

量子生成对抗网络在量能器 快速模拟中的可行性研究

黄晓忠，李卫东

中国科学院高能物理研究所

第二届量子计算与高能物理研讨会

2023/3/31

量能器快速模拟

● **Geant4**: 入射粒子 -> 模拟粒子在量能器中的运动 -> 量能器的能量沉积

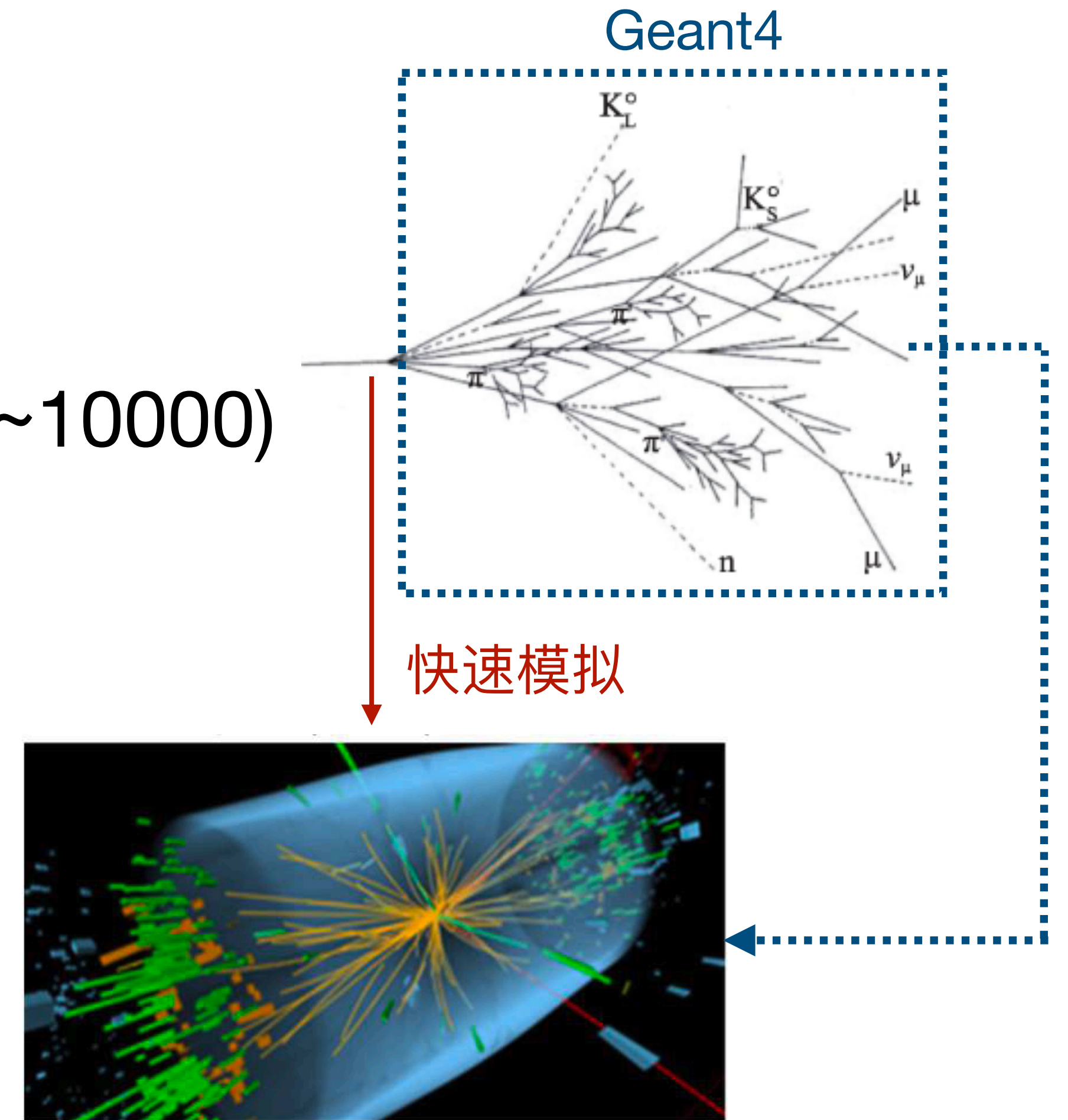
- 结果准确, CPU资源消耗很大
- 探测器几何复杂
- 次级粒子指数级增长

● **快速模拟**: 入射粒子 -> 量能器的能量沉积(晶体: ~ 10000)

- 参数化的方法
- 生成对抗网络: 训练计算量很大
-

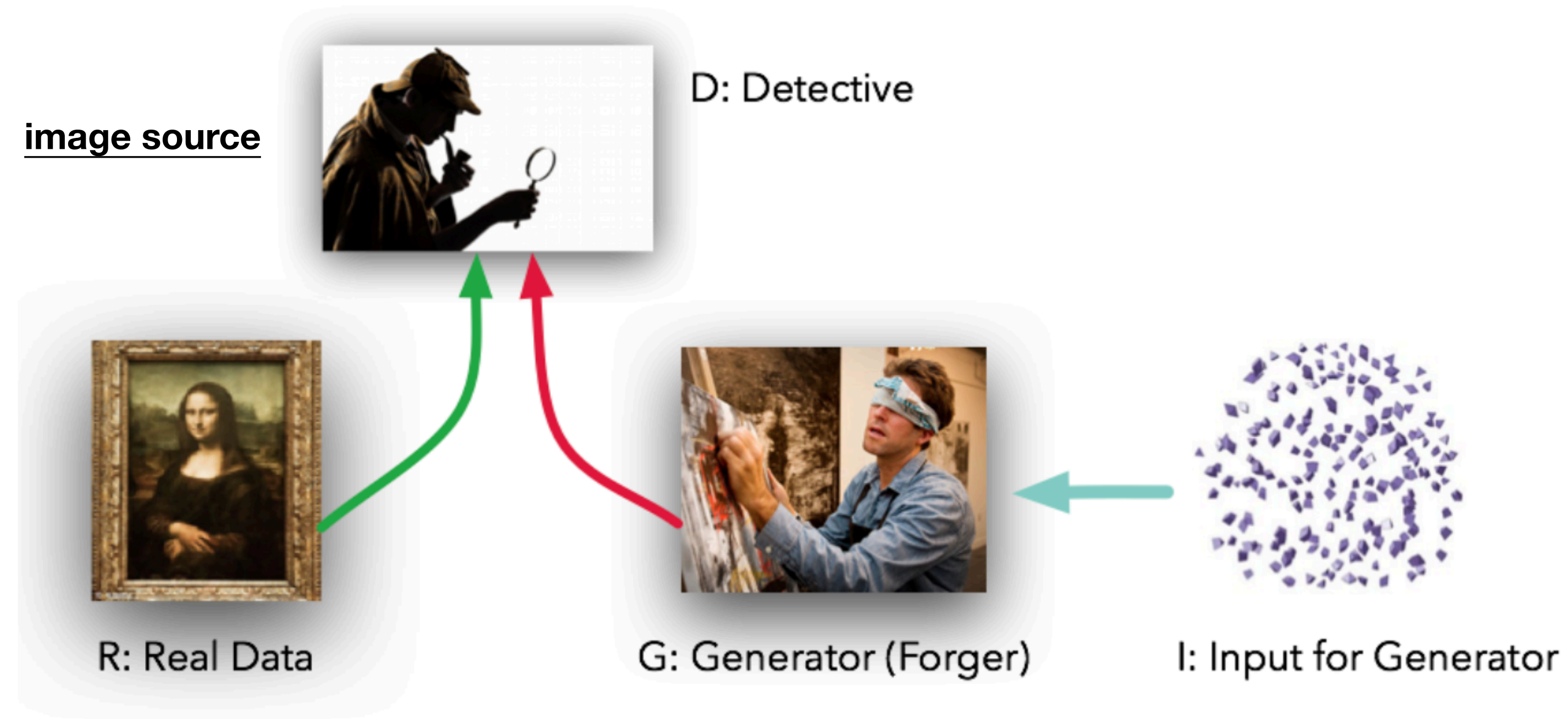
量子计算相对于经典计算有指数级的优势

量子计算 + 生成对抗网络: 超越经典生成对抗网络的潜力



经典生成对抗网络

- 经典生成对抗网络主要由生成网络和鉴别网络组成
 - 生成网络：生成伪造数据，欺骗鉴别网络
 - 鉴别网络：鉴别真实数据和伪造数据
 - 对抗式训练：生成网络和鉴别网络相互竞争，最终使生成网络生成和真实数据一致的分布

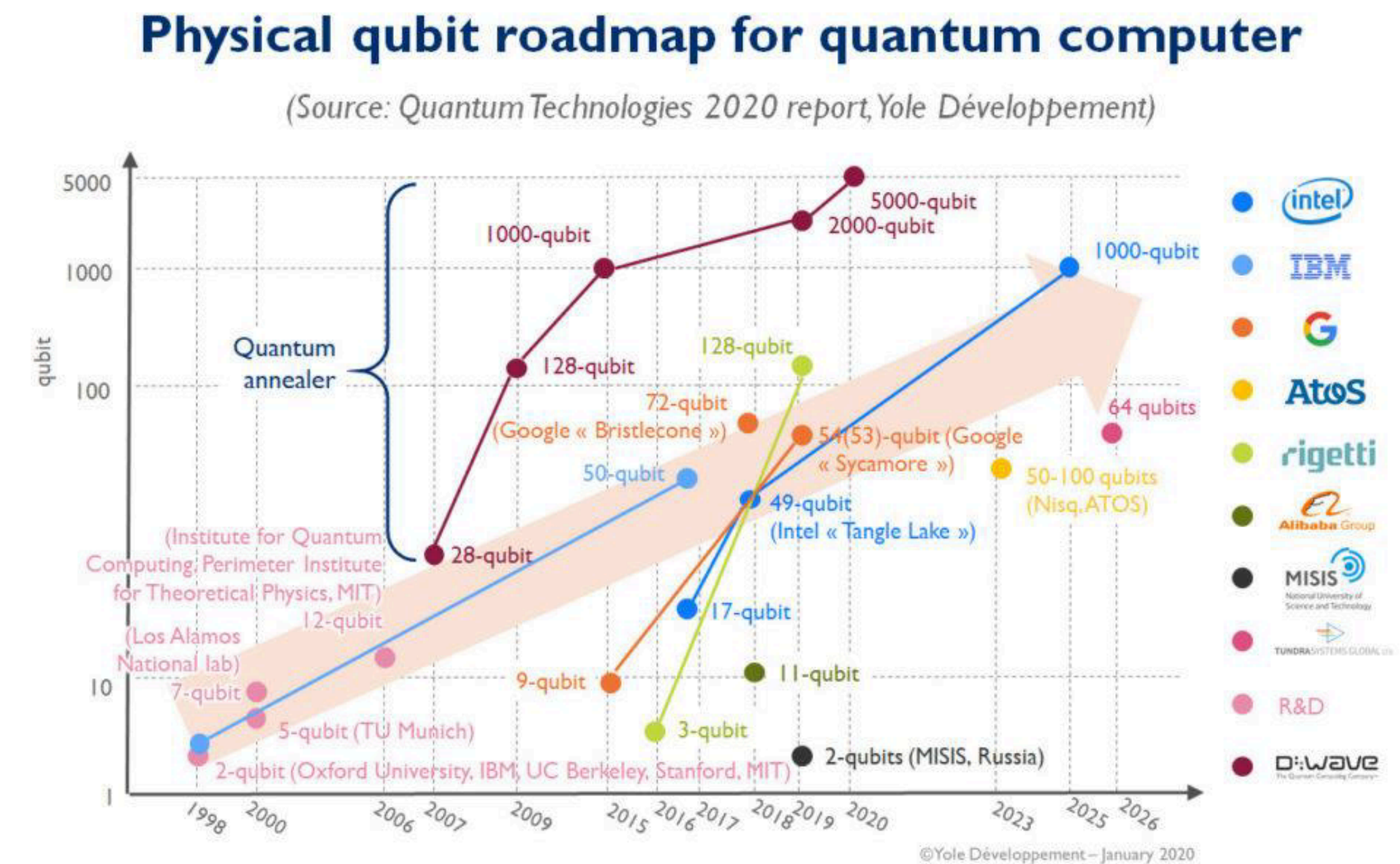
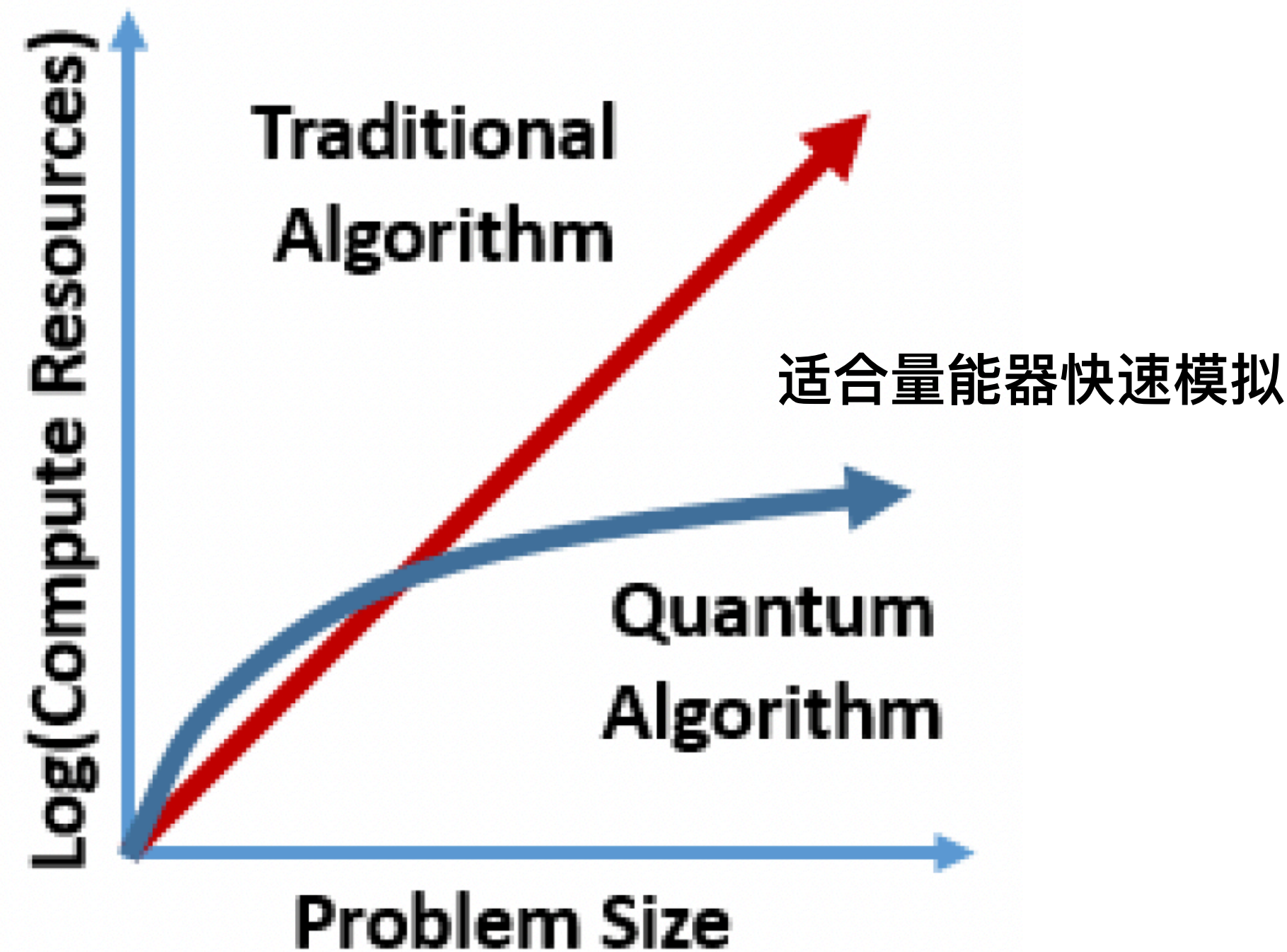


量子计算

- 量子计算：量子叠加，量子纠缠
- N个量子比特 $\rightarrow 2^N$ 个态
- 对于特定问题，性能相对于经典计算有显著提升



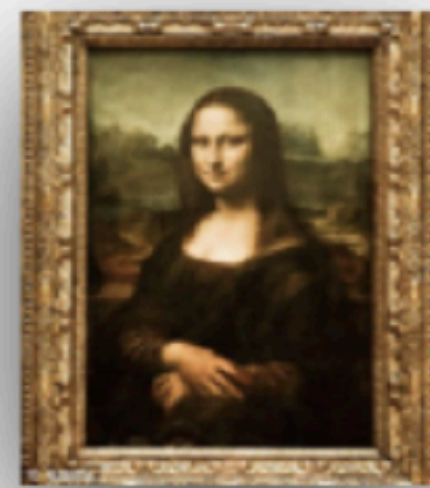
Image source



量子生成对抗网络

- 量子生成对抗网络一般有两种形式
 - 量子生成网络+经典鉴别网络
 - 量子生成网络+量子鉴别网络
- 嘈杂中型量子设备
 - 有噪声，量子比特不稳定
 - 量子比特: $[\sim 10, \sim 10^2]$

image source



R: Real Data



D: Detective



G: Generator (Forger)



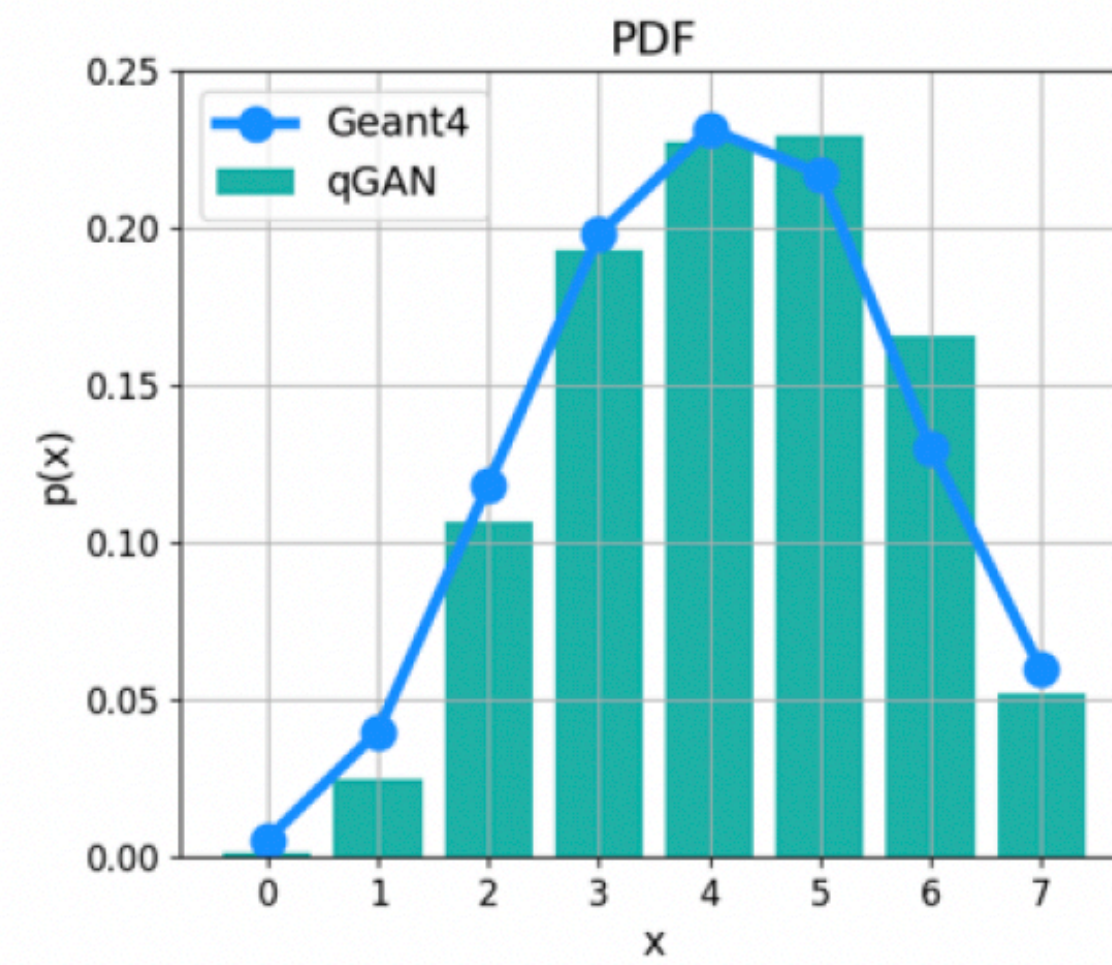
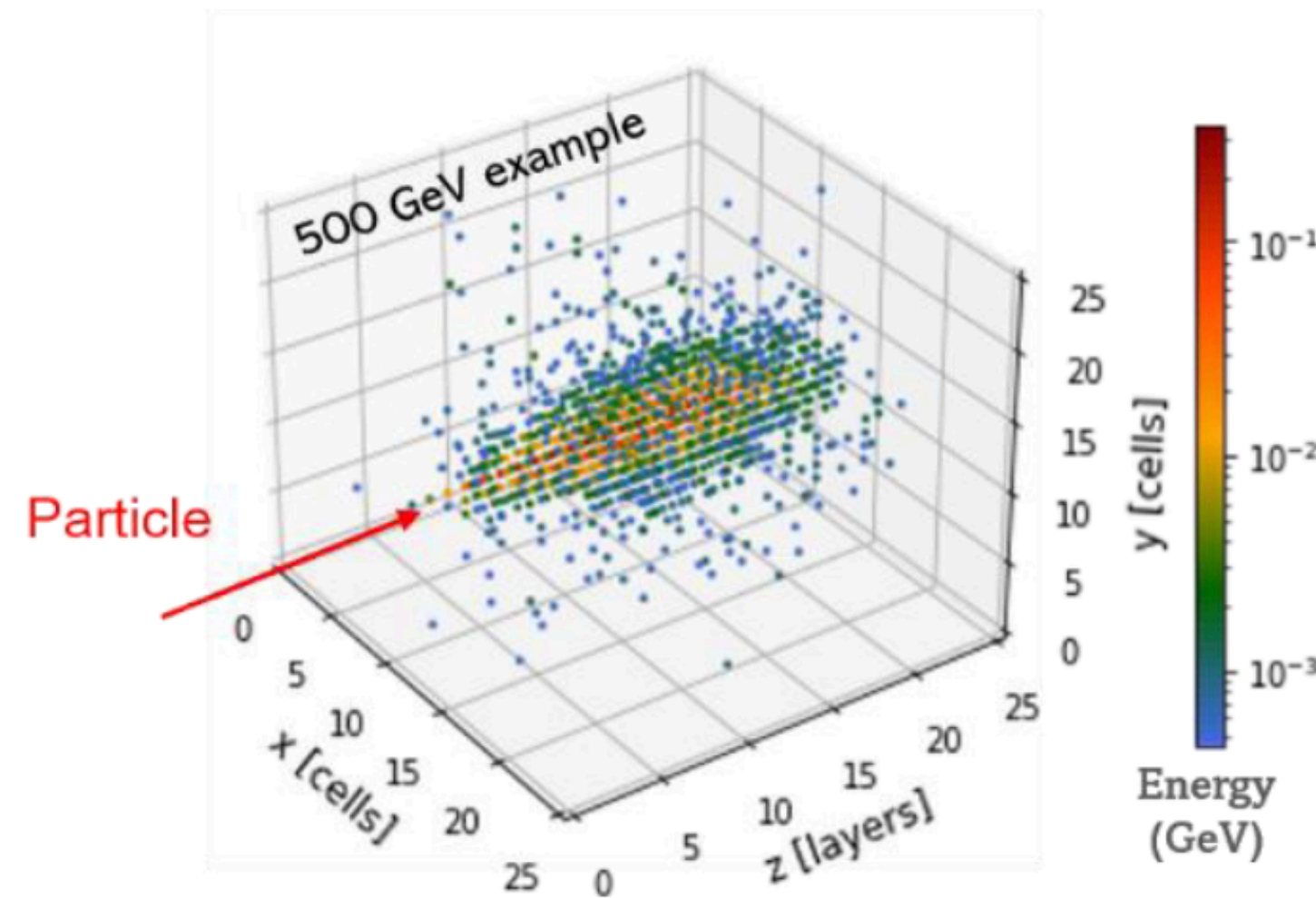
I: Input for Generator

研究现状

- 欧洲核子研究中心量子技术计划(CERN QTI) 在大概3年前成立了专门的研究小组 ([link](#))
- 德国DESY组: 1D, 2D 量能器平均能量分布的快速模拟 (无噪声模拟器, 有噪声模拟器)
- 我们重复了DESY组在**无噪声模拟器**上的工作, 将训练时间降低了一个量级

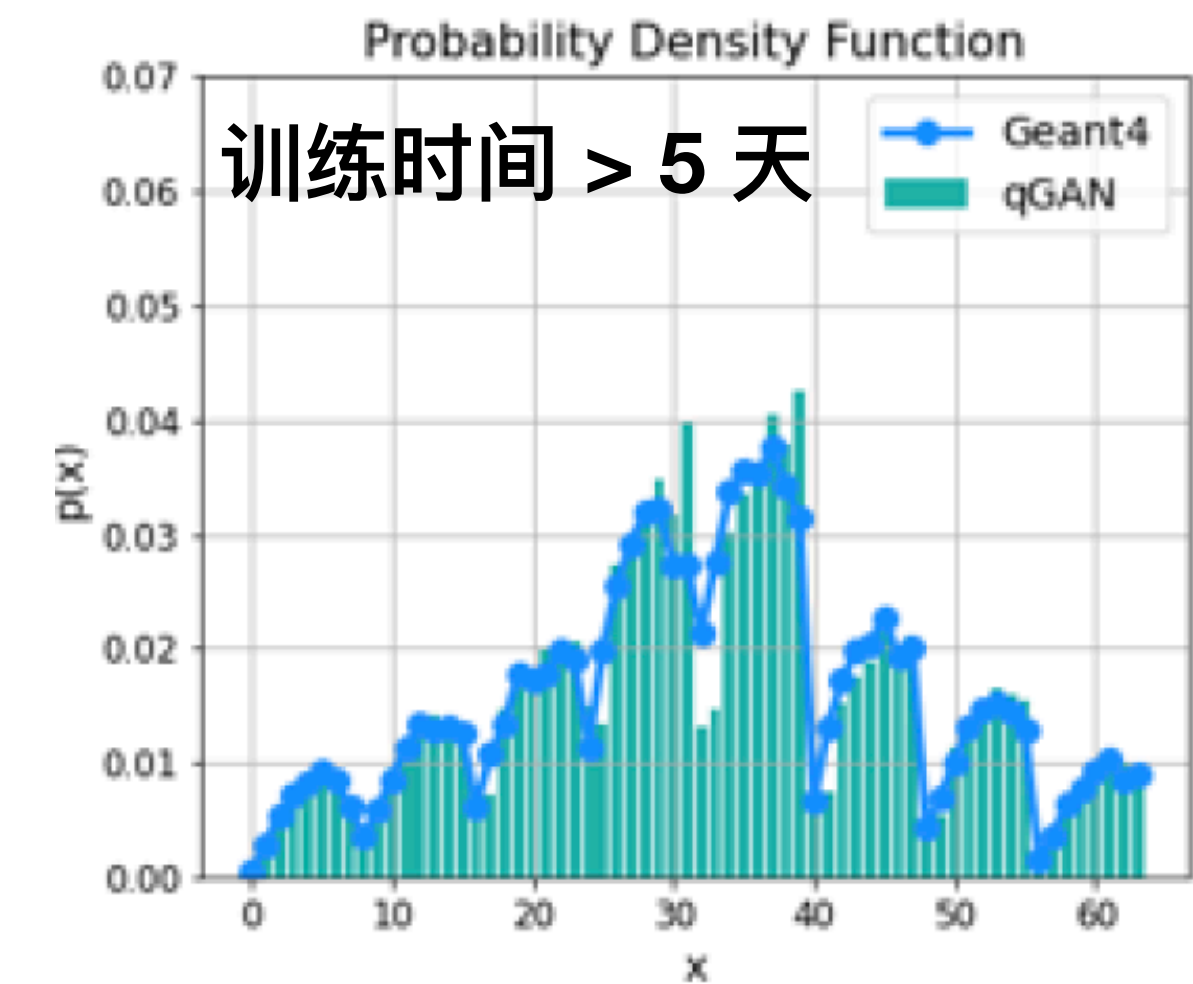
1D: 8个体元

3个量子比特 ($2^3 = 8$)



2D: 8x8个体元

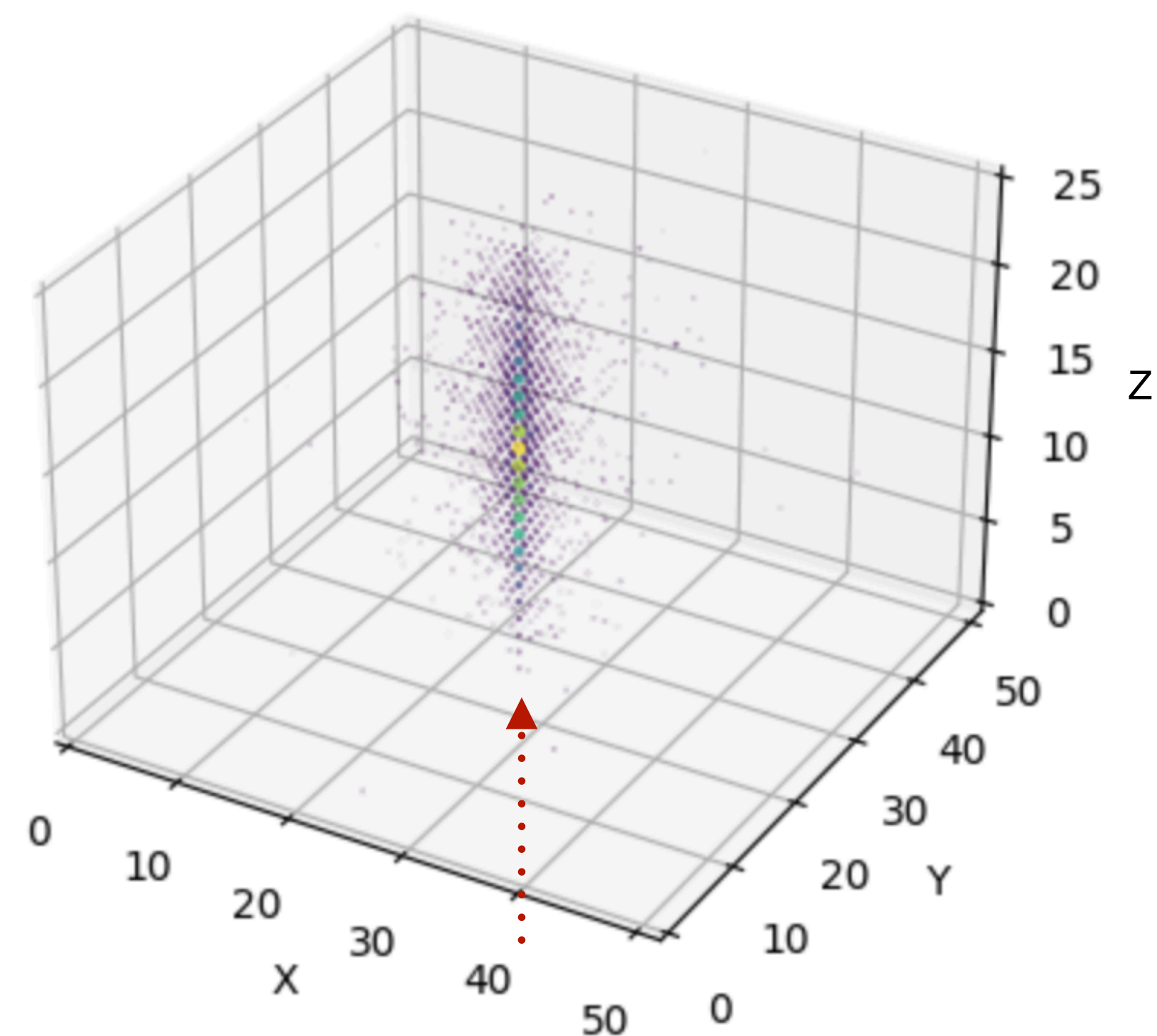
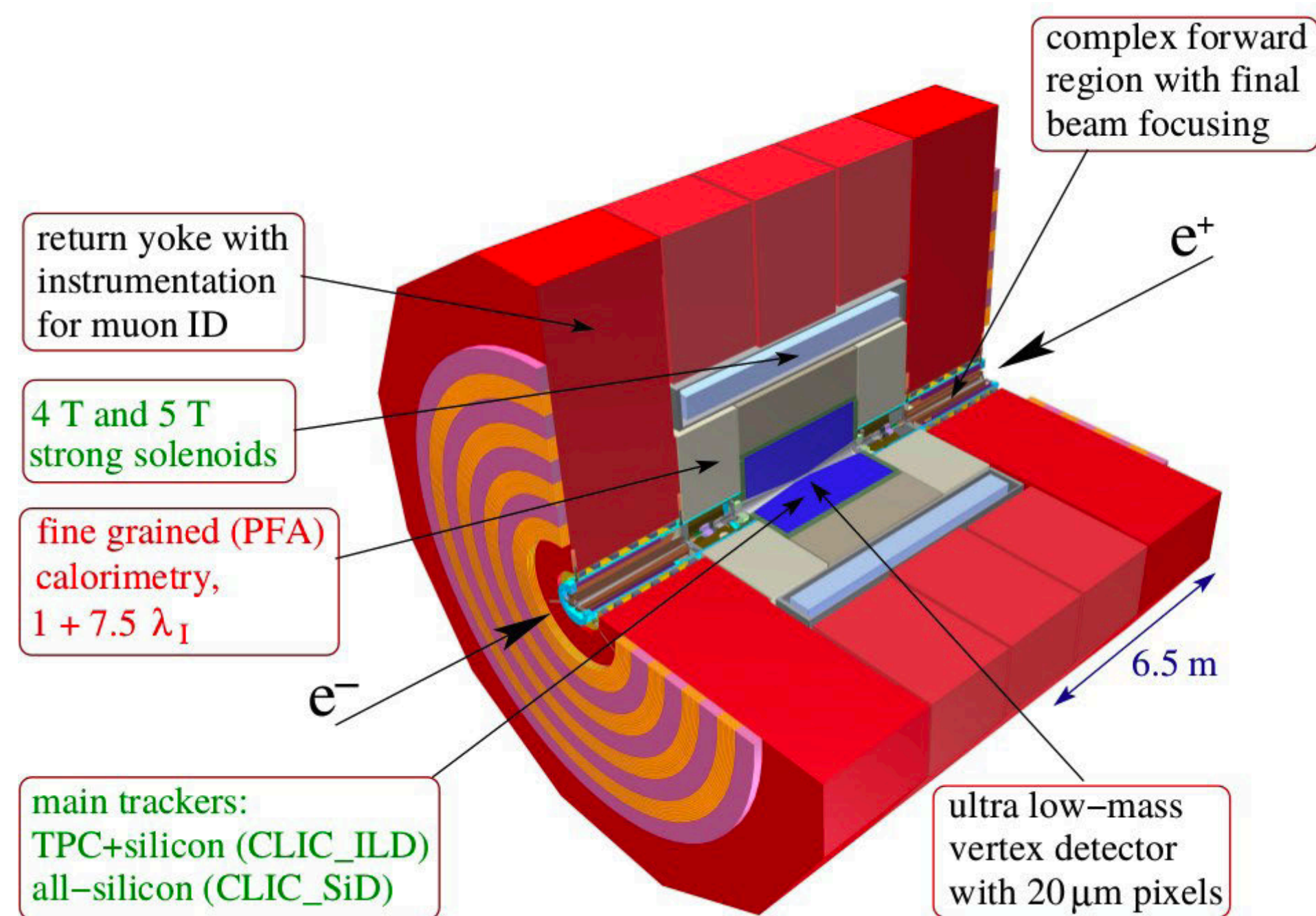
6个量子比特 ($2^6 = 8 \times 8$)



[image source](#)

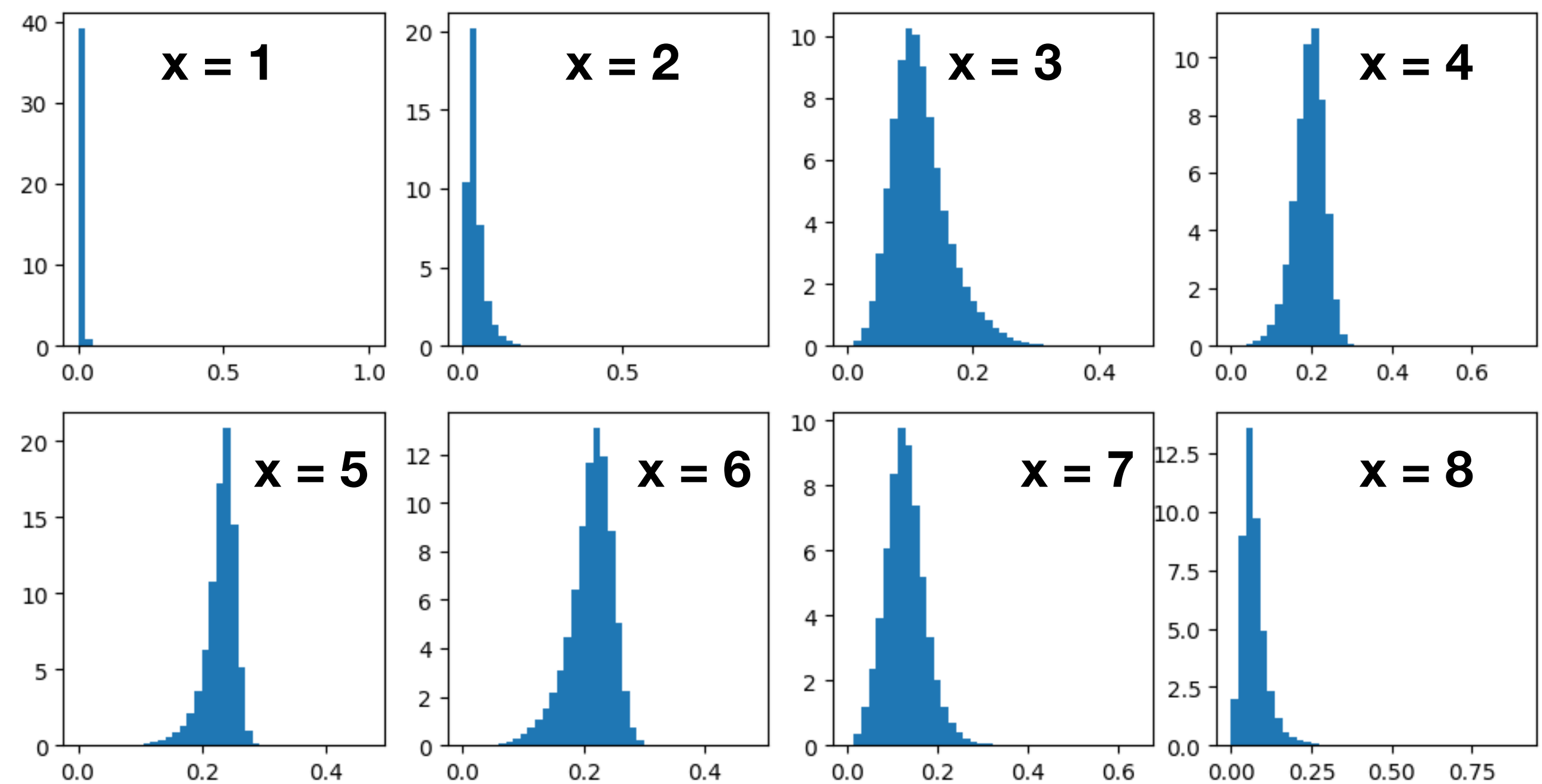
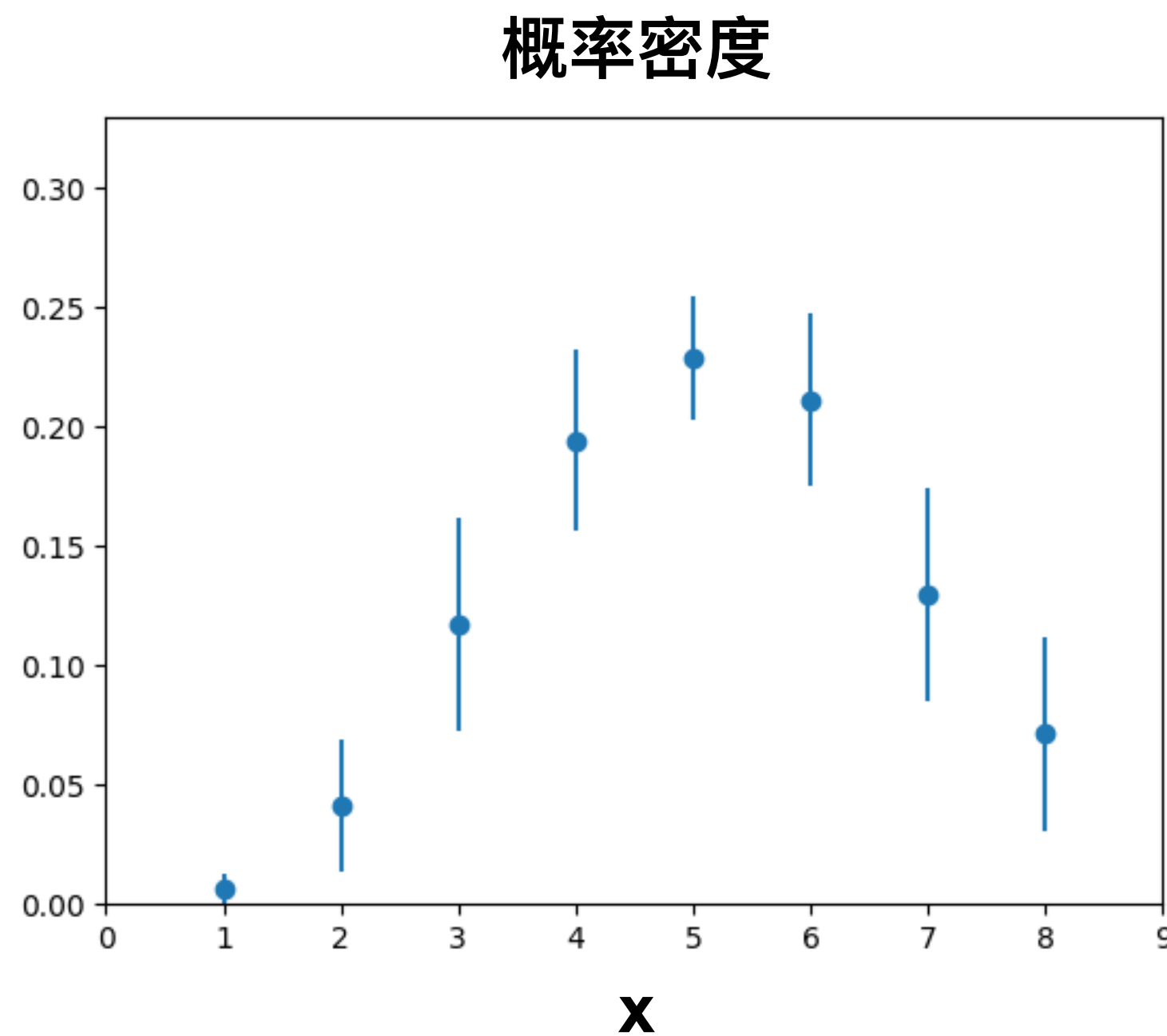
数据集

- CLIC 探测器的公开数据
 - 3D图像: 51 x 51 x 25 (6.5万像素点)
 - 将相邻多个像素点合并成体元, 以降低问题的维度



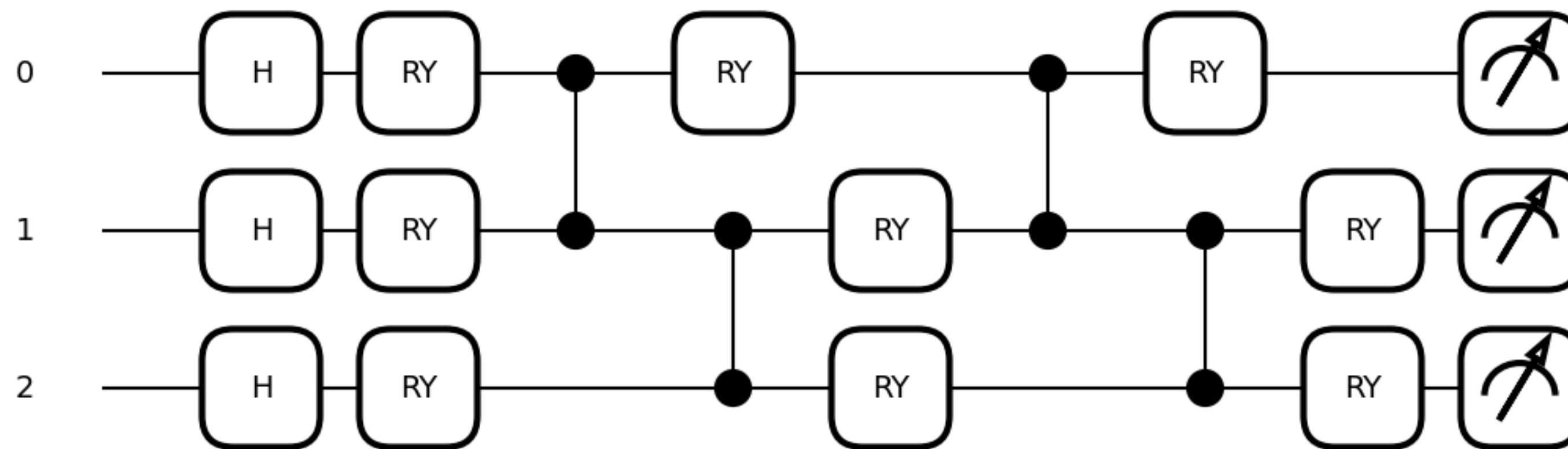
1D 量能器训练数据

- 3D: 51 x 51 x 25 像素点 -> 1D: 8 体元
 - X 维度上 51 个像素点合并成 1 个体元
 - Y 维度上 51 个像素点合并成 1 个体元
 - Z 维度上 25 个 像素点合并成 8 个体元 (粒子入射方向)



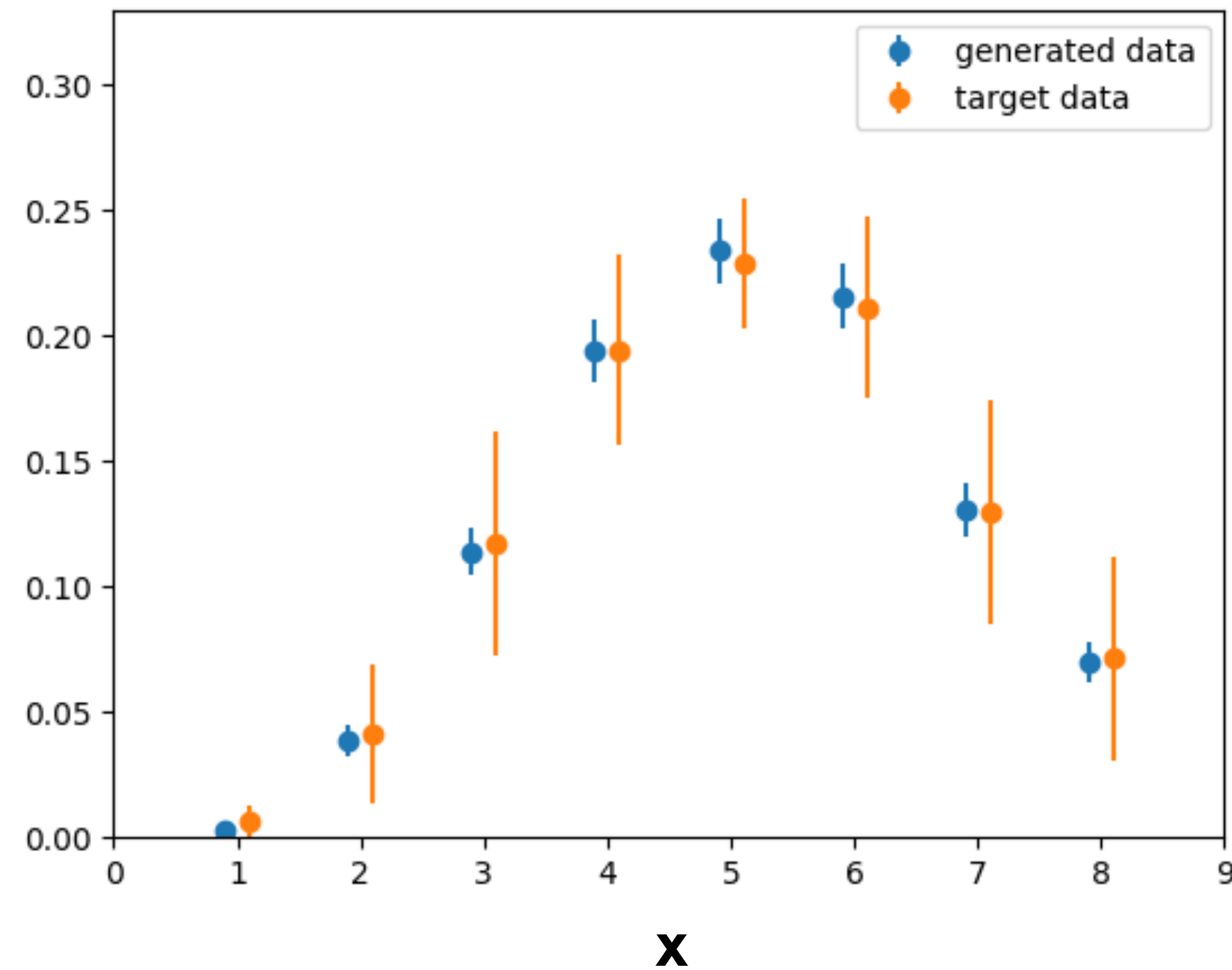
1D 数据的量子生成网络模型

- 量子生成网络模型主要由 H, RY, CZ 三种量子门组成
 - H: $|0\rangle \rightarrow |0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的叠加态
 - RY: 提供可训练的参数, 旋转角度
 - CZ: 让两个量子比特相干
- 输出 8 个量子态的频率 $\rightarrow$ 量能器 8 个体元能量沉积的概率
 - 每次测量得到 8 个量子态其中之一: $|000\rangle, |001\rangle, |010\rangle, |011\rangle, |100\rangle, |101\rangle, |110\rangle, |111\rangle$
 - 多次测量得到每个量子态的频率

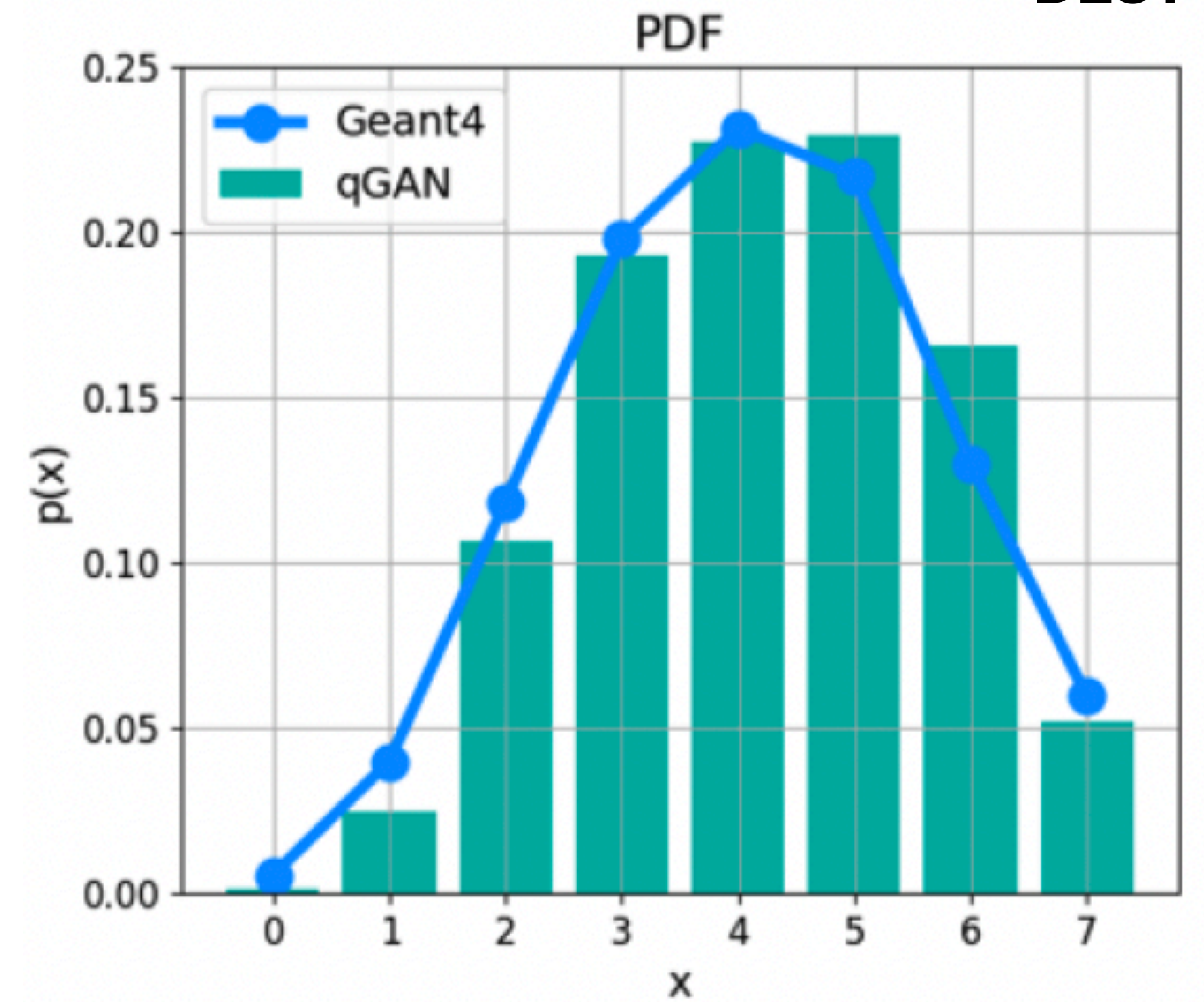


1D 量子生成对抗网络的性能

沉积能量的概率密度



DESY

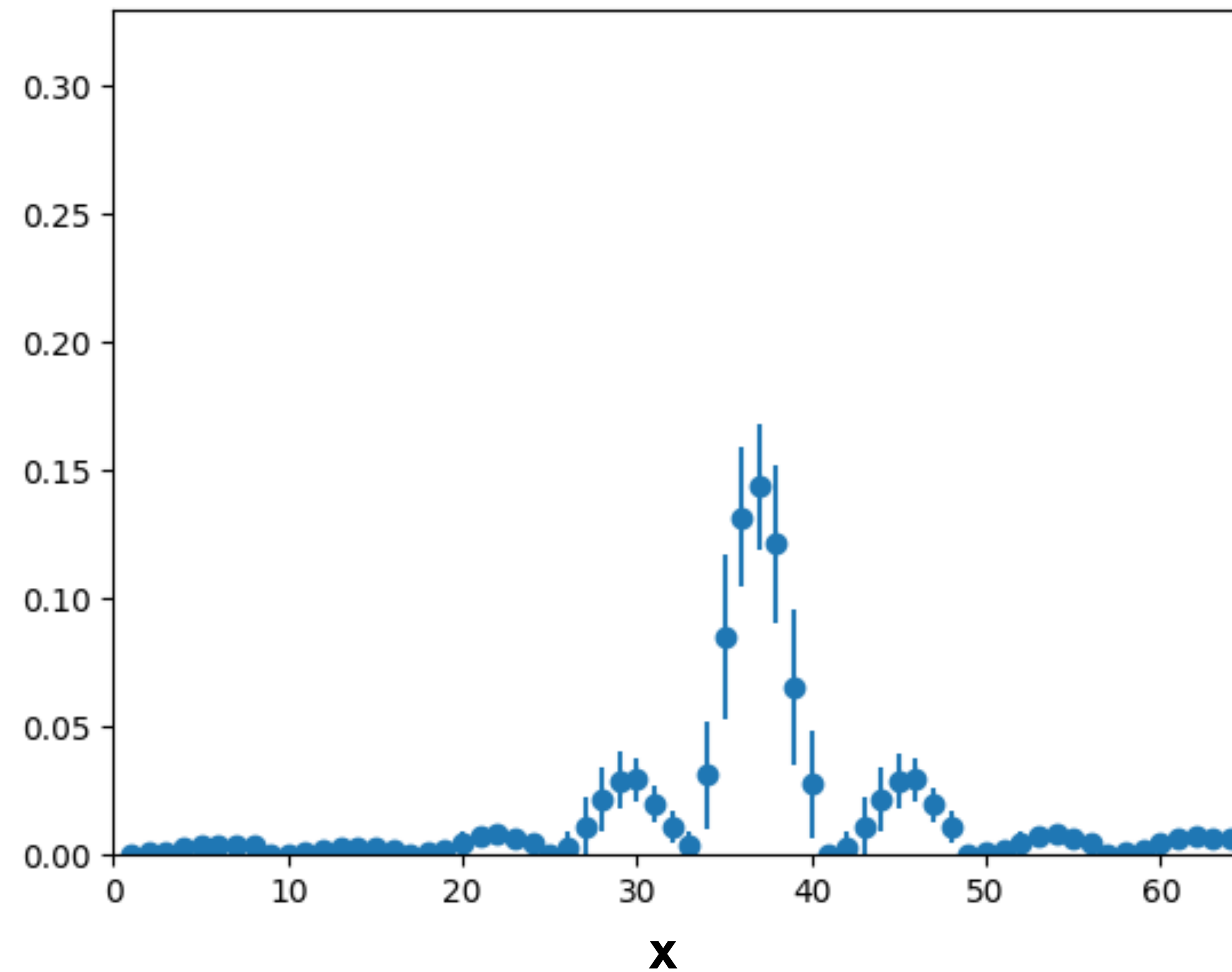


- ~30 epoch左右, 损失函数趋于稳定 (DESY: ~100 epoch)
- 因为体元的划分不一致, 训练数据的分布和DESY有差别
- 量子对抗生成网络可以生成平均的能量分布 (3个量子比特 -> 8个体元)

2D 量能器训练数据

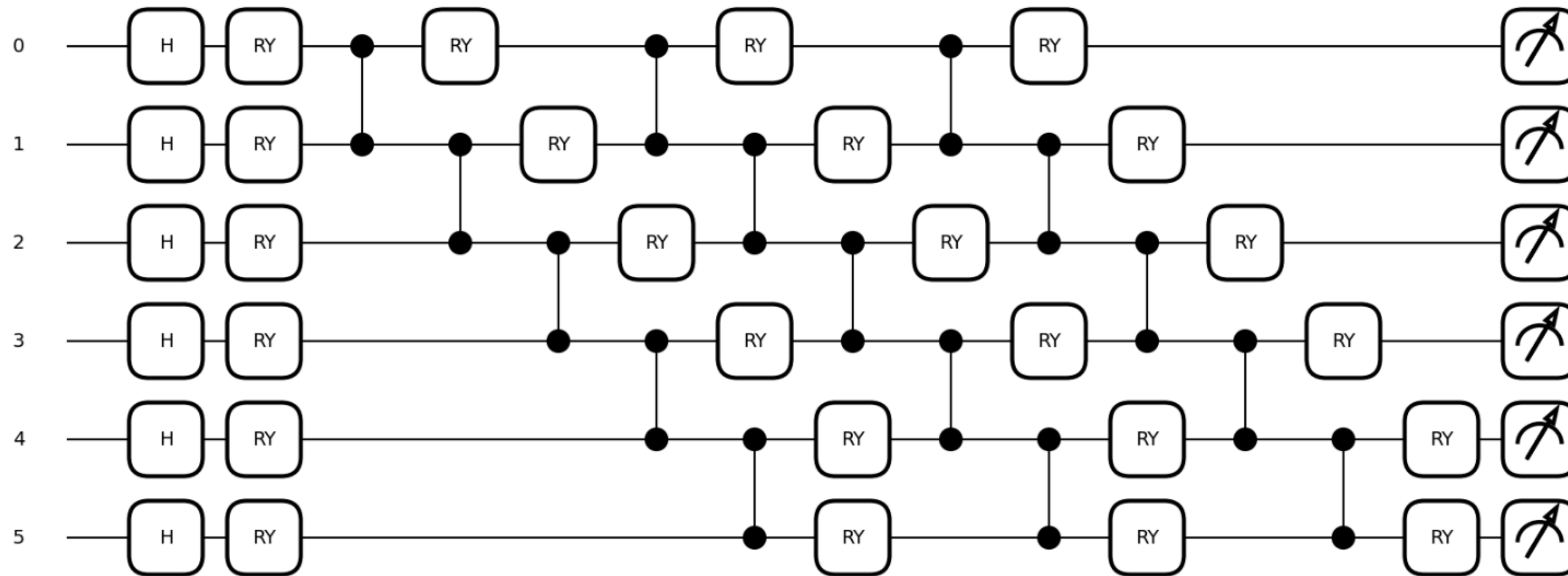
- 3D: $51 \times 51 \times 25$ 像素点 $\rightarrow$ 2D: 8×8 体元 $\rightarrow$ 1D: 64 个体元
 - X 维度上 51 个像素点合并成 1 个体元
 - Y 维度上 51 个像素点合并成 8 个体元
 - Z 维度上 25 个像素点合并成 8 个体元

沉积能量的概率密度

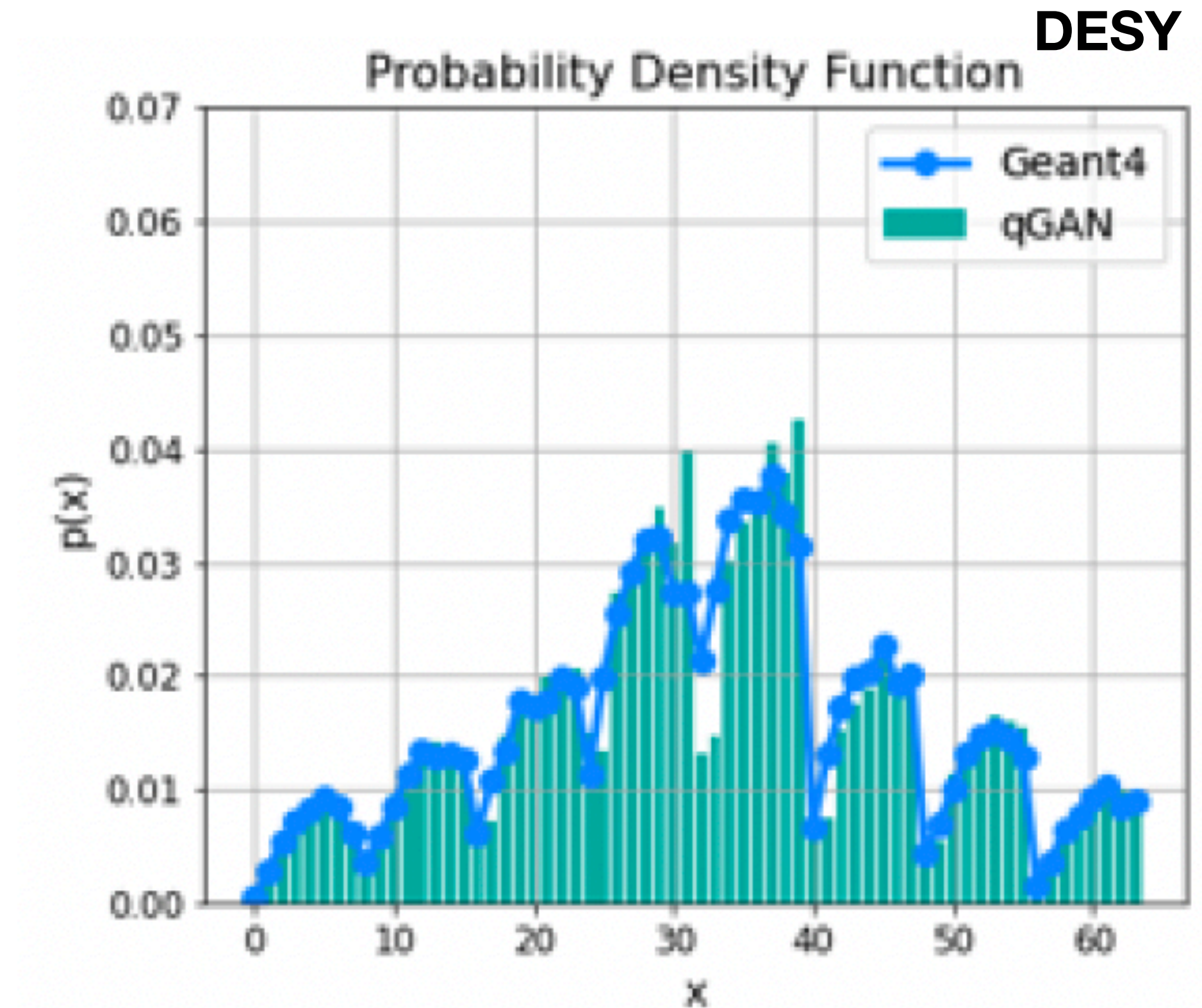
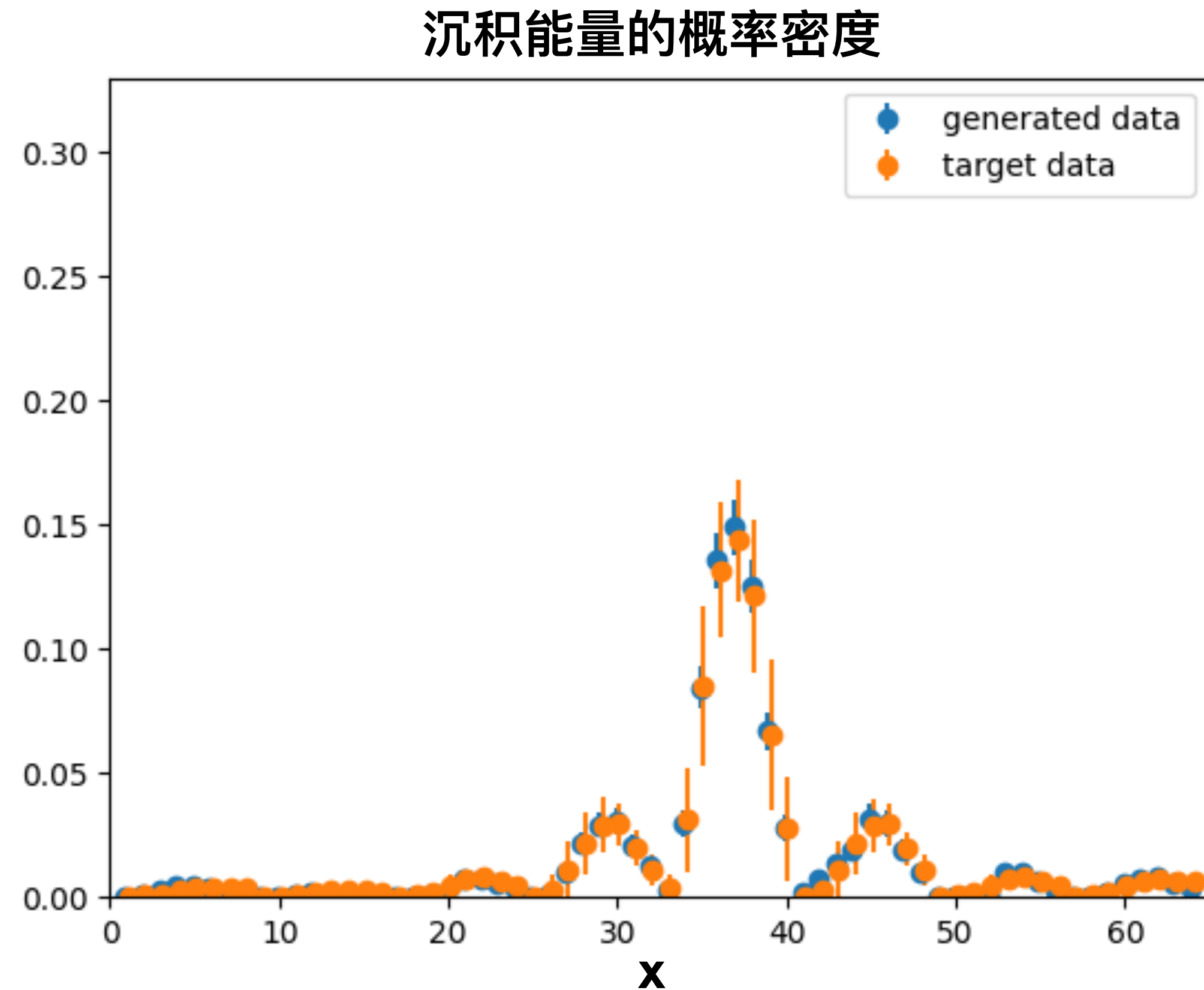


2D 数据的量子生成网络模型

- 2D 数据选用的量子生成网络模型与1D的模型类似
 - 3 量子比特 $\rightarrow$ 6 个量子比特
 - 2 层 $\text{RY} + \text{CZ}$ $\rightarrow$ 3 层 $\text{RY} + \text{CZ}$



2D 量子生成对抗网络的性能

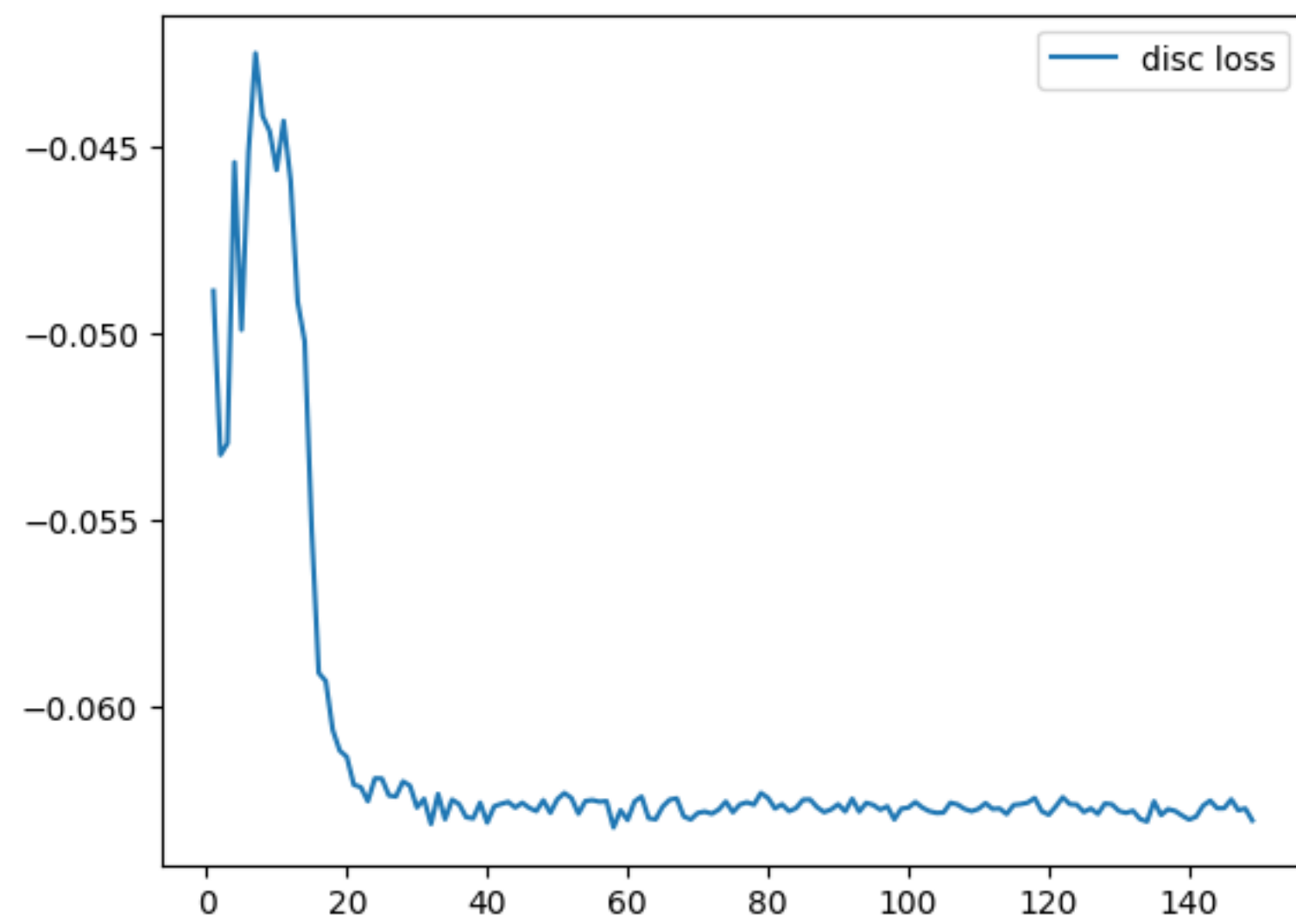


- ~60 epoch左右, 损失函数趋于稳定 (DESY: ~1000 epoch)
- 因为体元的划分不一致, 训练数据的分布和DESY有差别
- 量子对抗生成网络可以生成平均的能量分布 (6个量子比特->64个体元)

总结和展望

- 量子生成对抗网络借助于量子计算，有超越经典生成对抗网络的潜力
- 利用量子生成对抗网络，我们生成了1D，2D量能器的平均能量分布
 - 1D: 3个量子比特 -> 8个体元
 - 2D: 6个量子比特 -> 64个体元
- 经过优化，网络训练更加稳定，所需时间大幅减少
 - 1D: ~100 epoch -> ~30 epoch
 - 2D: ~1000 epoch -> ~60 epoch
- 未来计划
 - 在模拟器上加上噪声，检查对量子生成对抗网络性能的影响
 - 在真实的量子计算机上测试量子生成对抗网络的性能

backup



损失函数

