

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

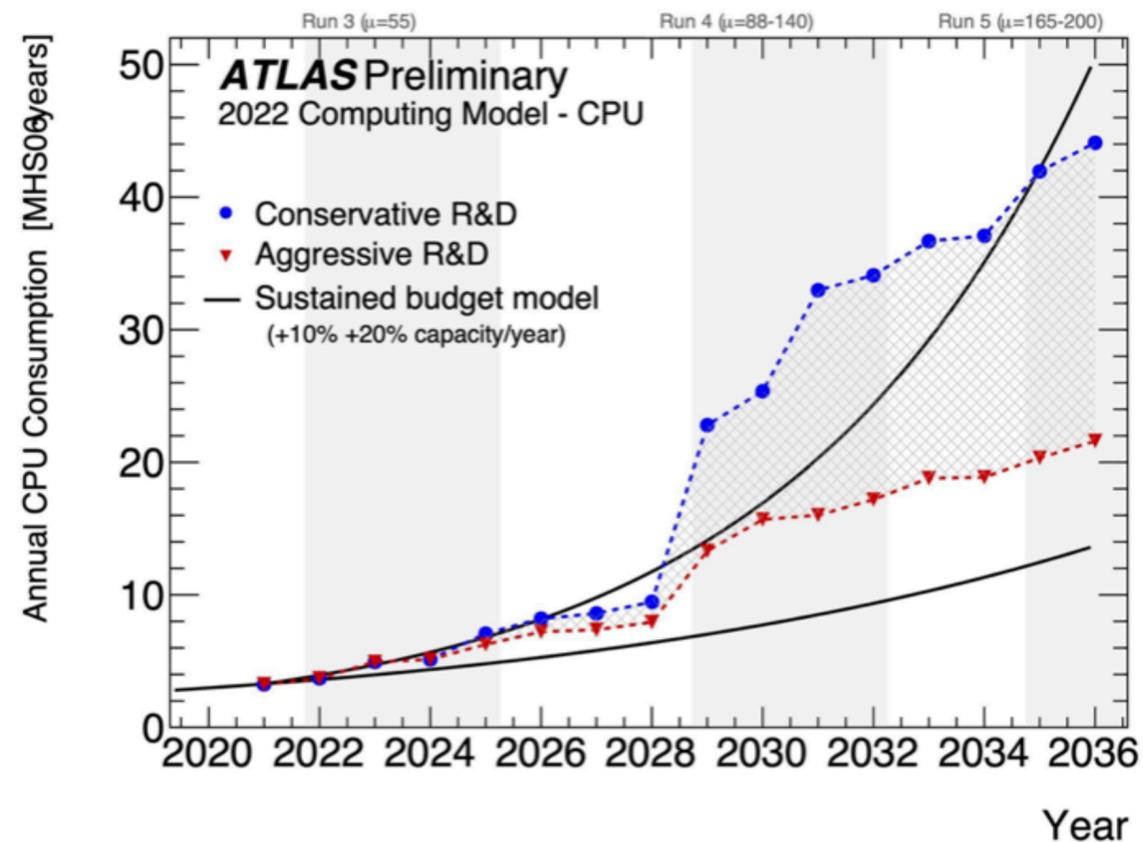
中国科学院高能物理研究所

量子计算和机器学习研讨会

2023/8/11 - 2023/8/14

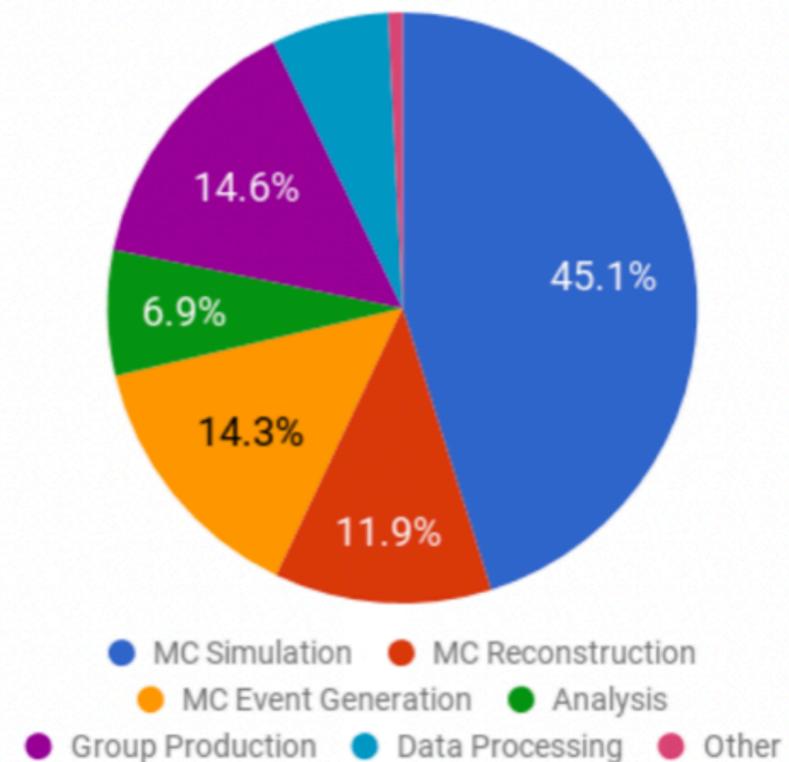
为什么需要量能器的快速模拟?

- HL-LHC → 大量的计算资源
- MC模拟占~50% (主要是量能器的模拟)
- 量能器快速模拟**: 可以有效降低计算资源的需求



ATLAS Software and Computing HL-LHC Roadmap

Wall Clock consumption per workflow



ATLAS 2017 number

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

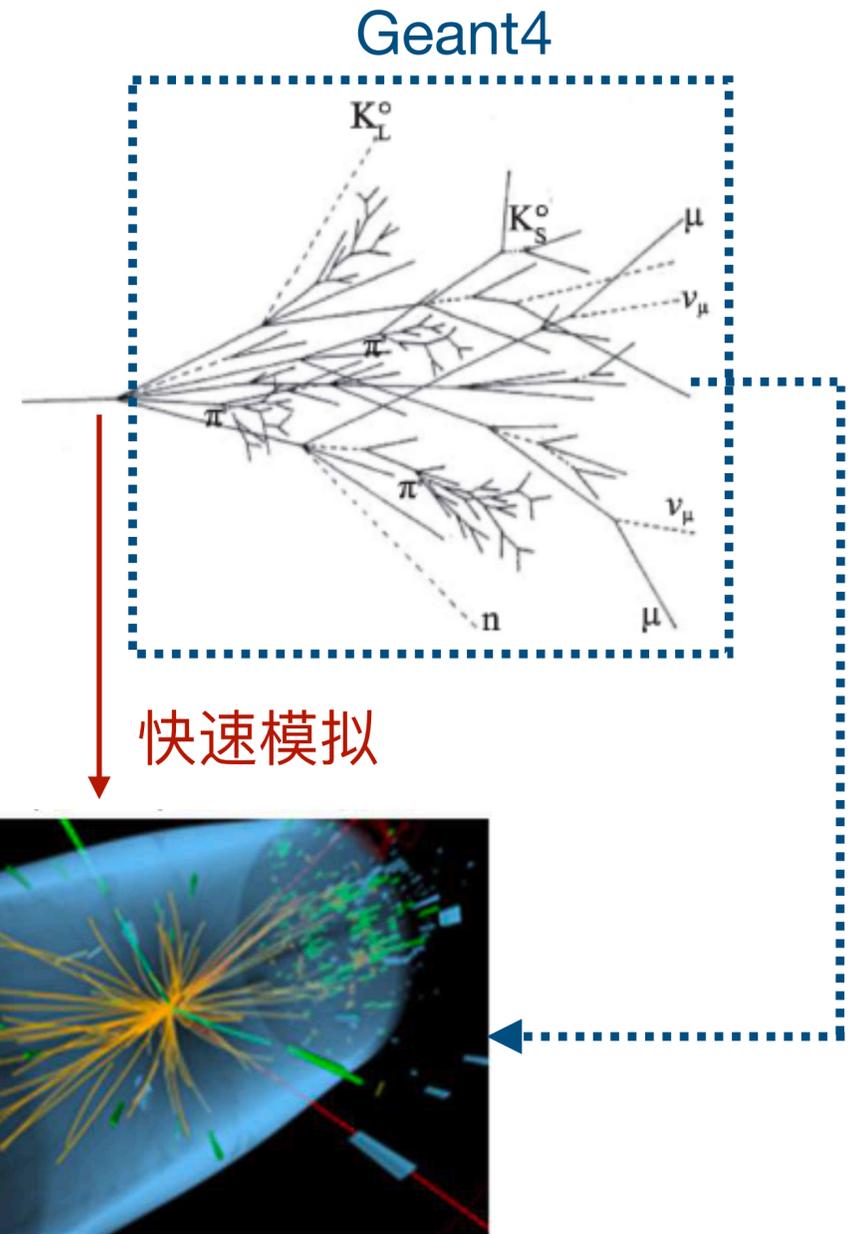
- 结果准确, CPU资源消耗很大
- 探测器几何复杂
- 次级粒子指数级增长

● **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 (ATLAS: 张瑞的报告)
-

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



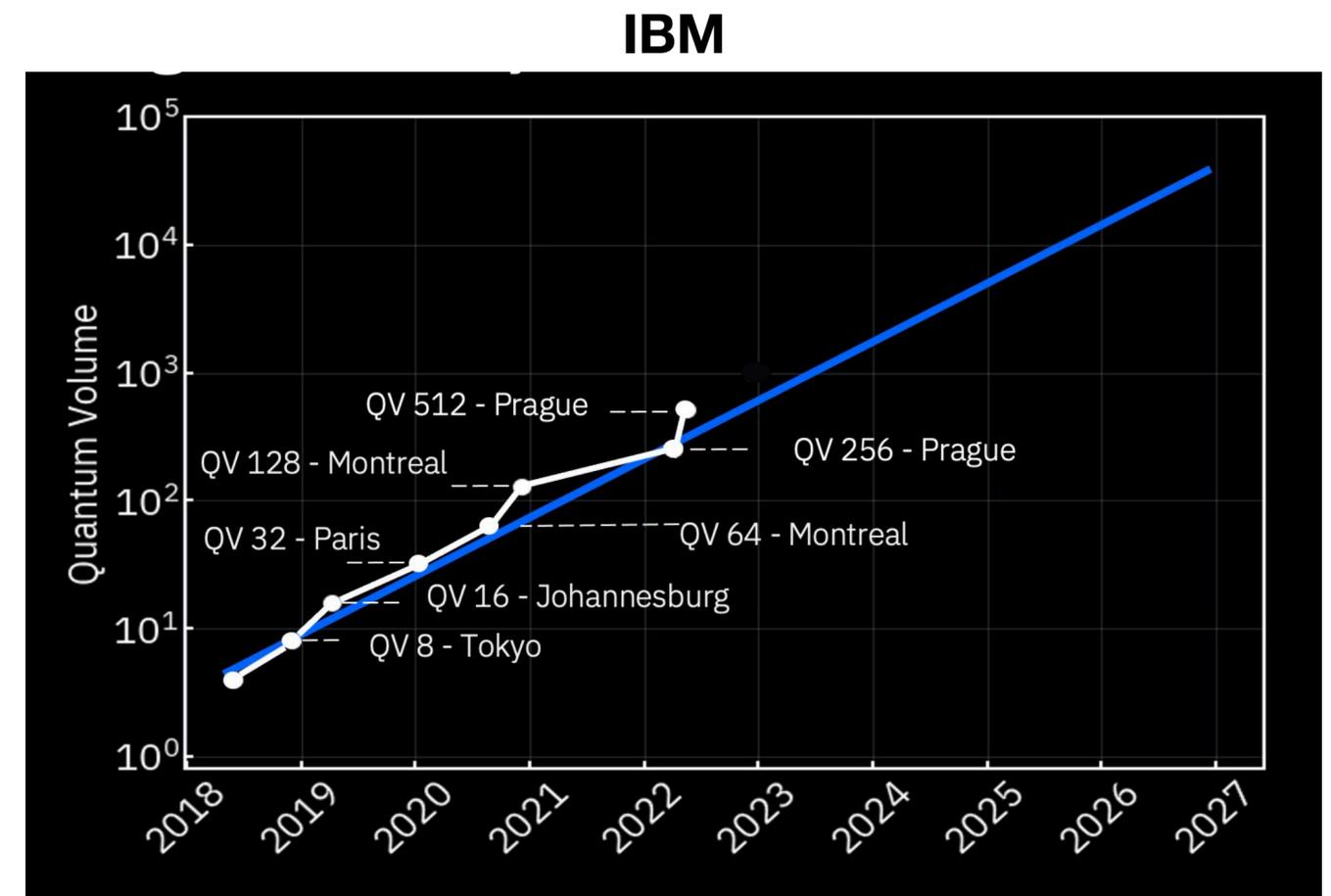
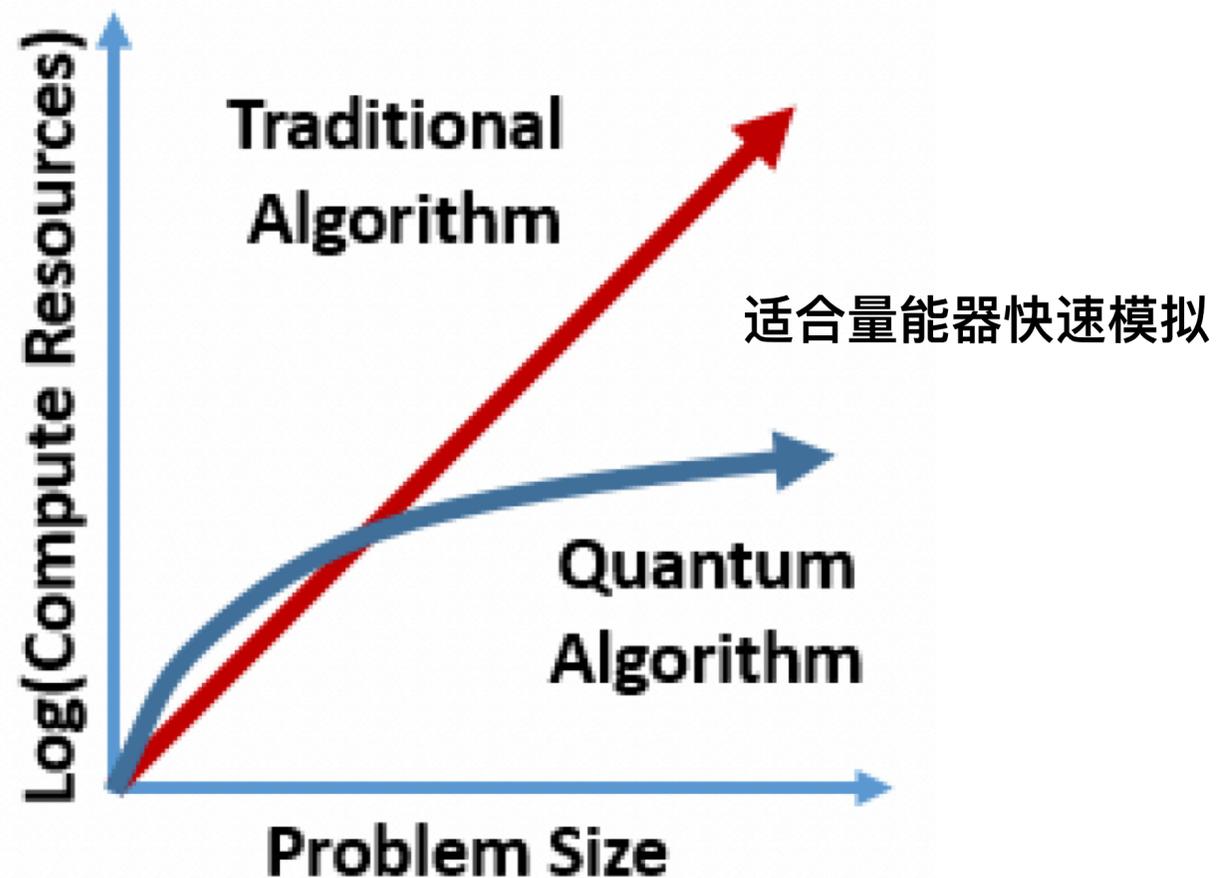
量子计算



量子计算：量子叠加，量子纠缠

- N个经典比特，可以表示 2^N 个不同结果，只含有其中一个结果的信息
- N个量子比特，可以表示 2^N 个不同结果，可以含有所有结果的信息

[Image source](#)



量子生成对抗网络原理

- 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: [~ 10 , $\sim 10^2$]

image source



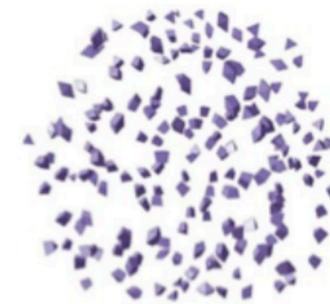
R: Real Data



D: Detective



G: Generator (Forger)



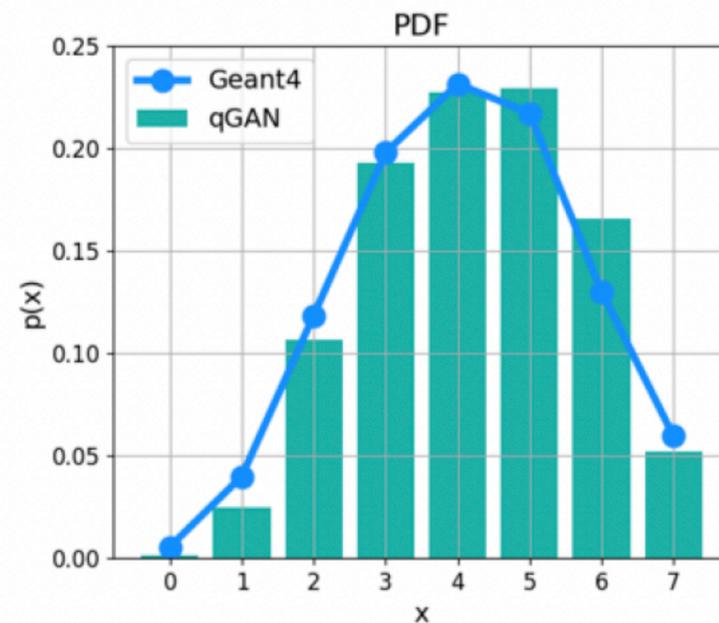
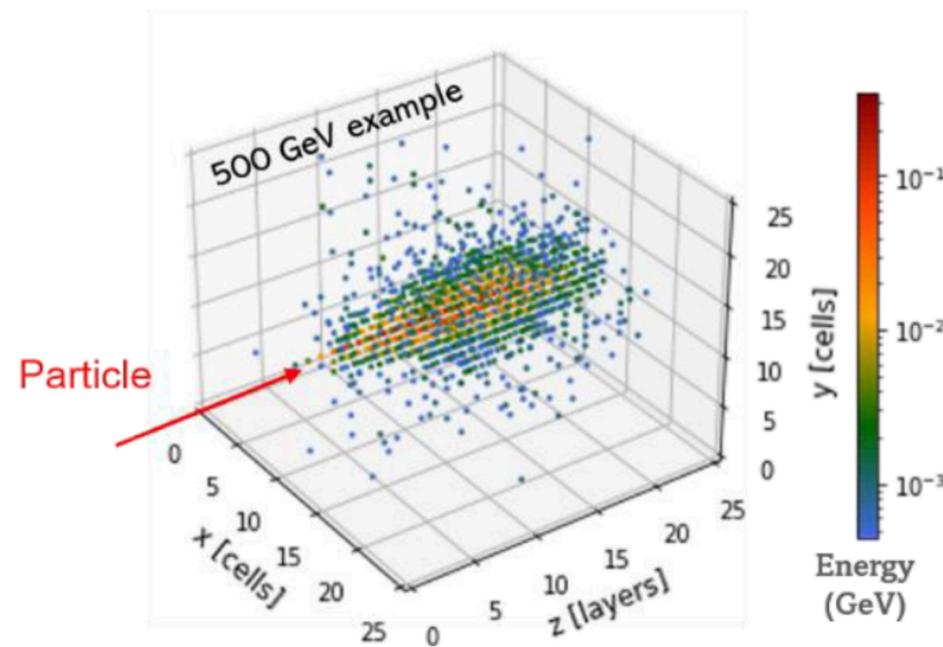
I: Input for Generator

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](#)) (CERN & DESY)
- 研究方案: 受限于量子计算机性能, 1D \rightarrow 2D \rightarrow 3D
- 目前进展: 利用模拟器产生实现1D和2D量能器的快速模拟
利用IBM的物理机实现简化的1D量能器的快速模拟

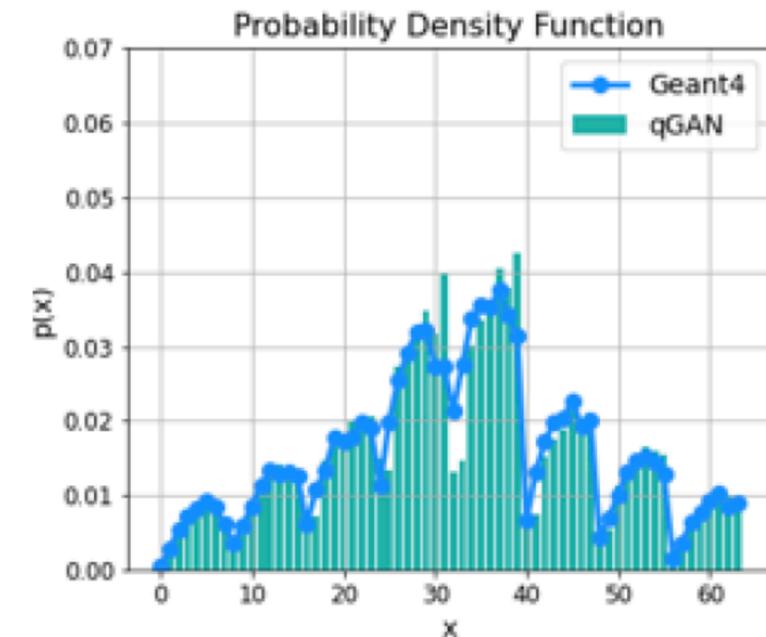
1D: 8个像素点

3个量子比特 ($2^3 = 8$)



2D: 8x8个像素点

6个量子比特 ($2^6 = 8 \times 8$)

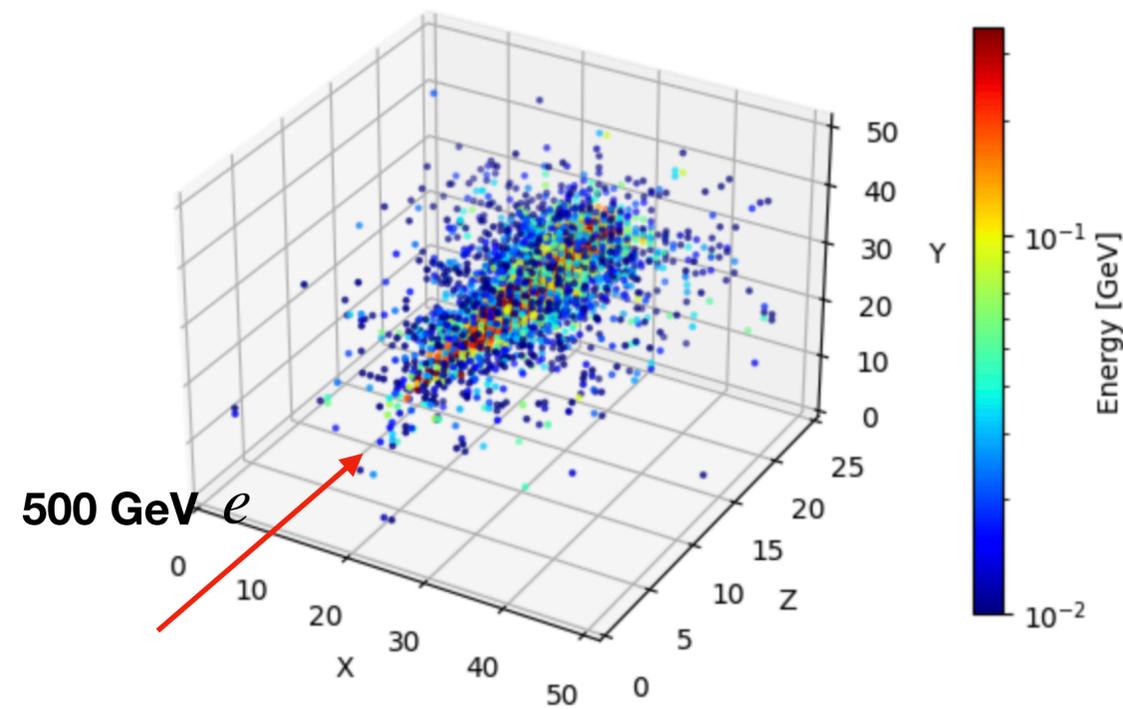


[image source](#)

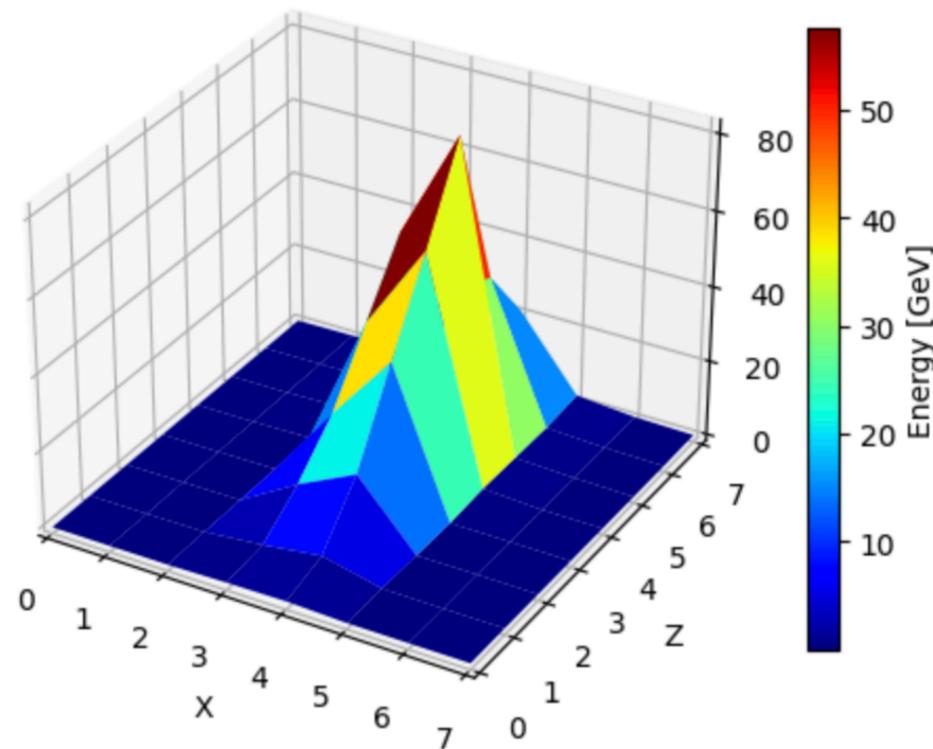
研究策略

- CLIC 探测器的公开数据 (在Hideki的联系下, 决定和DESY组合作)
- 方便和DESY组比较结果
- 3D图像: $51 \times 51 \times 25$ (6.5万像素点)
- 将相邻多个像素点合并, 以简化问题 ($1D \rightarrow 2D \rightarrow 3D$)
- 理想模拟器 \rightarrow 含噪声模拟器 \rightarrow 量子计算云平台 (梁福田老师的报告)

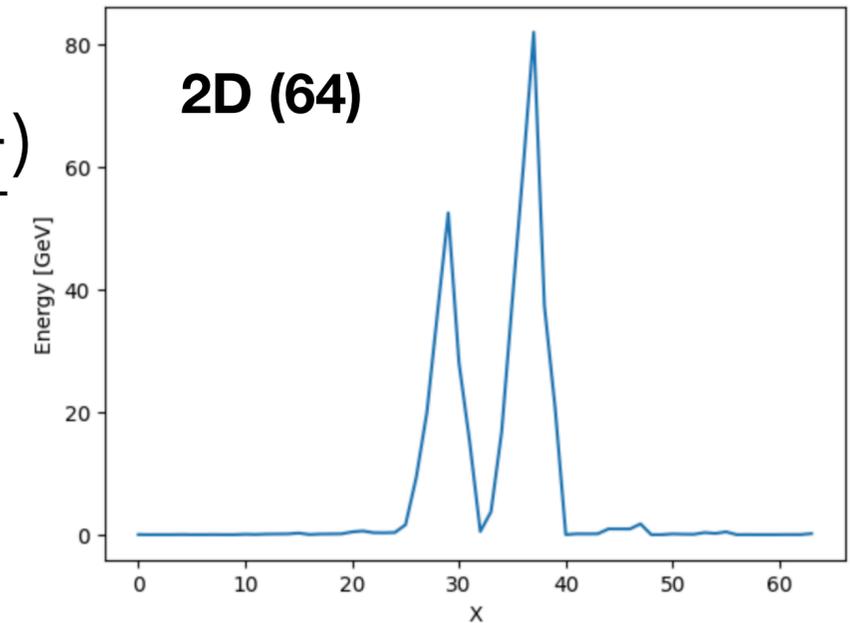
3D



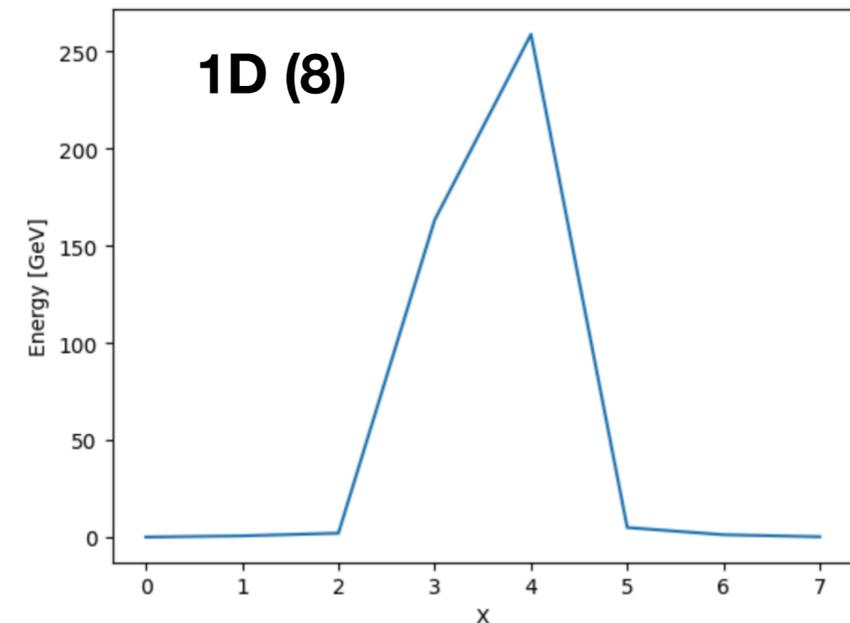
2D (8x8)



2D (64)

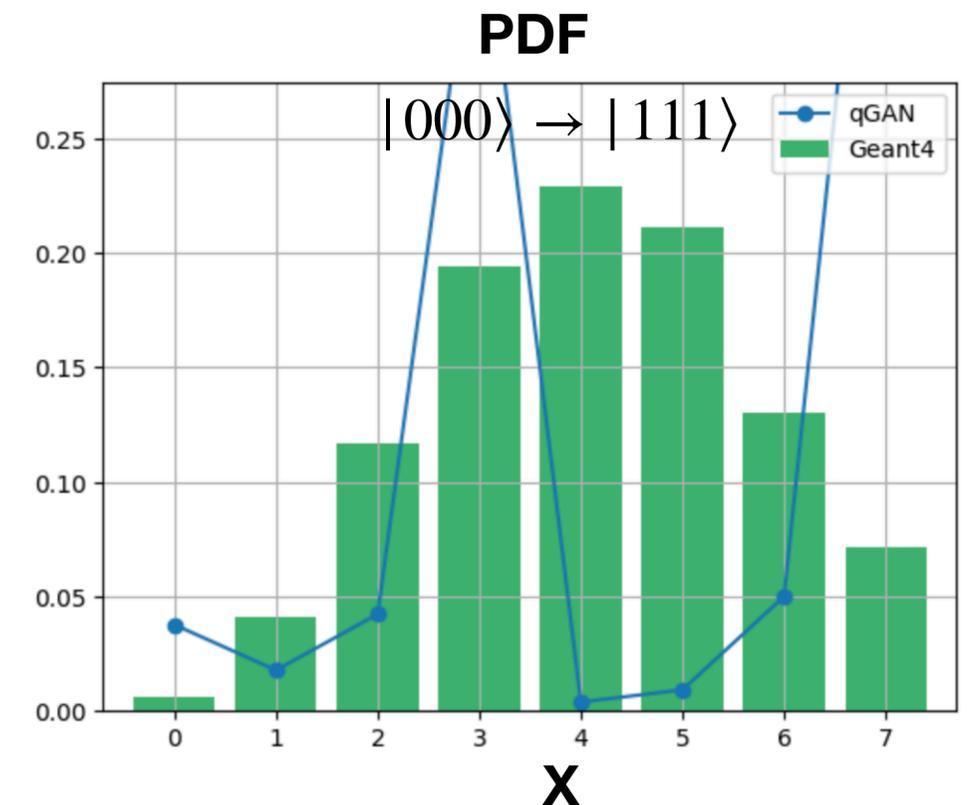
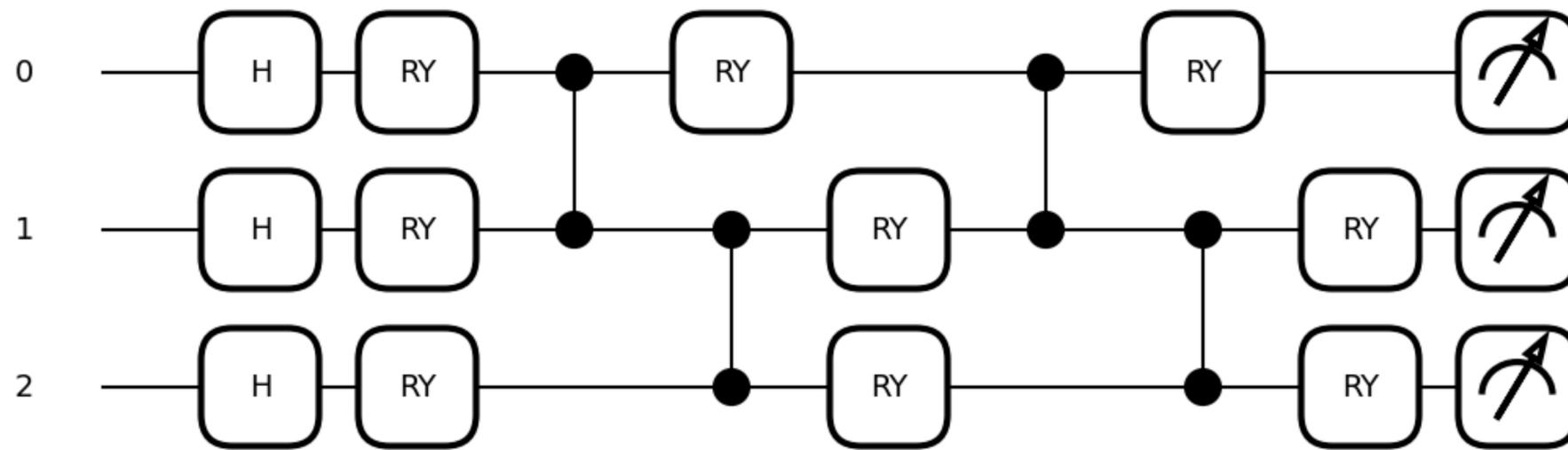


1D (8)



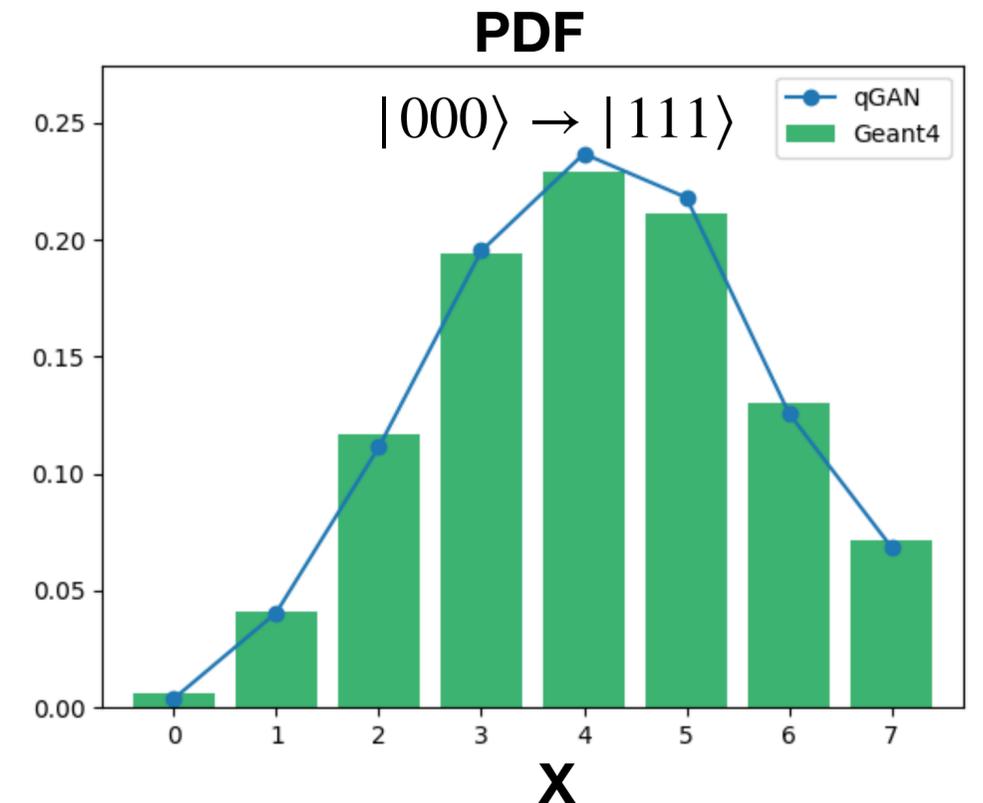
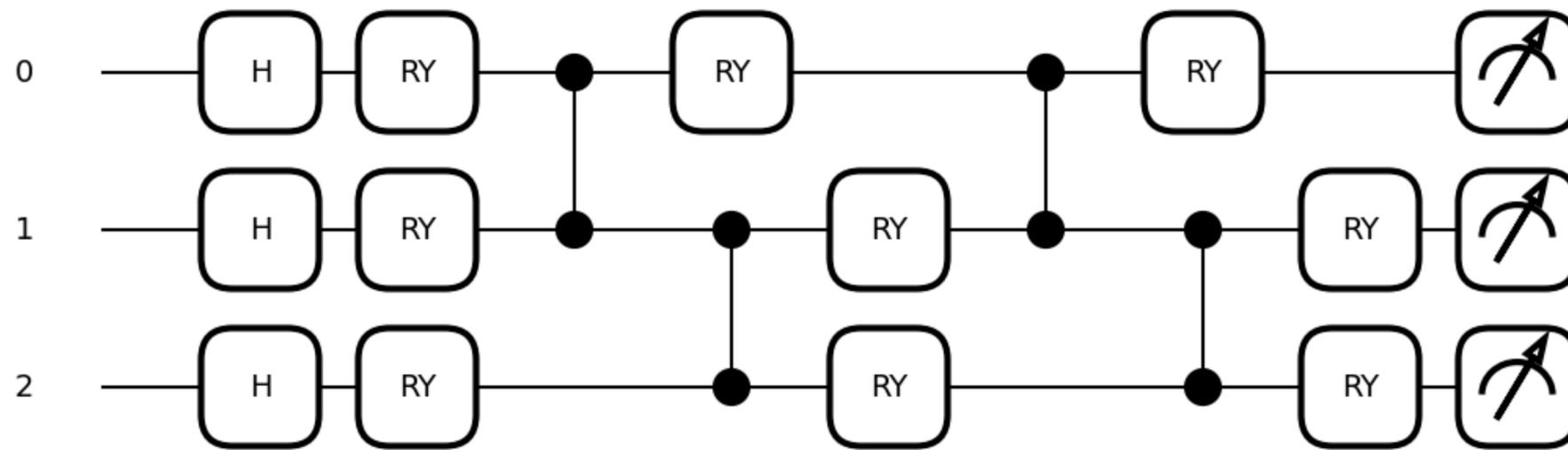
1D 量子生成网络模型

- 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



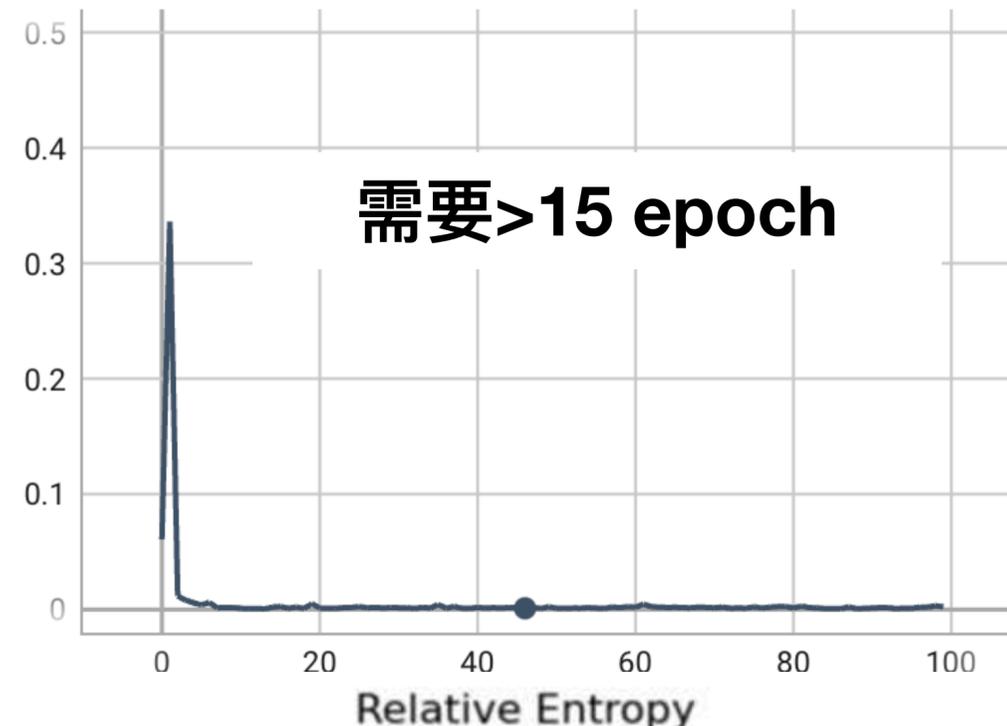
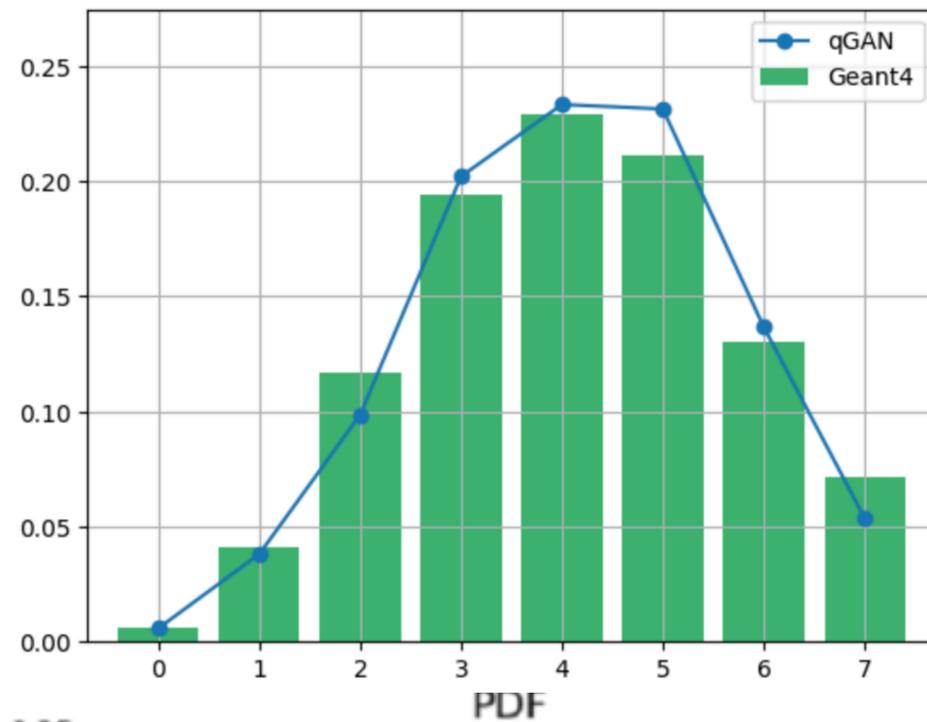
1D 量子生成网络模型

- 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

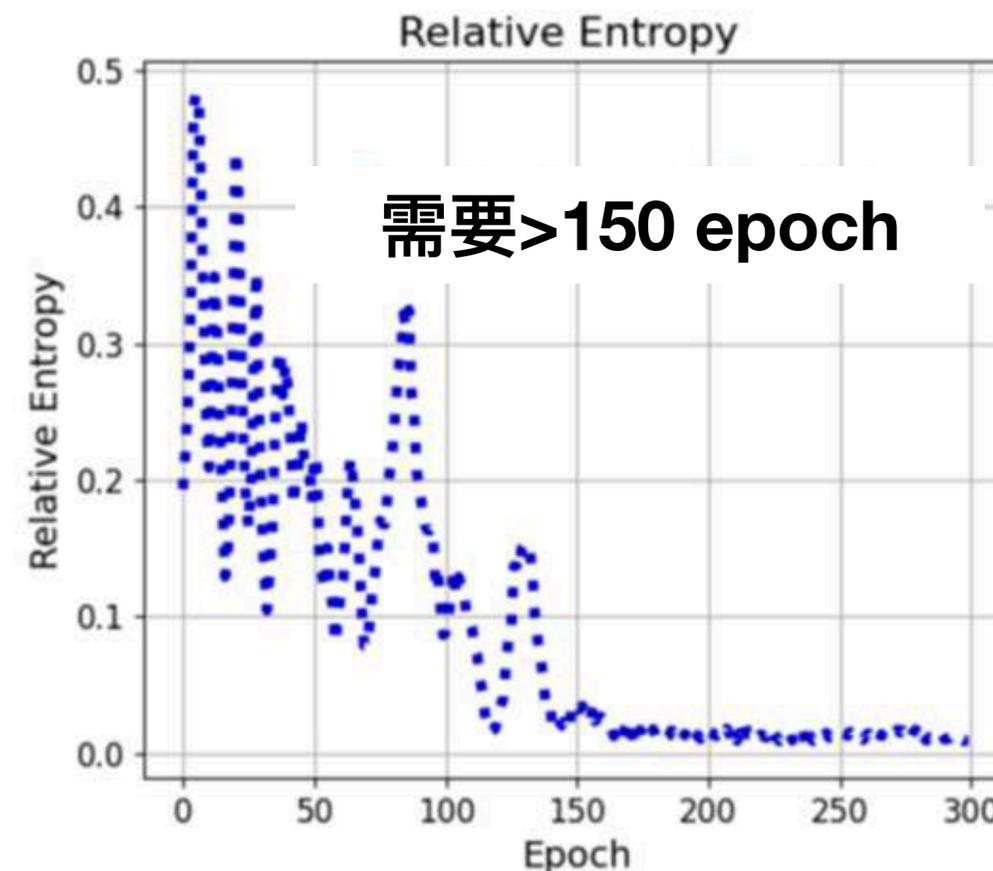
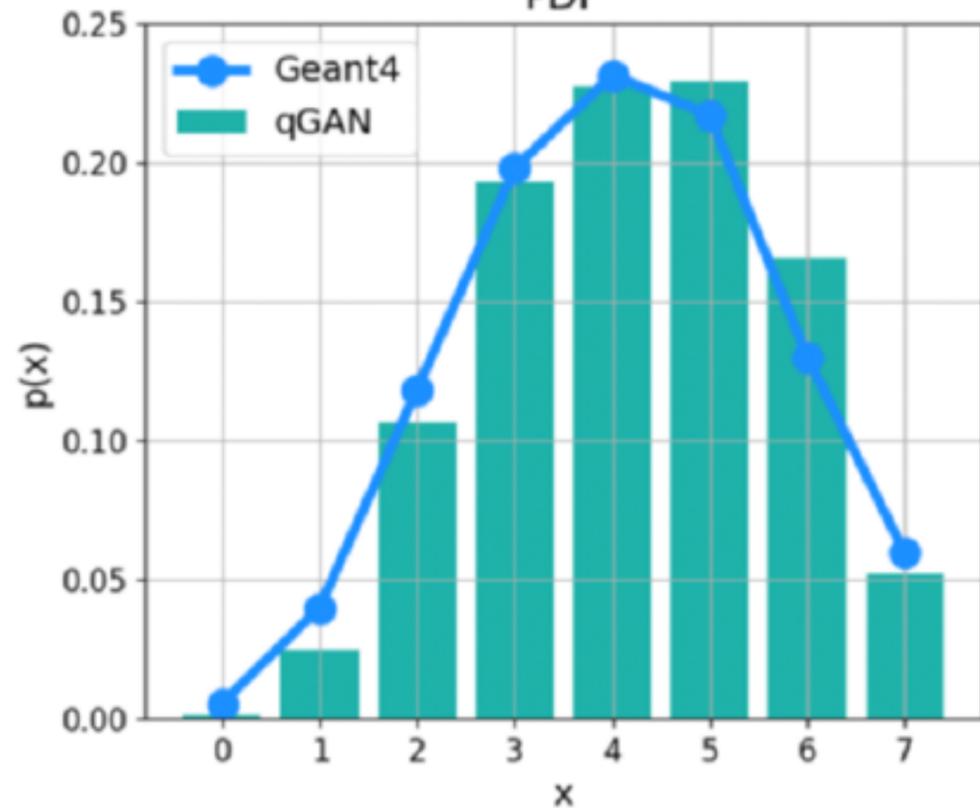


1D 量子生成对抗网络的性能 (理想模拟器)

IHEP

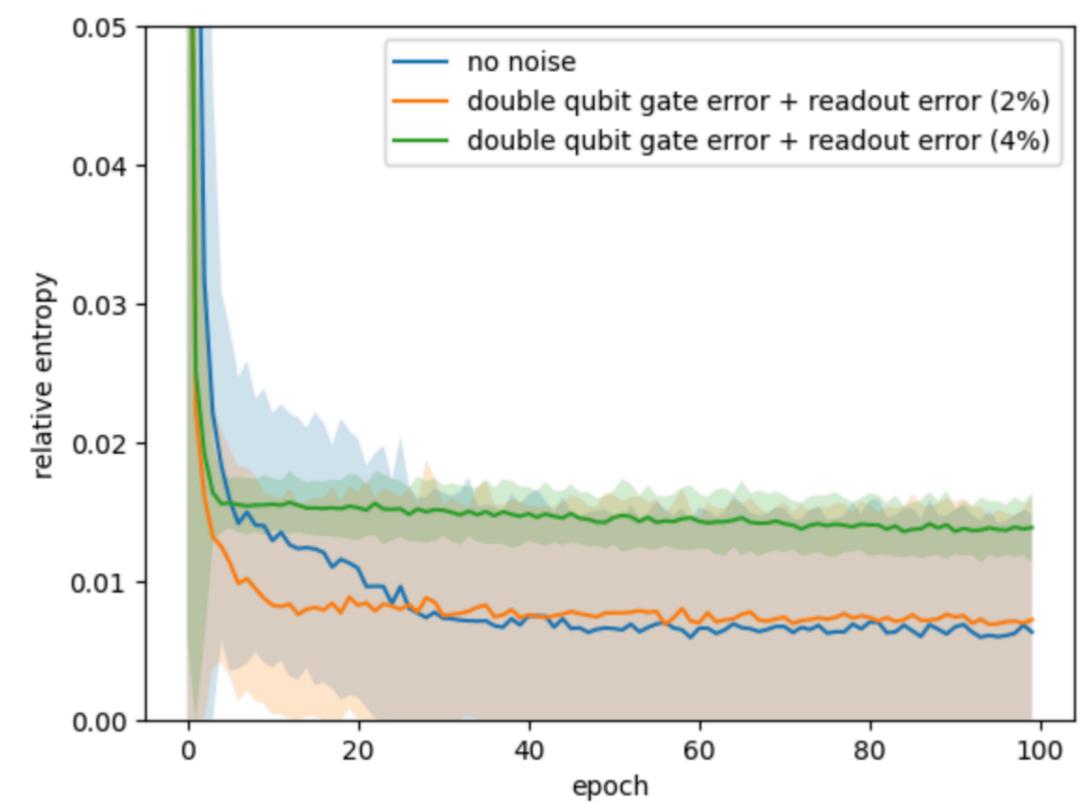
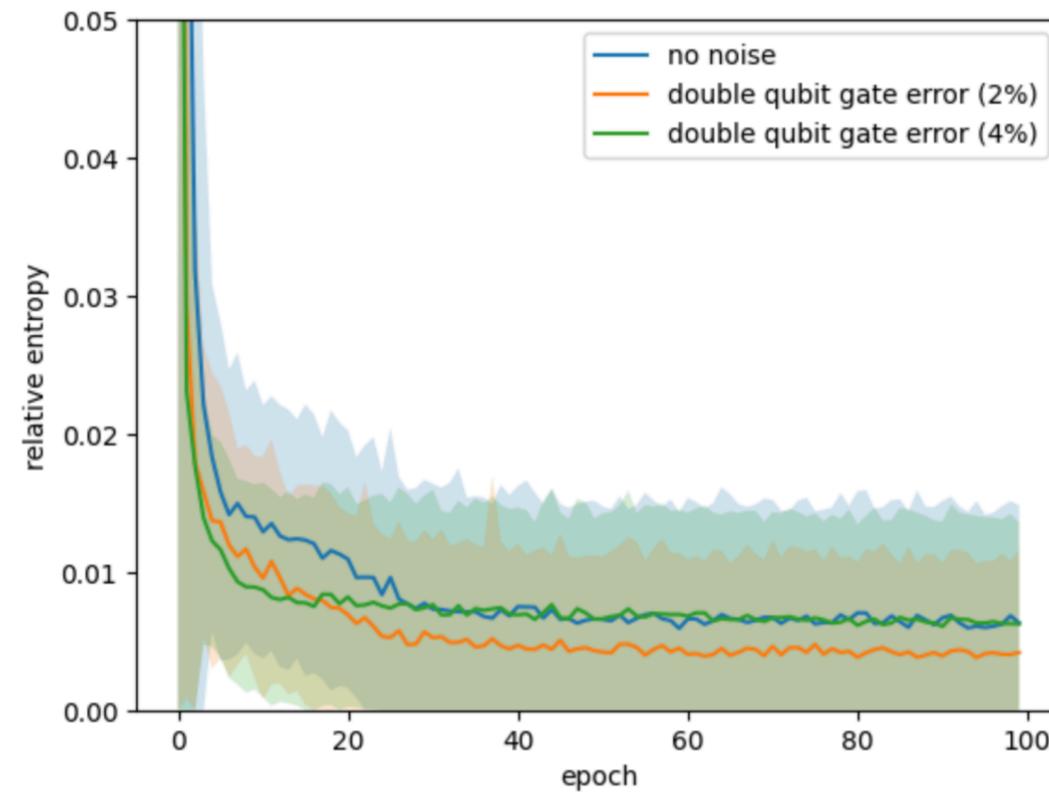
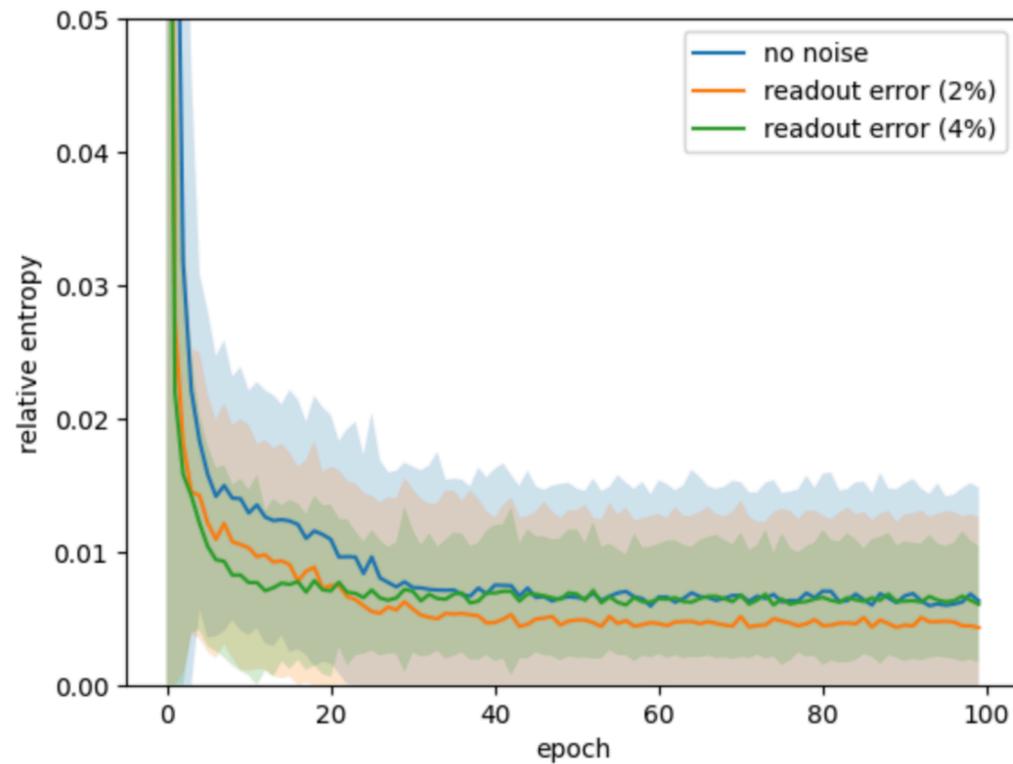


CERN & DESY



1D: 噪声在模型训练时的影响

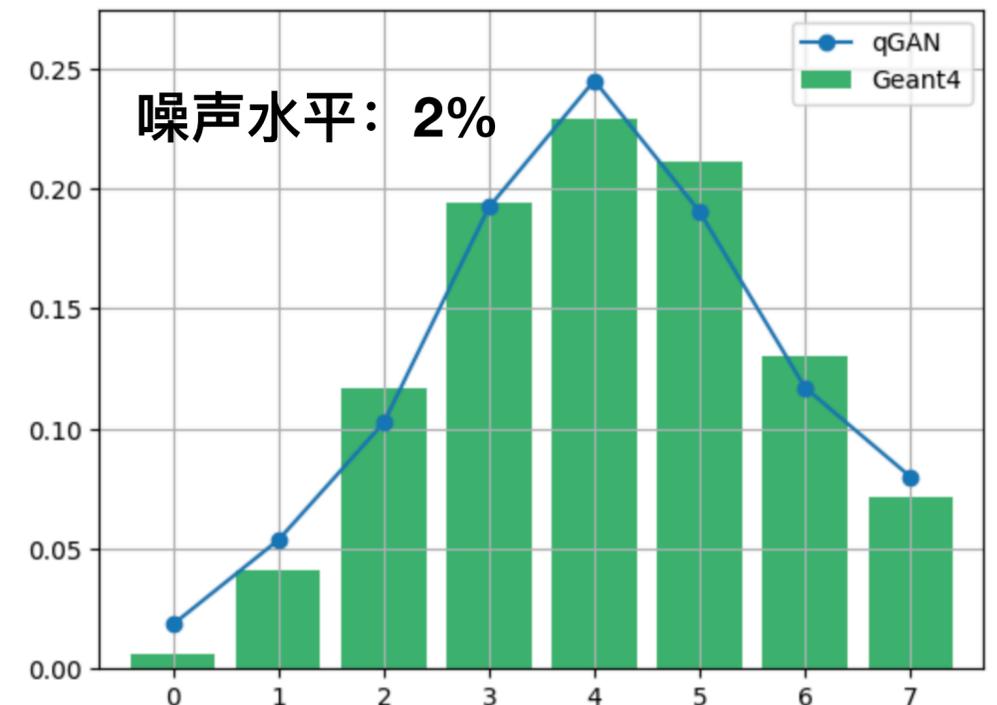
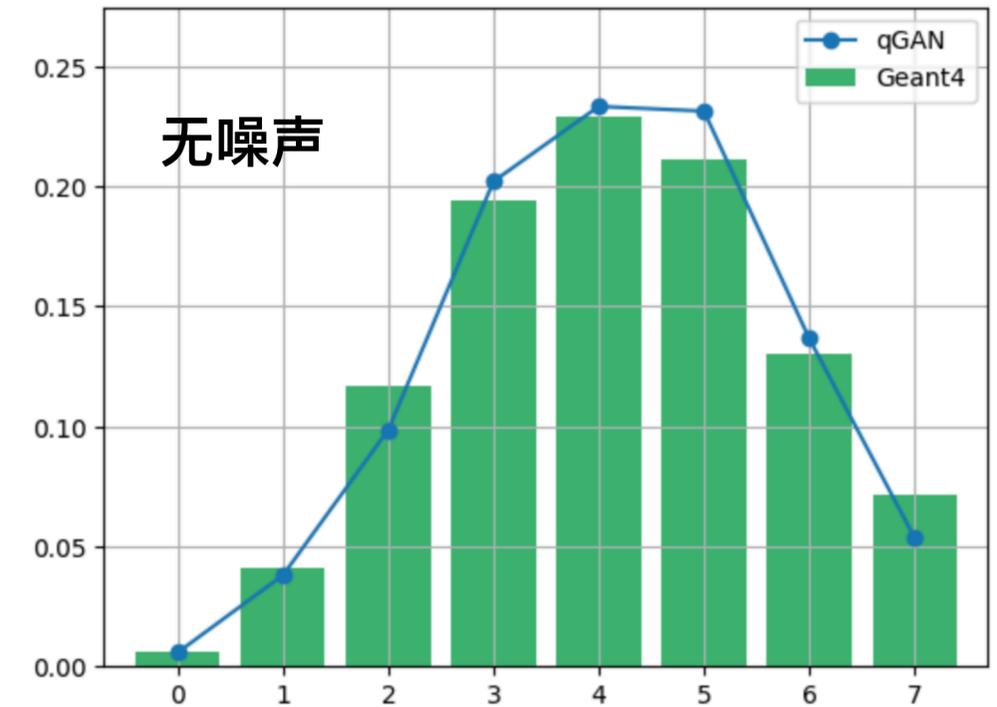
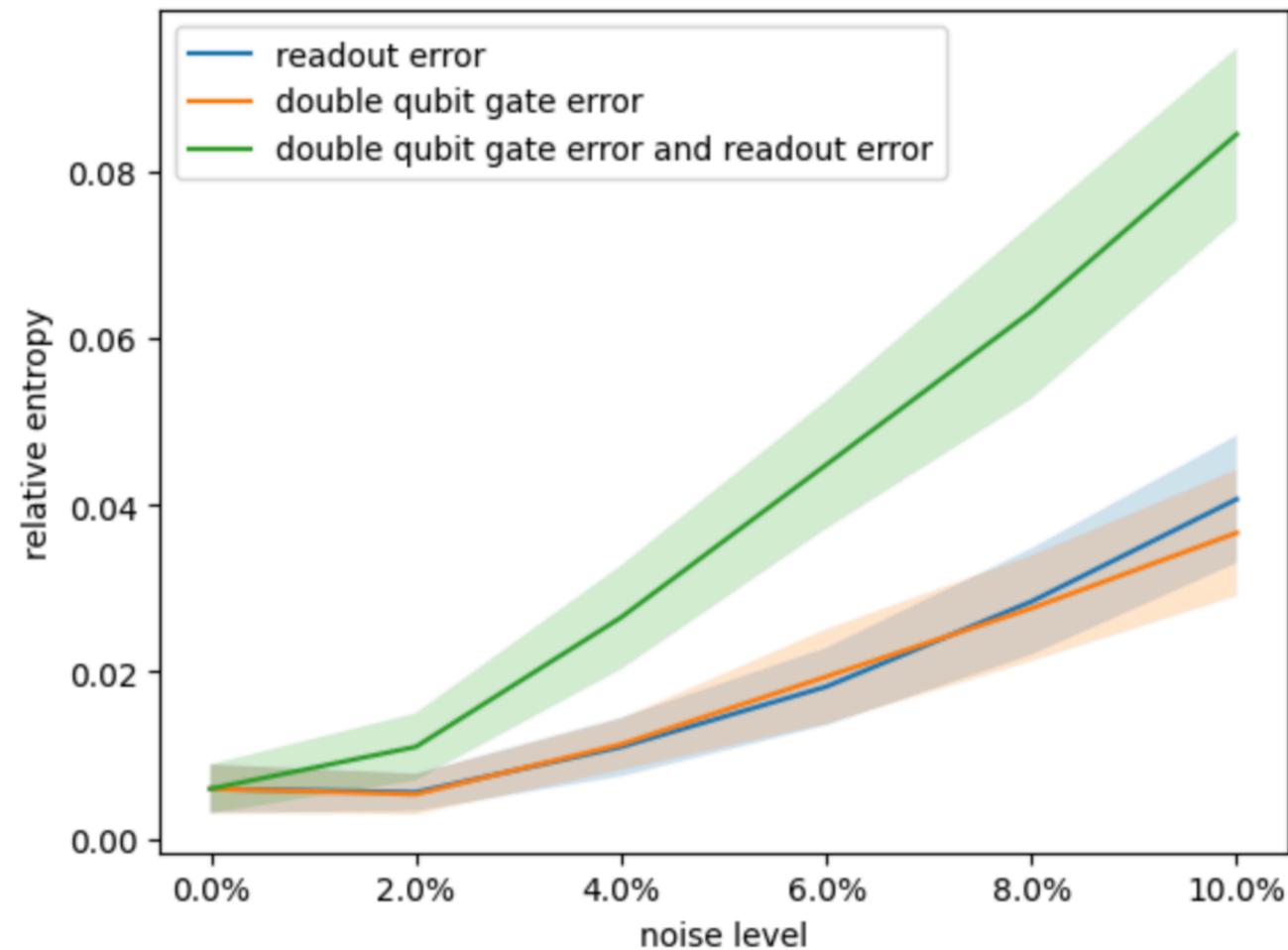
- 简化的噪声模型: 考虑双量子位门误差和读出误差
 - 每个量子比特的误差一样 (物理机上不同量子比特噪声水平不同)
 - 读出噪声是对称的 (物理机上 $|0\rangle$ 的保真度和 $|1\rangle$ 的保真度不同)
 - 噪声水平在训练过程中不变 (物理机上的噪声水平不是恒定的)



1D: 噪声在模型应用时的影响

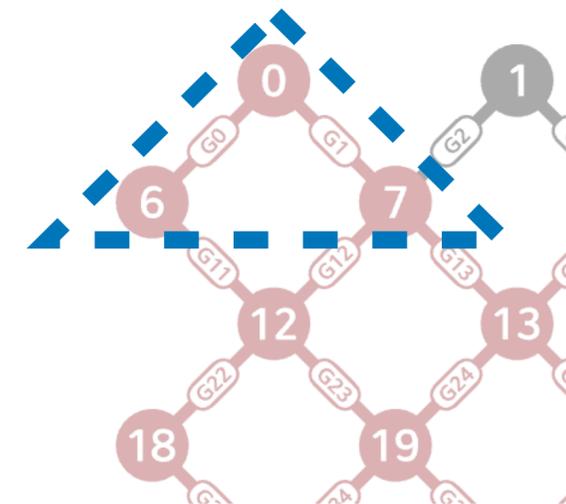
- 1D量子生成对抗网络的模型比较简单
 - 双量子位门噪声和读出噪声的影响相当
 - 噪声水平在2%以内，性能基本不受影响

模型参数都是理想模拟器训练出的参数

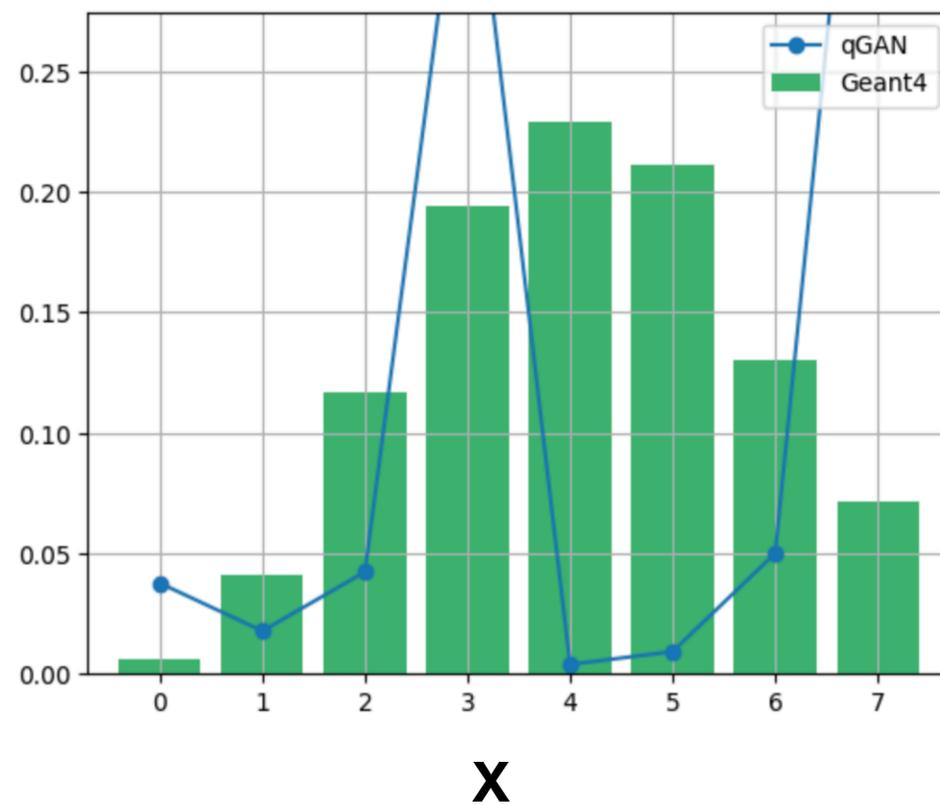


1D 量子生成对抗网络的性能 (量子计算云平台)

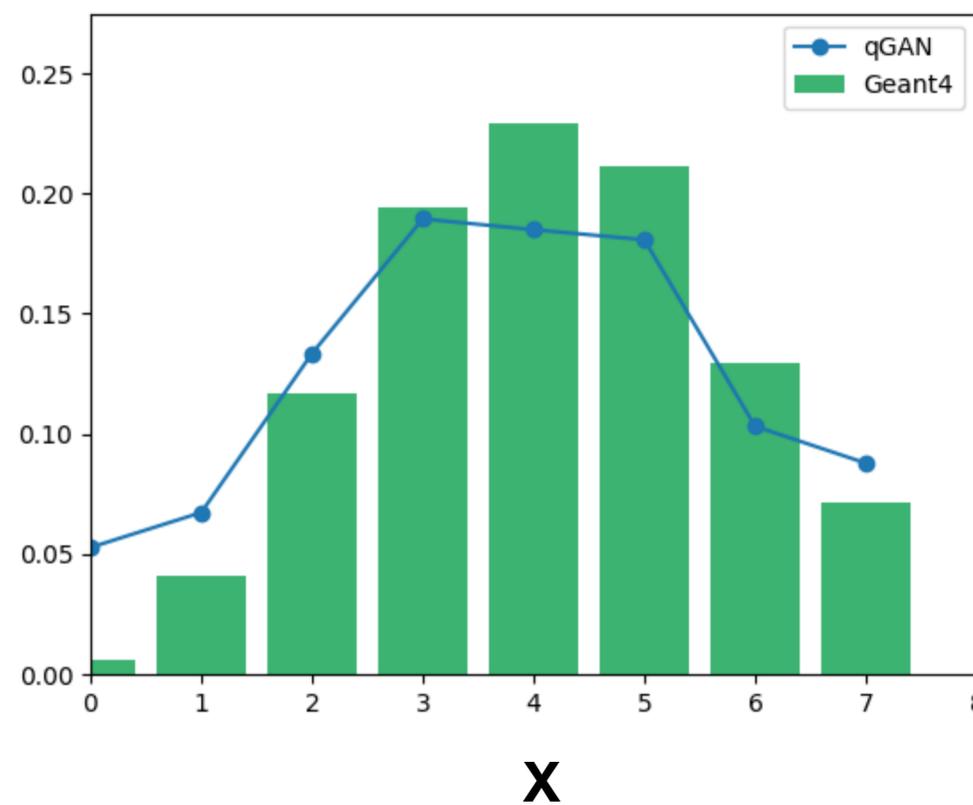
- 在物理机上测试了训练过程
 - 训练一个epoch以后基本上可以生成真实数据的分布
 - 训练时间比较长, 需要进一步优化
 - 直接使用理想模拟器的参数可行 (受噪声影响比较小)



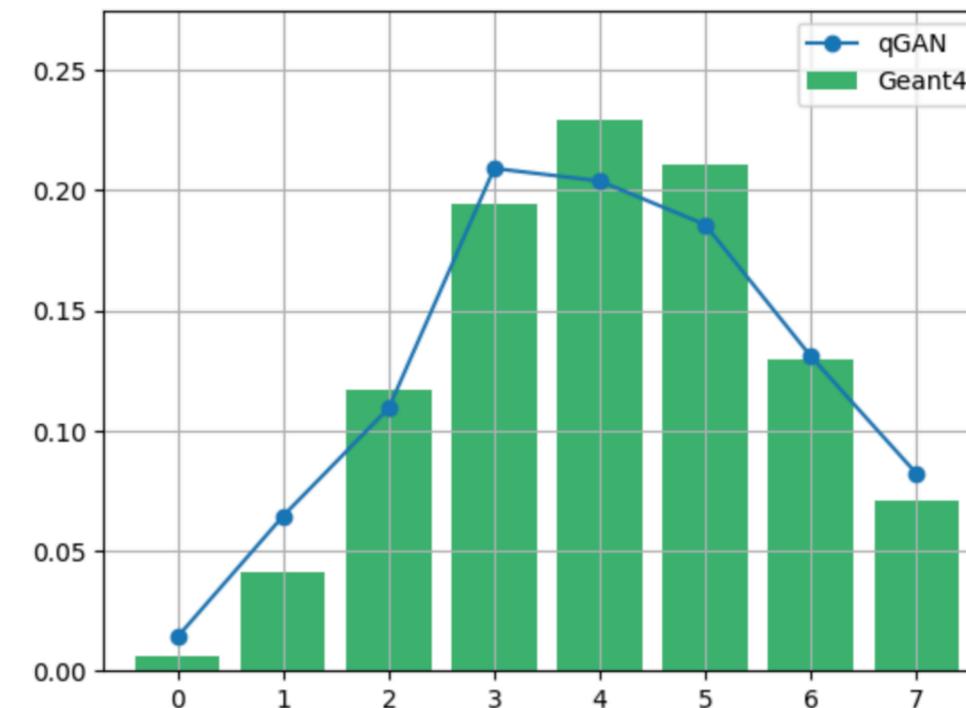
训练前的PDF



物理机上训练1 epoch

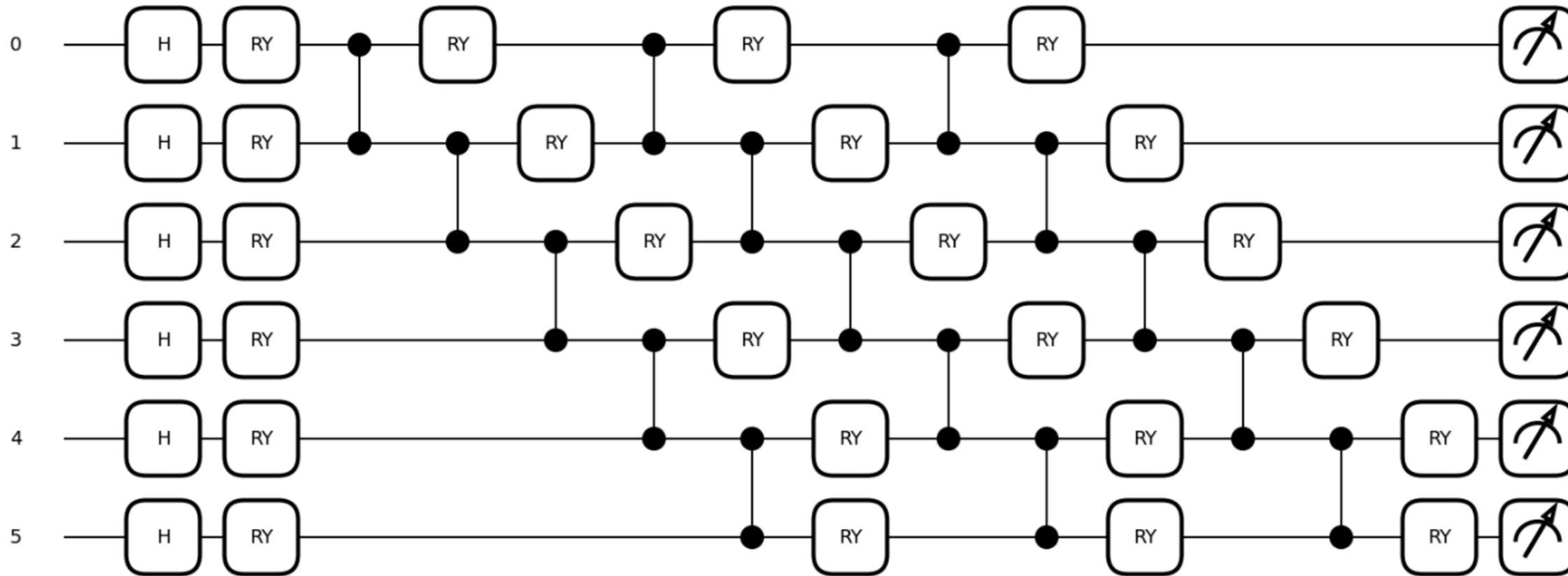


直接使用理想模拟器的参数



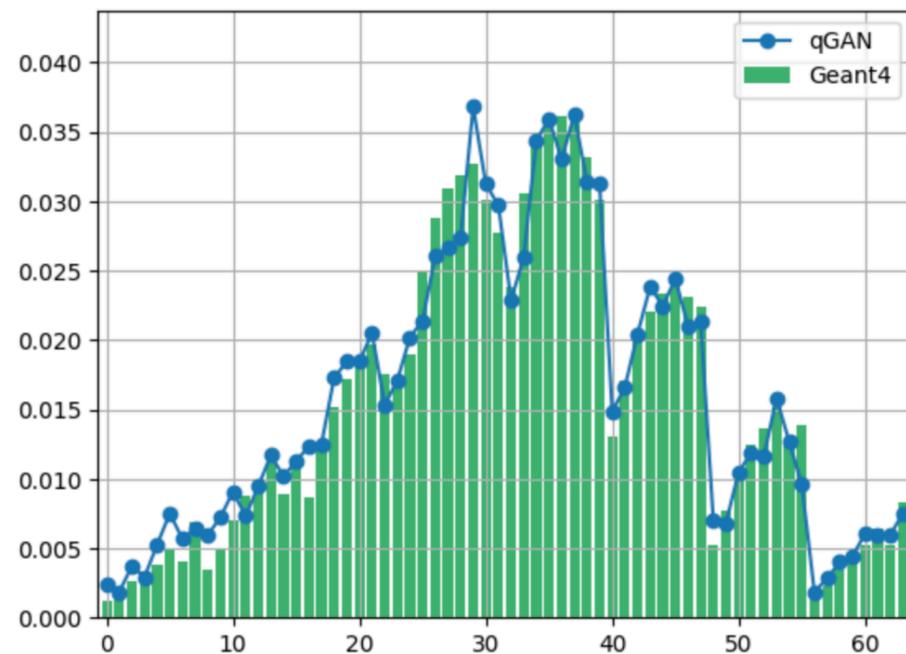
2D 量子生成网络模型

- 2D 量子生成网络模型与1D的模型类似
 - 3 量子比特 (8个像素) \rightarrow 6 个量子比特 (64个像素)
 - 2 层 RY + CZ \rightarrow 3 层 RY + CZ

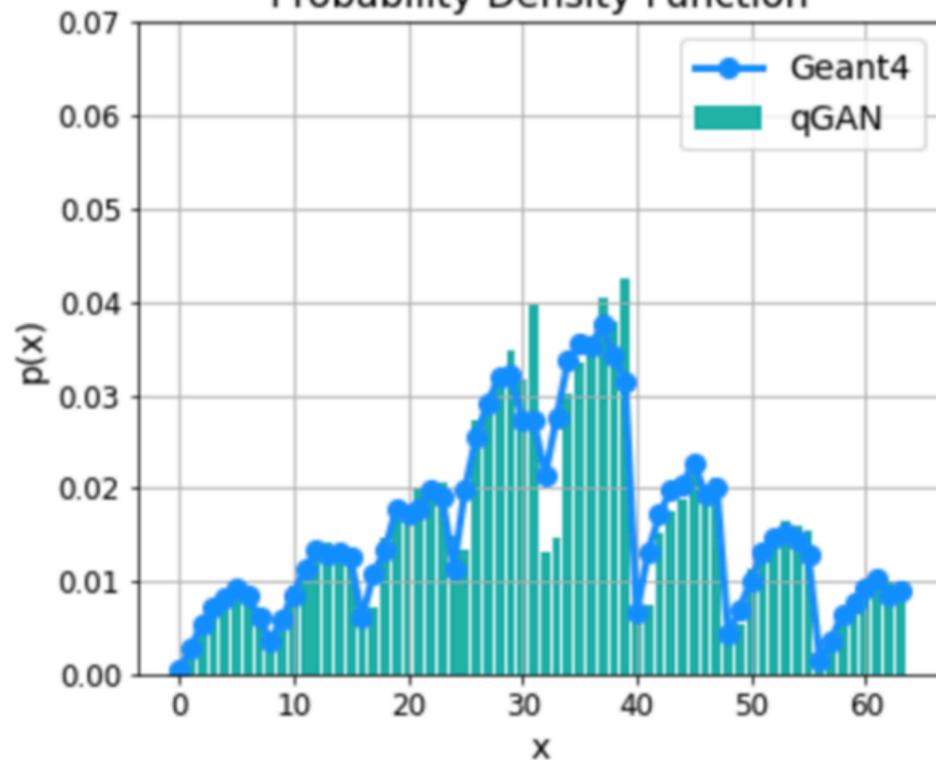


2D 量子生成对抗网络的性能 (理想模拟器)

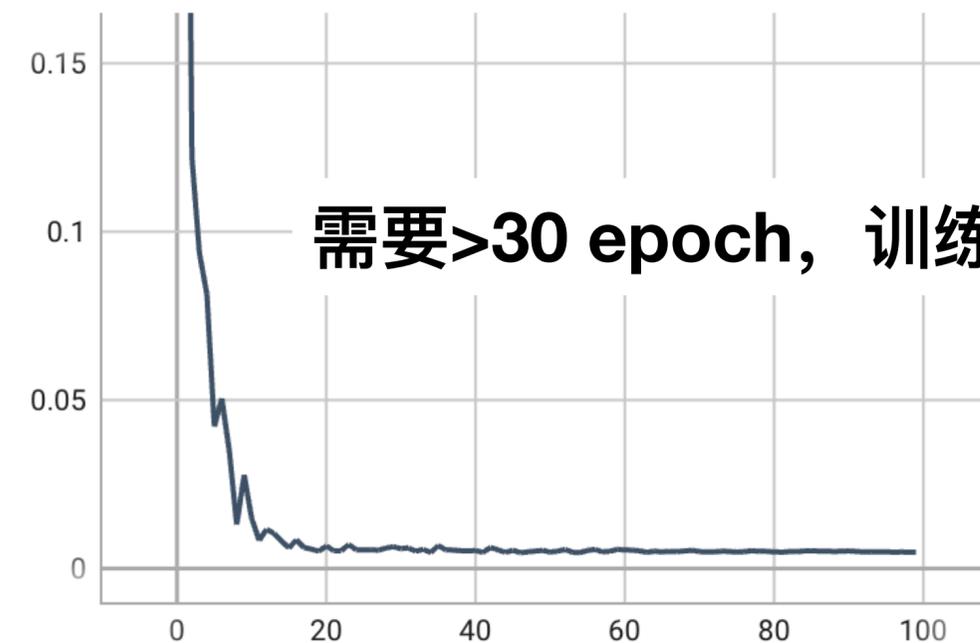
IHEP



Probability Density Function

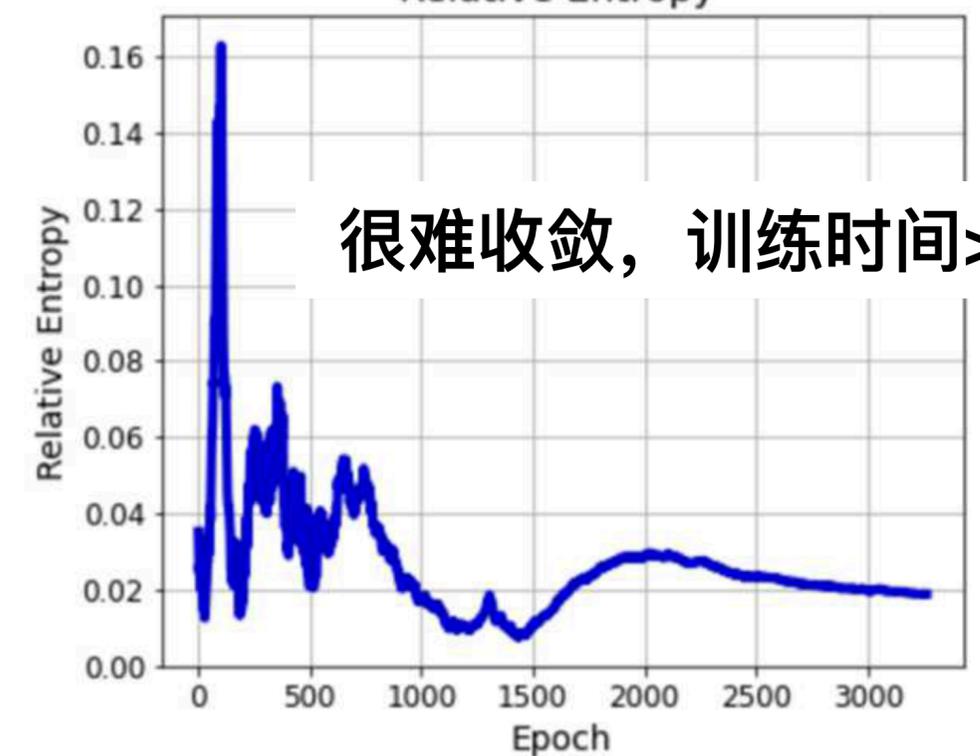


CERN & DESY



需要 >30 epoch, 训练时间 <2h

Relative Entropy



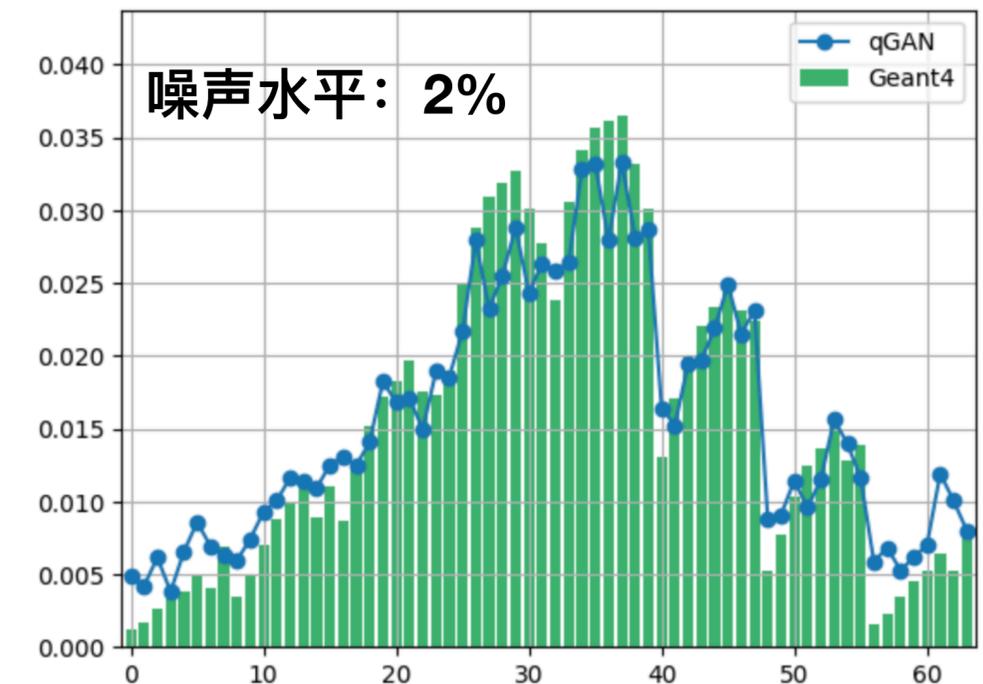
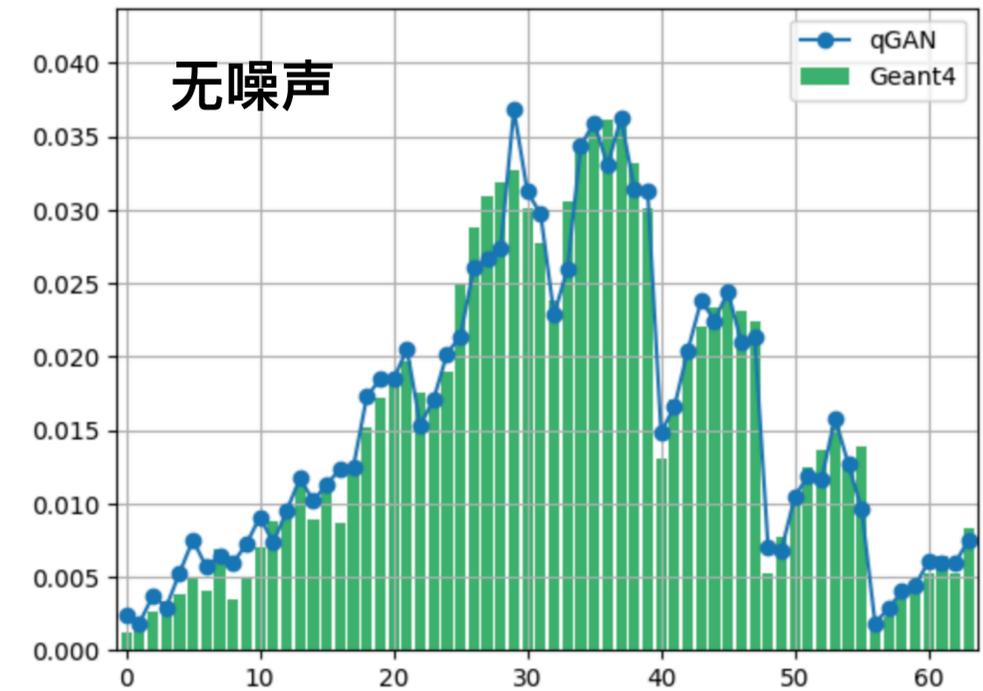
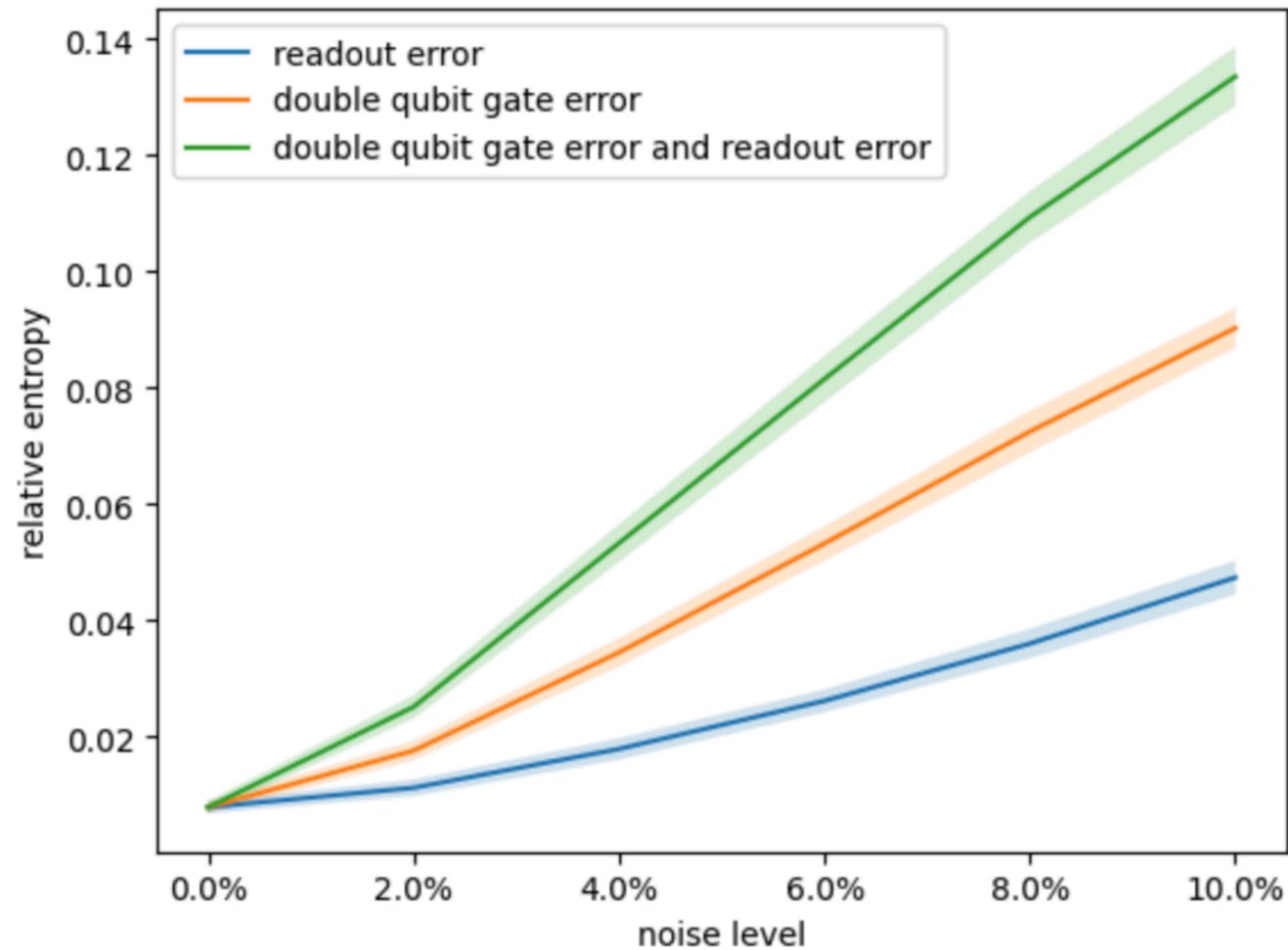
很难收敛, 训练时间 >5天

Epoch

2D: 噪声在模型应用时的影响

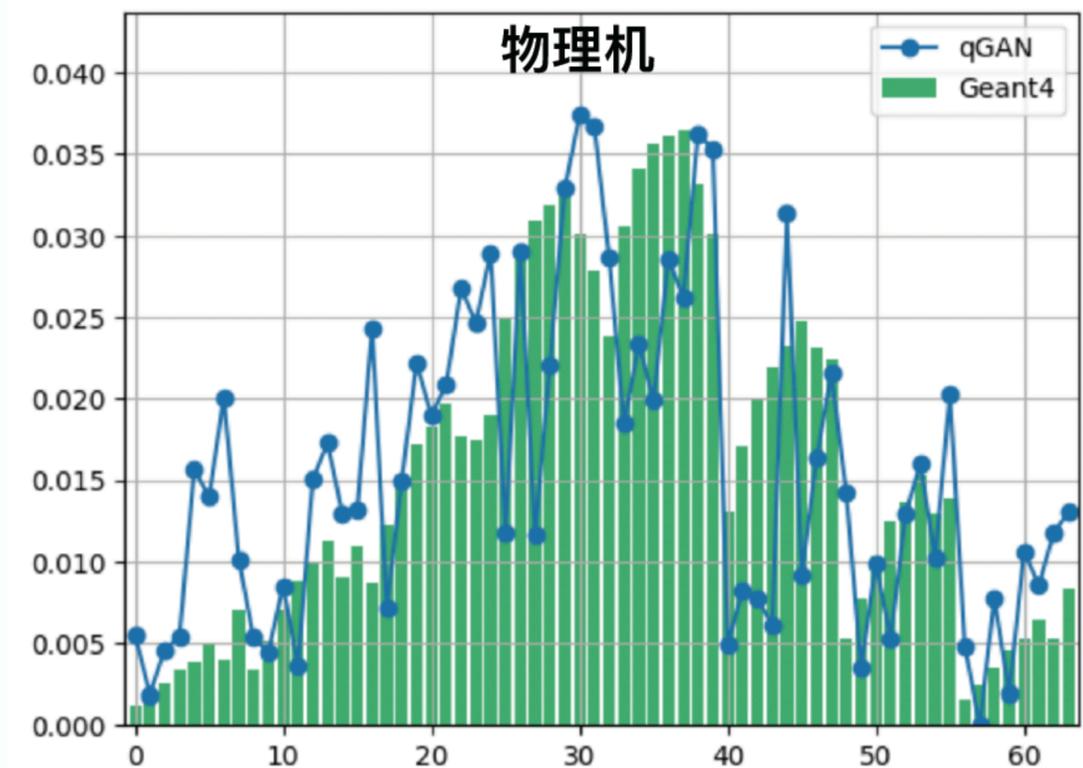
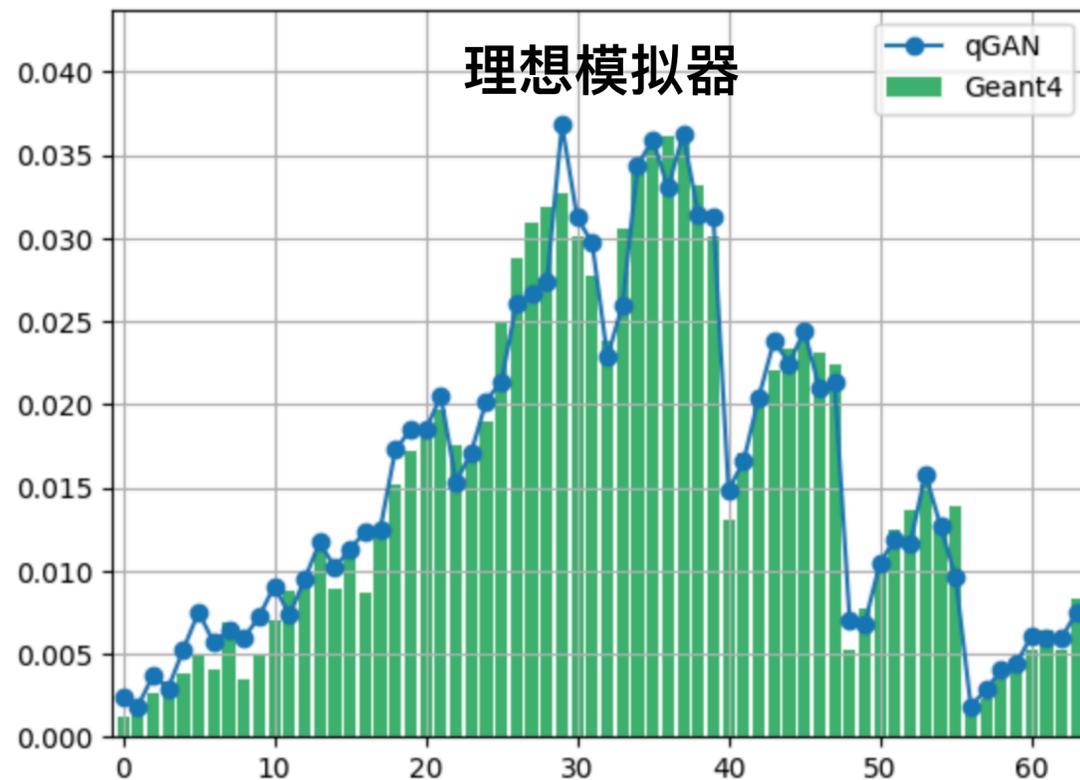
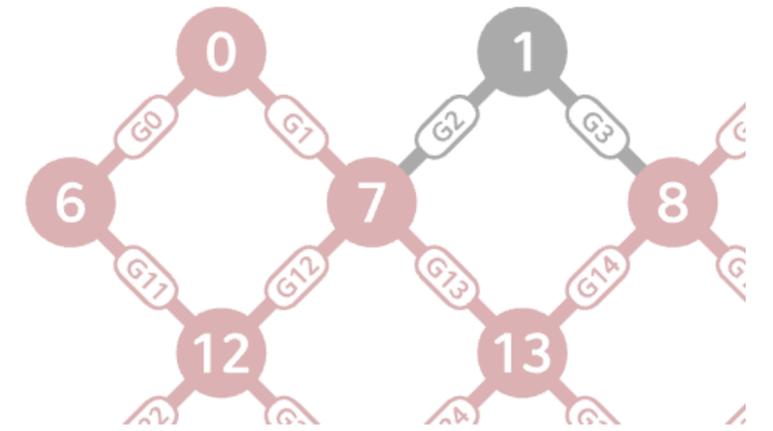
- 2D量子生成对抗网络的模型相对复杂
 - 双量子位门噪声的影响比较大
 - 2%噪声水平下可以看到性能下降

模型参数都是理想模拟器训练出的参数



2D 量子生成对抗网络的性能 (量子计算云平台)

- 直接使用理想模拟器训练得到的参数在物理机上测试
 - 基本上可以生成真实数据的分布
 - 受噪声影响比较大



总结和展望

- 利用量子生成对抗网络，我们在理想模拟器，含噪声模拟器，和国内物理机上生成了1D，2D量能器的平均能量分布
 - 1D: 3个量子比特 -> 8个像素点
 - 2D: 6个量子比特 -> 64个像素点
- 相比于DESY的结果，网络训练更加稳定，所需时间大幅减少
 - 2D训练时间：5d -> 2h
- 未来计划
 - 目前的模型只能生成平均能量分布 → 尝试其他模型
 - 物理机上训练时间比较长 → 批量提交作业
 - 量子生成网络 + 经典鉴别网络 → 量子生成网络 + 量子鉴别网络