个单基态之间插值。来自QOVAE High的下两个：在二基特状态和三基特状态之间插值，以及在二基特状态和八基特状态之间插值。对于第一种情况，我们看到，沿着插值路径，模型也会解码单个ket状态。对于第二个，我们看到插值的ket有两个，然后是三个ket。第三，我们看到各州的ket数量从2个逐渐增加到8个。

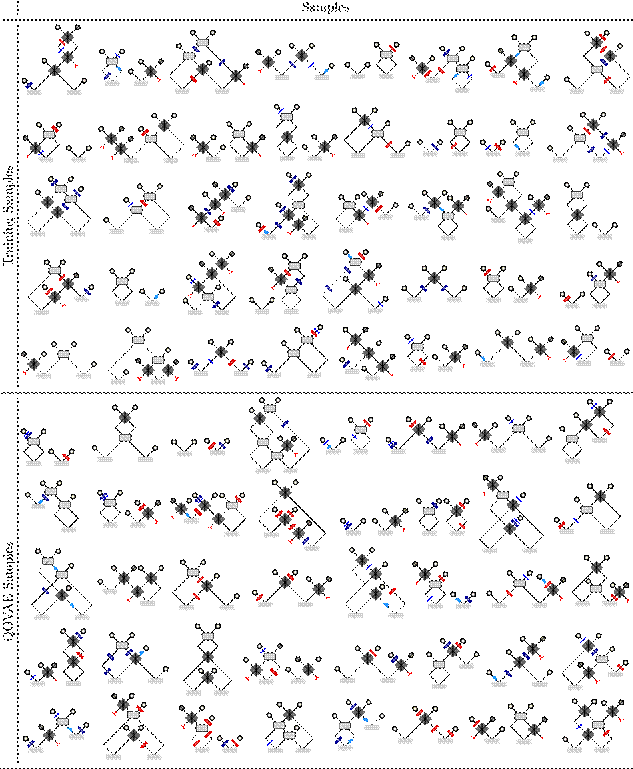


图12：更多样本。我们从训练数据和QOVAE中随机抽取40个实验，从先验z（s）中取样∼ N（0，I）并将其传递给解码器{f（z（s））}。我们显示它们的图形表示。很明显，这两个样本在四条可能的光子路径上显示了相似的设备和连接结构放置。

[[1]](" \l "_ftnref1" \o ")danielfs@cs.utoronto.edu

[[2]](" \l "_ftnref2" \o ")马里奥。krenn@mpl.mpg.de alan@utoronto.edu‡