

# 量子计算在**高能物理**中的应用

中国物理学会高能物理分会第十四届全国粒子物理学术会议  
2024年8月14日-17日

**大川(Okawa) 英希(Hideki)**  
中国科学院高能物理研究所

# 第二次量子革命：新时代的黎明

谷歌(2019)

九章(2020)

Article

## Quantum supremacy using a programmable superconducting processor

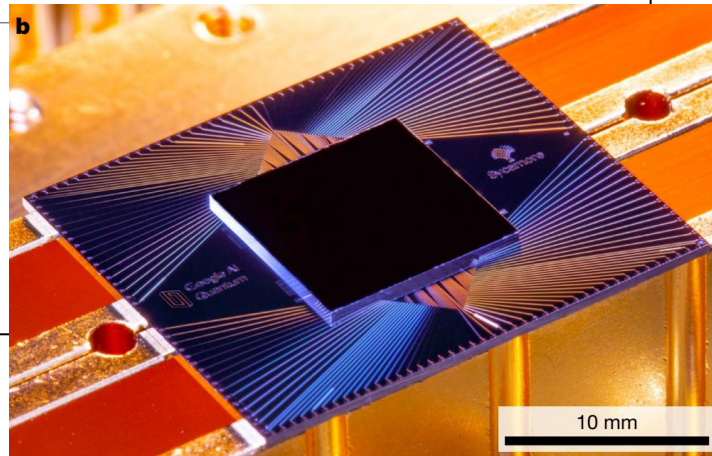
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>

Received: 22 July 2019

Accepted: 20 September 2019

Published online: 23 October 2019

F. Arute et al.,  
Nature 574  
(2019) 505



QUANTUM COMPUTING

## Quantum computational advantage using photons

Han-Sen Zhong<sup>1,2\*</sup>, Hui Wang<sup>1,2\*</sup>, Yu-Hao Deng<sup>1,2\*</sup>, Ming-Cheng Chen<sup>1,2\*</sup>, Li-Chao Peng<sup>1,2</sup>, Yi-Han Luo<sup>1,2</sup>, Jian Qin<sup>1,2</sup>, Dian Wu<sup>1,2</sup>, Xing Ding<sup>1,2</sup>, Yi Hu<sup>1,2</sup>, Peng Hu<sup>3</sup>, Xiao-Yan Yang<sup>3</sup>, Wei-Jun Zhang<sup>3</sup>, Hao Li<sup>3</sup>, Yuxuan Li<sup>4</sup>, Xiao Jiang<sup>1,2</sup>, Lin Gan<sup>4</sup>, Guangwen Yang<sup>4</sup>, Lixing You<sup>3</sup>, Zhen Wang<sup>3</sup>, Li Li<sup>1,2</sup>, Nai-Le Liu<sup>1,2</sup>, Chao-Yang Lu<sup>1,2†</sup>, Jian-Wei Pan<sup>1,2†</sup>

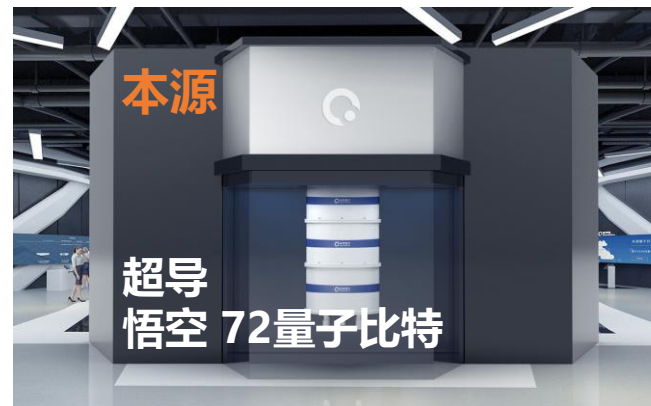
Quantum computers promise to outperform classical computers. Boson sampling exploits the quantum computational advantage of indistinguishable single-mode photons. The experimental demonstration of quantum computational advantage using 100 high-efficiency single-mode photons is a milestone in quantum computing, exploiting thermal hypotheses exploiting thermal quantum computer, Jiuzhang quantum computer, space dimension of  $10^{30}$  and strategy and supercomputers.

Science 370  
(2020) 1460



- 第一次量子革命：激光、晶体管、核磁共振等
- **第二次量子革命：能够识别、控制单个量子。商用量子计算机的到来。在生成随机数时证明了量子霸权。正在走向实际应用。**

# 中等规模带噪声的量子计算(NISQ)时代



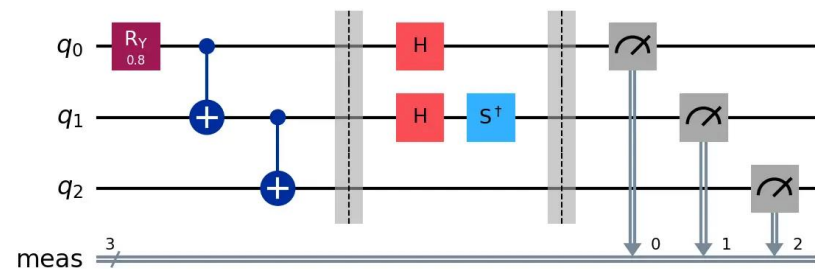
- 现在是**中等规模带噪声的量子计算时代 (>50量子比特)**。
- **超导容错量子计算机要约100万量子比特**。2030年左右可能达到？破加密可能要**约1亿量子比特**。

# 量子计算机和伊辛机

量子计算机

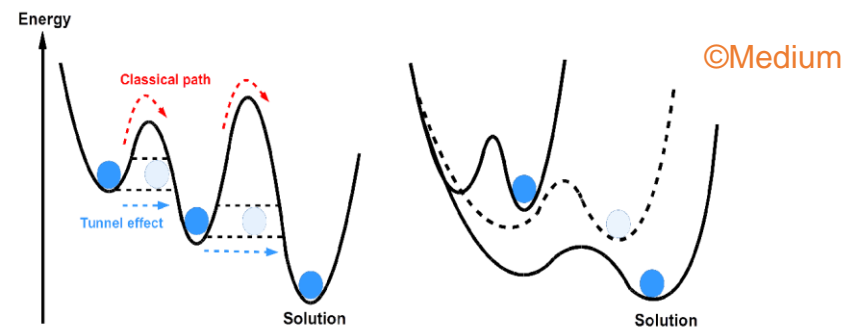
## 量子门 Quantum Gates

- 利用量子逻辑门。是通用计算机。
- **世界上几乎所有的量子计算机都采用这种方法**



## 量子退火 Quantum Annealing

- 利用绝热量子演化来寻找哈密顿量的基态
- **非通用计算机，仅适用于组合优化问题。**仅加拿大 D-Wave 在提供。



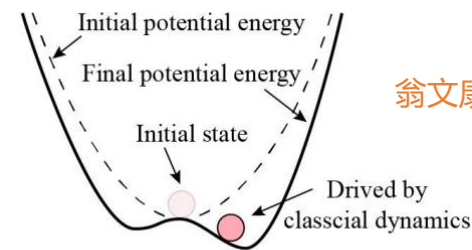
Quantum Tunnelling

Adiabatic evolution

伊辛机

## 量子启发算法/拟量子计算 Quantum-inspired

- **经典算法。仅适用于组合优化问题**
- 模拟退火，模拟相干伊辛机，模拟分叉算法等



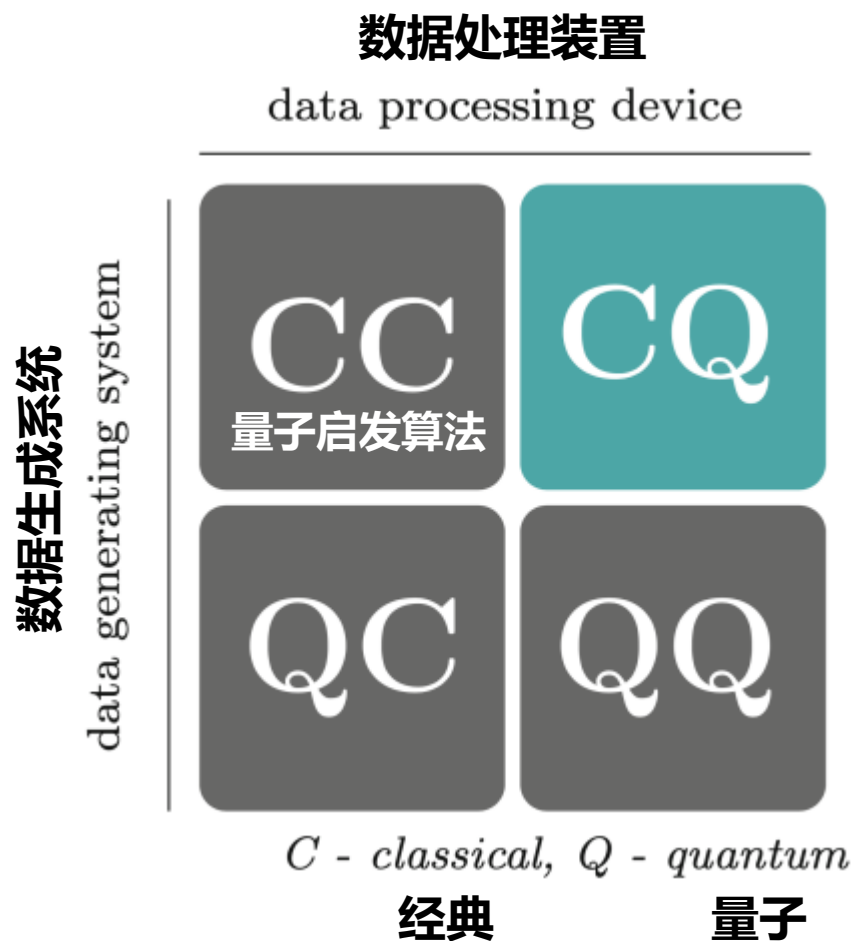
翁文康

Quantum inspired algorithm

# 为什么量子计算?

- **量子力学的特性(叠加, 干扰, 纠缠, (隧穿))可能使计算速度指数级增长**
- **量子计算+机器学习→ 量子机器学习**
  - 丰富的希尔伯特(Hilbert)空间、叠加、纠缠 (&隧穿) **可以在学习数据方面提供优势**
  - 存在四种类型的量子机器学习
- **量子模拟(quantum simulation;用量子计算机模拟时间演化)也是另一个重要的研究方向→能直接模拟量子现象**

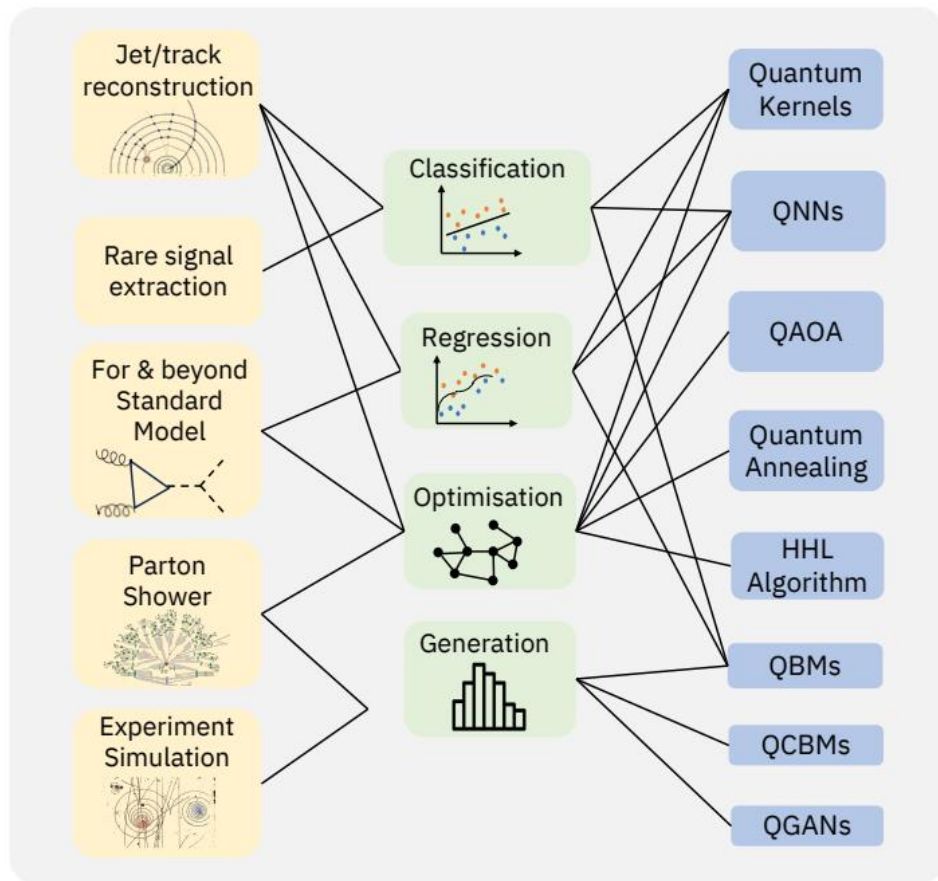
不是“量子模拟器 (quantum simulator)”：用经典计算机模拟量子线路



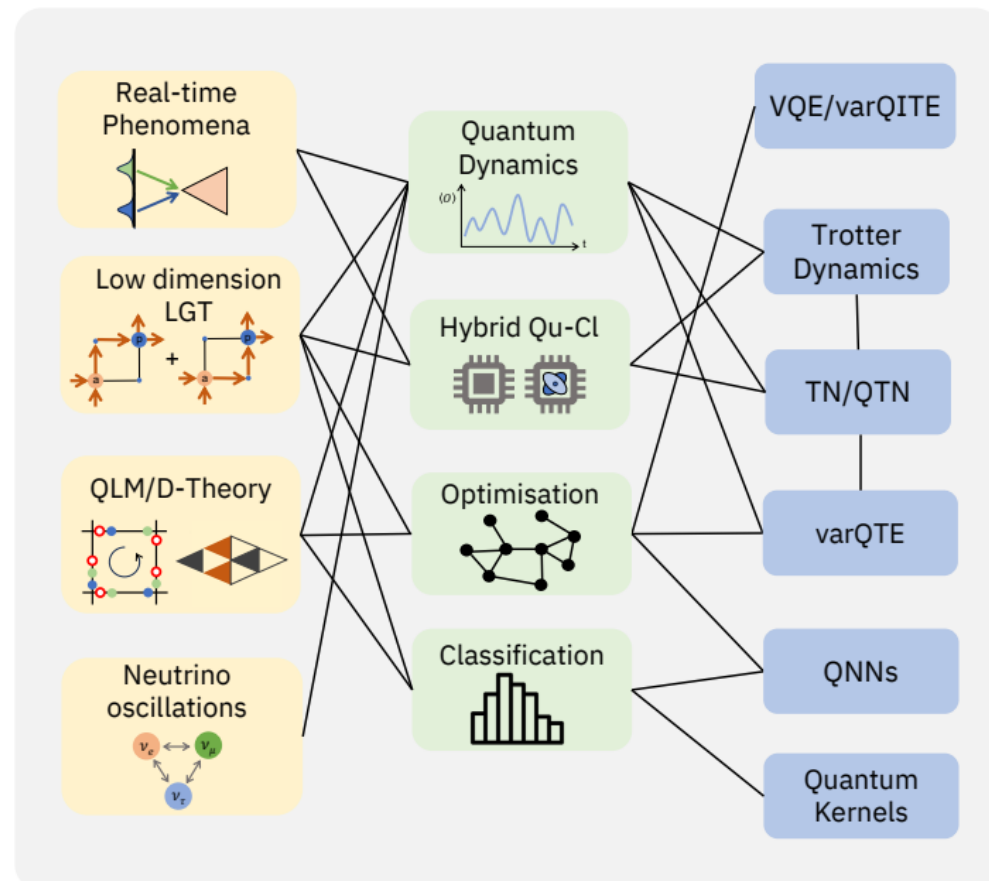
# 高能物理中的应用

QC4HEP Whitepaper

## 实验方面



## 理论方面



关于量子模拟还有 [C.W. Bauer et al., PRX Quantum 4 \(2023\) 2, 027001](#)

# 世界趋势

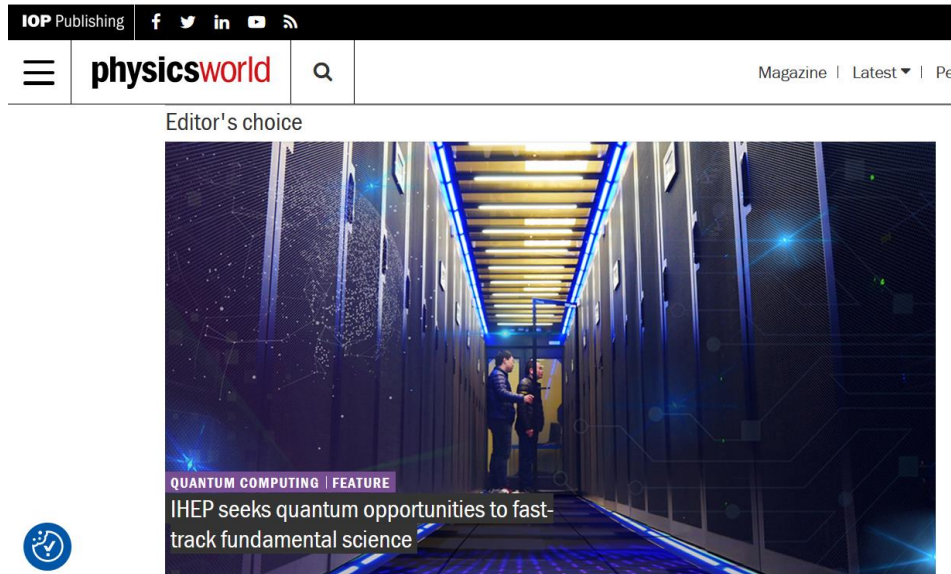


2023年美国P5 report

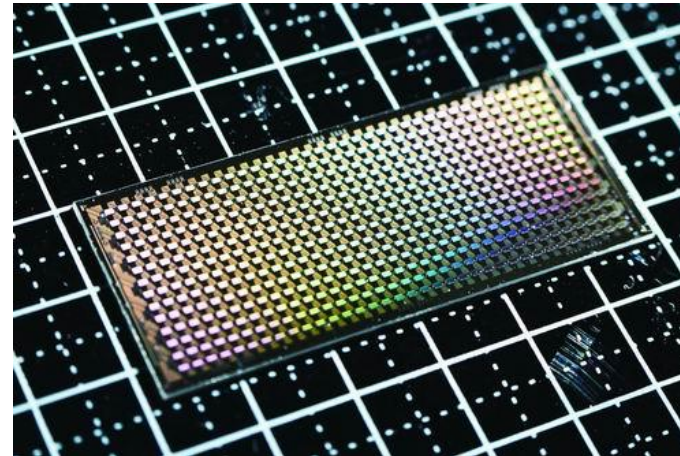
**Area Recommendation 17: Add support for a sustained R&D effort at the level of \$9M per year in 2023 dollars to adapt software and computing systems to emerging hardware, incorporate other advances in computing technologies, and fund directed efforts to transition those developments into systems used for operations of experiments and facilities.** emerging = quantum

- 近年来推出了各种roadmaps。许多国外的实验室和大学建立量子技术研究中心。
- 欧洲CERN建立Quantum Technology Initiative，还有和GESDA，UBS共同设立Open Quantum Institute (包括高能物理以外的广泛应用)。德国DESY成立量子技术与应用中心(CQTA)。
- 美国Fermilab(加拿大SNOLAB)今年4月各自建立(批准)地下宇宙射线本底抑制实验室。
- 2023年美国P5 report: “The particle physics community needs to invest now in order to train and retain the next generation of quantum scientists.”

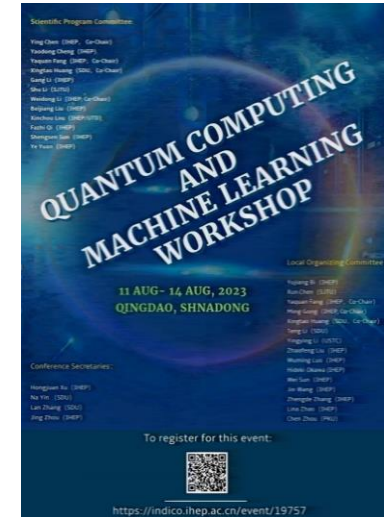
# 国内趋势



## 国盾量子 晓鸿 (504比特)



## 量子计算和机器学习研讨会@山大(2023) [Indico链接](#)



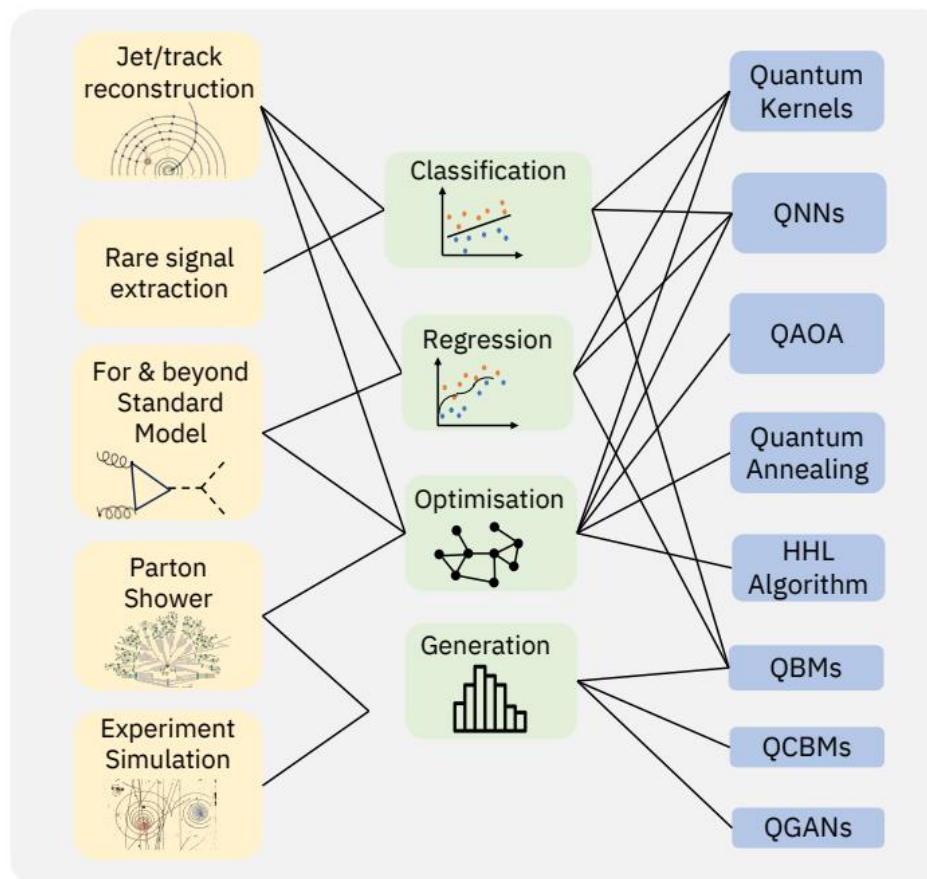
### • 高能物理研究所寻求量子机遇以加快基础科学发展!

- **Physics World (英国科学杂志)** 邀请高能所 (大川英希, 李卫东, 曹俊) 介绍量子计算应用的研究进展。  
[该文章被同时推荐在首页和Editor's choice.](#)

- 与国内单位和公司积极合作和交流: 山大, 南科大/深圳量子科学与工程研究院, 中科大上海研究院/国盾量子, 北京量子信息科学研究院, 本源, 北大, 中科大, 中大, 华南师大等
- 积极共同组织国内会议 → 每年主办量子计算和机器学习研讨会 (今年在吉大 [indico链接](#))

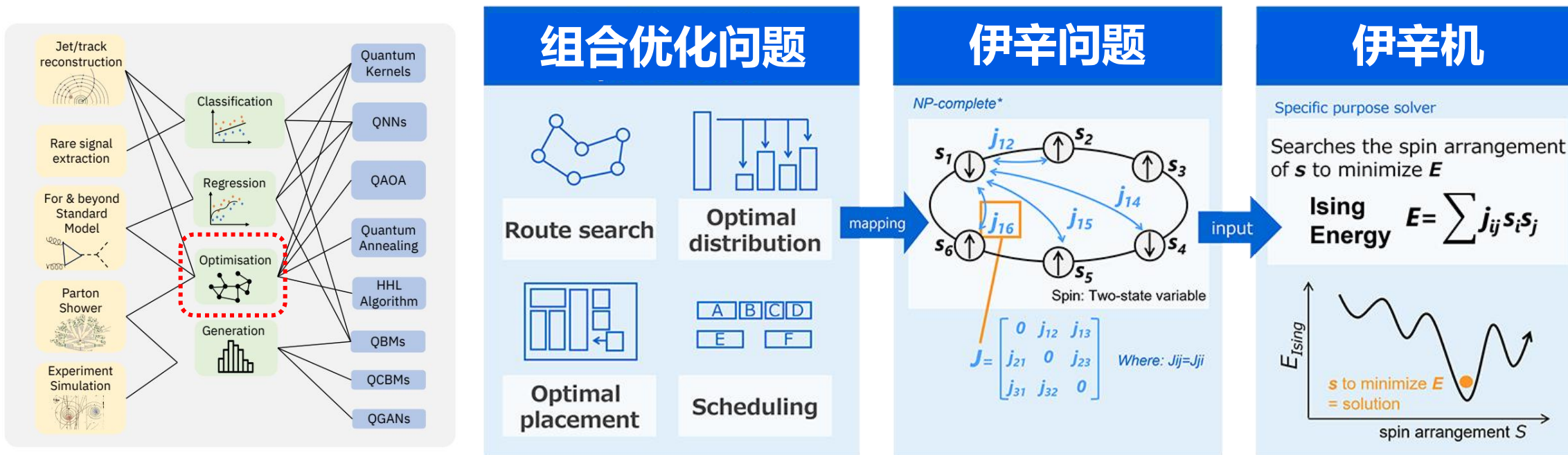


# 实验方面的应用



# 组合优化问题

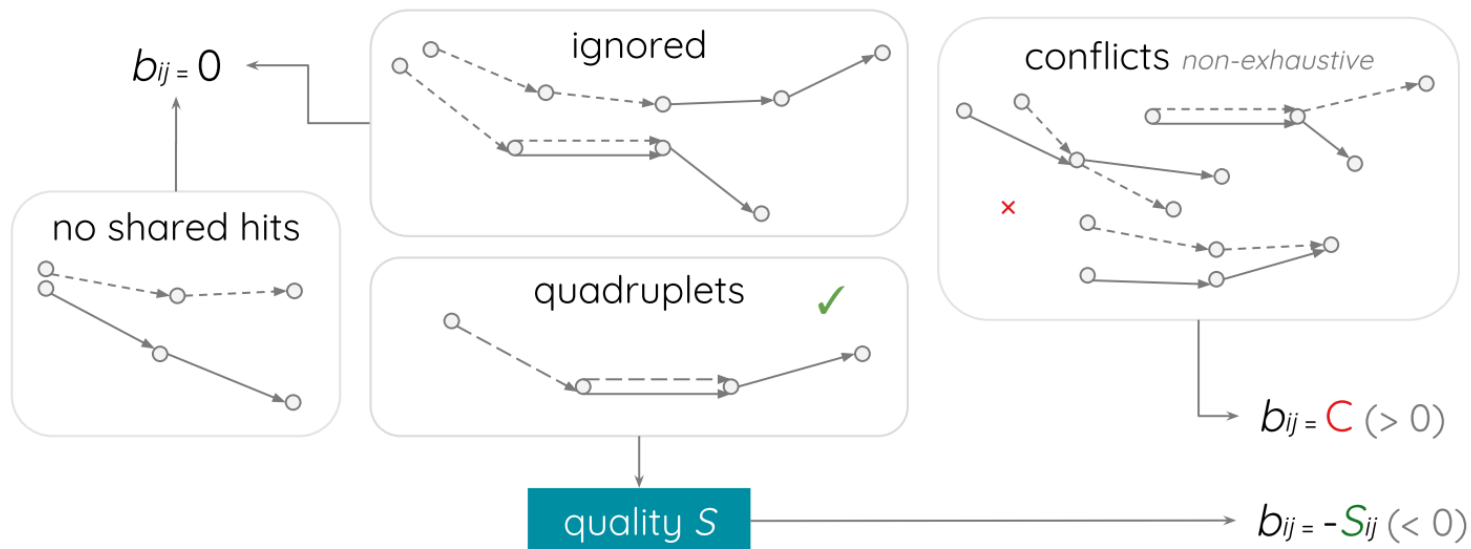
翻译来©TOSHIBA



- **组合优化问题是非确定性多项式(NP)完全问题**→不能确定是否在多项式时间内找到答案。
- 可以表示为伊辛问题。社会中的许多应用。伊辛机在合理的时间内求解绝对或近似的基态。
- 在高能物理中，径迹和喷注重建等许多任务也可以表述为伊辛问题。

# 径迹重建为组合优化问题

F. Bapst et al. *Comp. Soft. Big Sci.* 4 (2019) 1.



$$O(a, b, T) = \underbrace{\sum_{i=1}^N a_i T_i}_{\text{Quality of triplets}} + \underbrace{\sum_i \sum_{j<i}^N b_{ij} T_i T_j}_{\text{Compatibility b/w triplet pairs}}$$

$$\begin{aligned} b_{ij} &= 0 \text{ (if no shared hit)} \\ &= 1 \text{ (if conflict)} \\ &= -S_{ij} \text{ (if two hits are shared)} \end{aligned} \quad T_i, T_j \in \{0, 1\}$$

$$S_{ij} = \frac{1 - \frac{1}{2}(|\delta(q/p_{T_i}, q/p_{T_j})| + \max(\delta\theta_i, \delta\theta_j))}{(1 + H_i + H_j)^2},$$

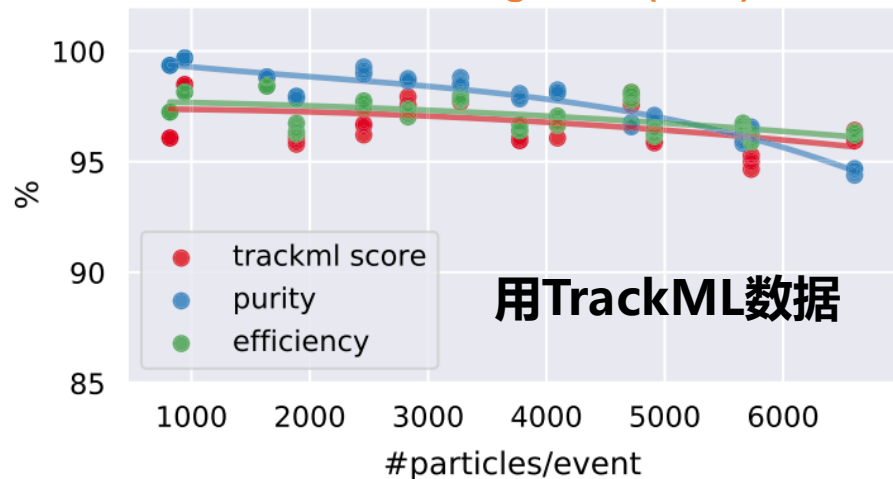
$$a_i = \alpha \left(1 - e^{-\frac{|d_{0i}|}{\gamma}}\right) + \beta \left(1 - e^{-\frac{|z_{0i}|}{\lambda}}\right),$$

- 径迹重建可以作为一个组合优化问题。
- 伊辛哈密顿量的设计方式是正确答案给出的最低能量。  
→可以直接使用量子退火机!
- 量子门也可以用：变分量子算法(VQE), 量子近似优化算法(QAOA)来解决组合优化问题

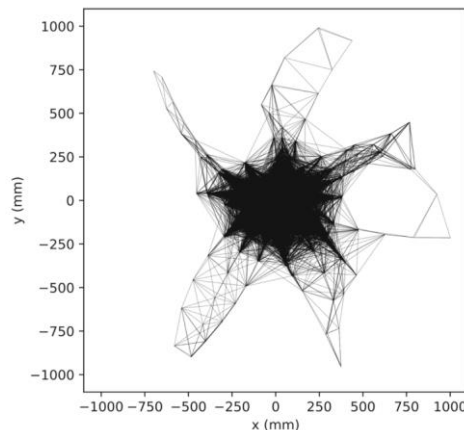
# 用量子计算径迹重建

## 量子退火机 (基于triplet)

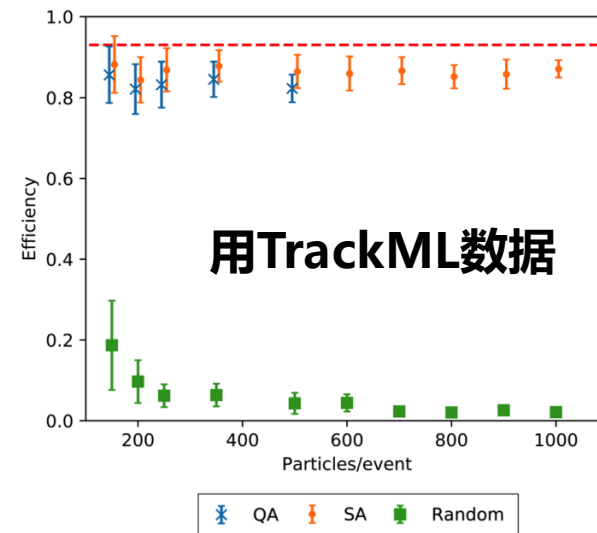
F. Bapst et al. *Comp. Soft. Big Sci.* 4 (2019) 1.



## 量子退火机 (基于doublet)

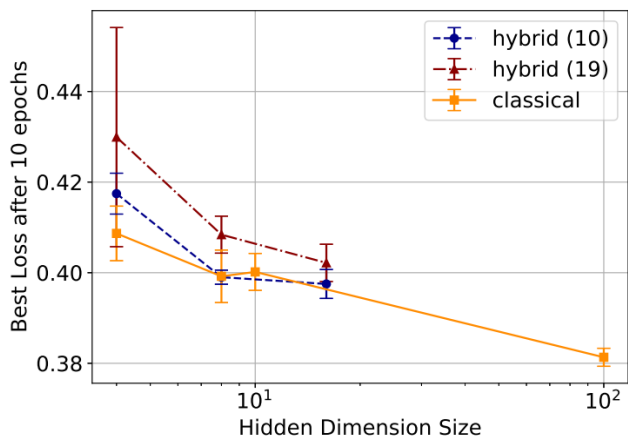


A. Zlokapa et al., *Quantum Machine Intelligence* (2021) 3:27



## 量子门 (QGNN)

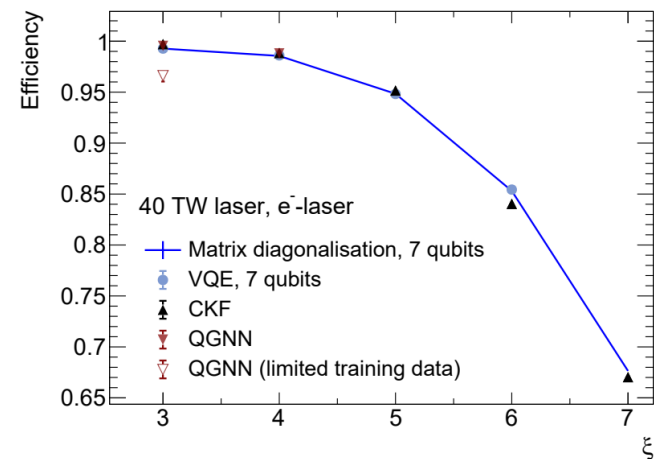
C. Tuysuz et al., *Quantum Machine Intelligence* (2021) 3:29



## 量子门 (VQE基于triplet, QGNN)

Y.C. Yap et al., *PoS EPS-HEP2023* (2024) 562

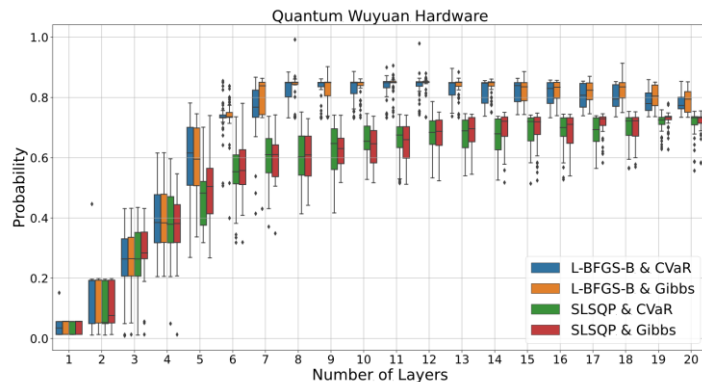
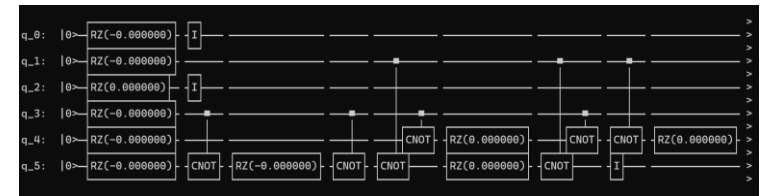
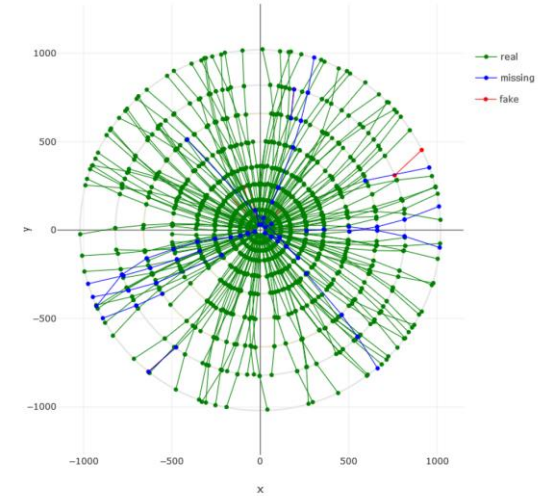
DESY-LUXE  
实验模拟数据



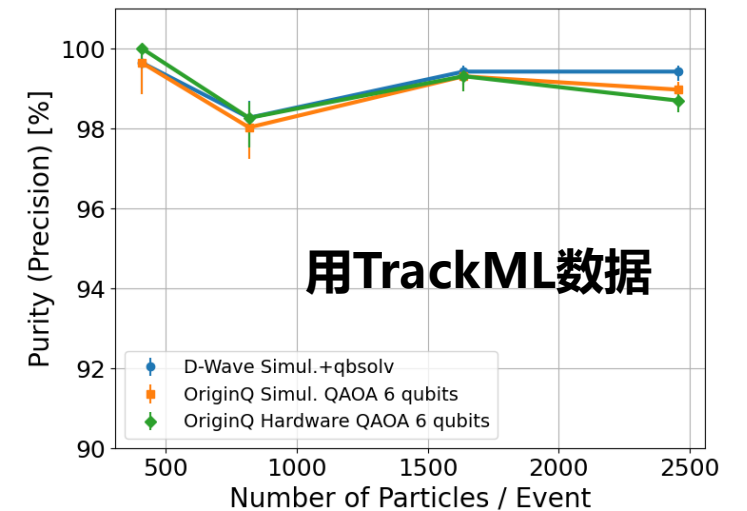
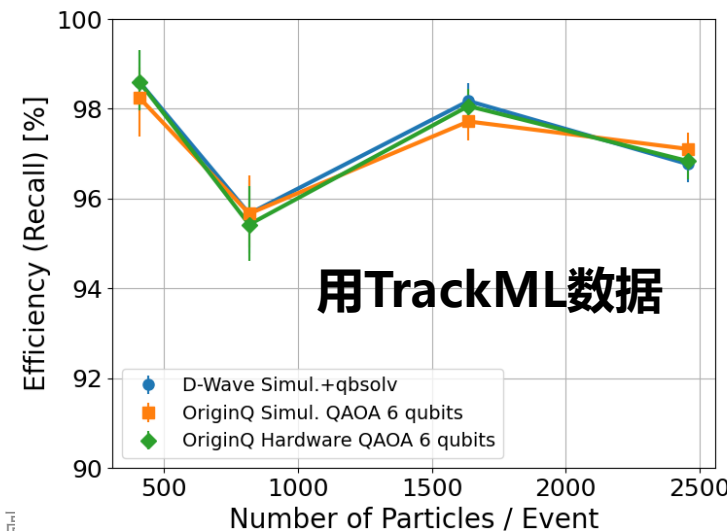
大川英希

# 用中国量子计算机重建径迹

- **全球首次成功使用量子近似优化算法(QAOA)的径迹重建 (tracking)**
- **全球首次使用目前唯一具有理论稳健性的矩阵分割计算方法 (subQUBO方法): Multiple Instance Method**
- **首次使用中国量子计算机(本源悟源: 6量子比特)重建径迹。**
- **真实量子计算性能没有下降!** 此外, 与D-Wave量子退火器兼容的Tracking性能。



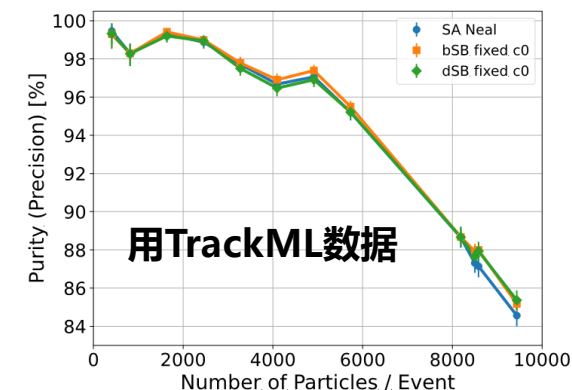
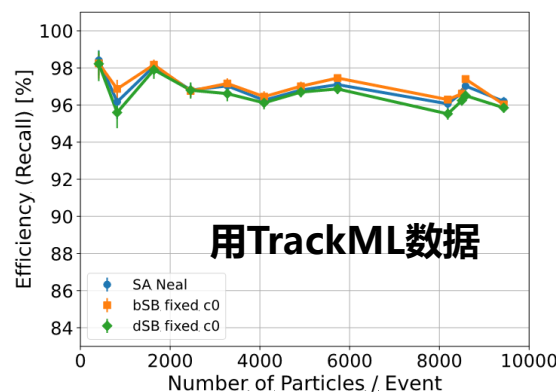
大川英希



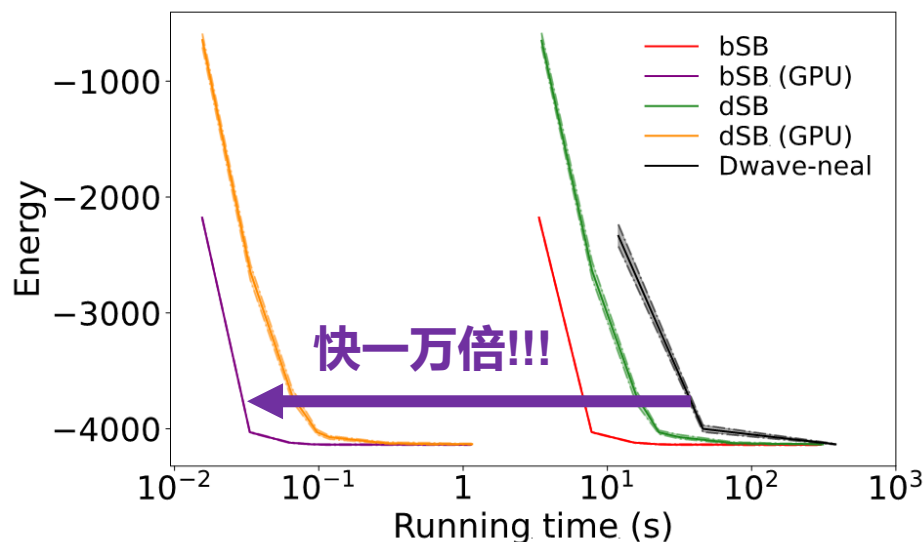
# 量子启发算法的潜力!

- 对于一些问题, 量子启发算法(模拟分叉算法, simulated bifurcation)优于量子退火计算机
- **全球首次在高能物理中使用模拟分叉算法。** 径迹重建性能很好(在HL-LHC最稠密条件, 还保持效率 > 95%, 纯度 > 85%)
- **比模拟退火算法快一万倍! 这不是未来的算法, 而是在正在运行的实验上就可以使用!** (LHC, BESIII等)

没有量子比特数的限制, 可以处理巨大数据!



代码在华为MindsporeQuantum  
只用一个CPU或GPU (23分钟→0.13秒)



Data Information		Time to target [s]				
# of particles	QUBO size	bSB	bSB (GPU)	dSB	dSB (GPU)	D-Wave Neal
409	778	0.007	0.021	0.032	0.092	0.060
818	1431	0.012	0.019	0.293	0.478	0.169
1637	2904	0.012	0.019	0.293	0.478	0.169
2456	4675	0.014	0.017	-	-	0.479
3274	6945	0.032	0.022	-	-	1.229
4092	10295	0.005	0.022	0.015	0.065	0.030
4912	14855	0.027	0.016	-	-	2.165
5730	22022	0.109	0.042	-	-	3.853
8187	67570	0.488	0.028	-	-	404.297
8500	78812	1.899	0.108	-	-	785.732
8583	80113	1.321	0.067	-	-	93.782
9435	109498	3.884	0.140	-	-	1366.808

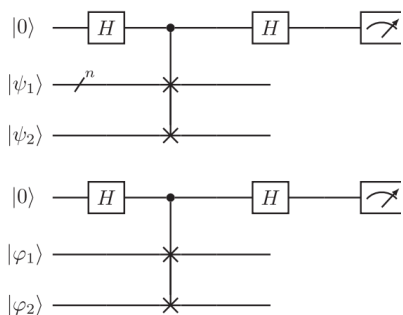
# 喷注重建 (迭代法)

- 喷注重建是聚集/分割问题。量子算法有望提高计算速度。
- 尝试用量子计算代替迭代计算。预计将带来计算加速，还在概念阶段。

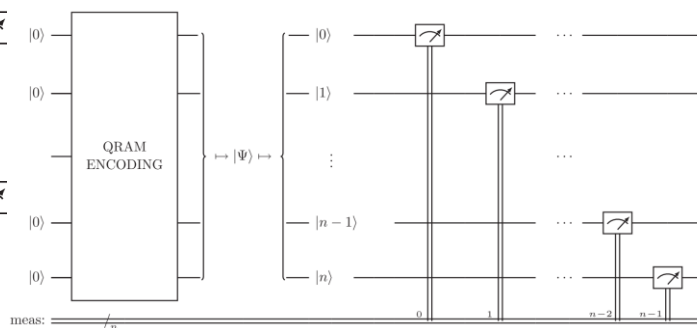
量子K-means, 量子近邻传播聚类(AP), 量子k<sub>t</sub>

J.J. Martinez de Lejarza, L. Cieri, G. Rodrigo, PRD 106 036021 (2022)

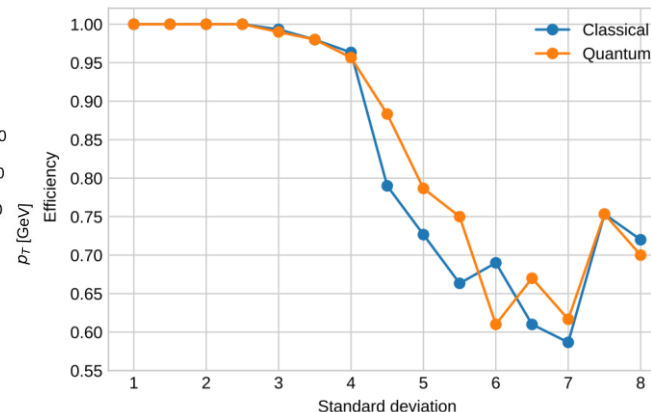
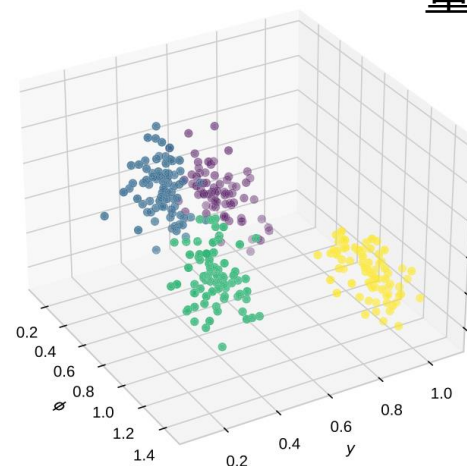
计算闵可夫斯基空间  
中的距离



将每个粒子分配到最近的质心



量子K-means



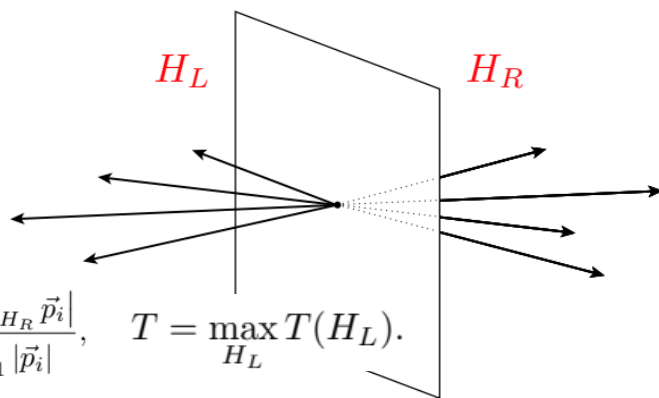
- 其他类似论文: Grover搜索 A. Wei, P. Naik, A.W. Harrow, J. Thaler, PRD 101, 094015 (2020), 量子K-means D. Pires, P. Bargassa, J. Seixas, Y. Omar, arXiv:2101.05618 (2021).

# 喷注重建 (全局方法)

朱永峰<sup>a</sup>, 庄伟峰<sup>b</sup>, 钱辰<sup>b</sup>, 马运恒<sup>b</sup>, 刘东<sup>b,c</sup>, 阮曼奇<sup>d</sup>, 周辰<sup>a</sup>,  
arXiv:2407.09056 <sup>a</sup>北大, <sup>b</sup>北京量子院, <sup>c</sup>清华, <sup>d</sup>高能所

## 量子退火机 (基于Thrust或角度)

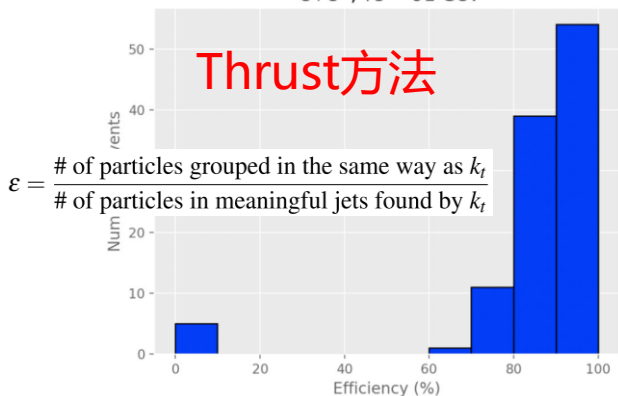
A. Delgado, J. Thaler,  
PRD 106, 094016 (2022)



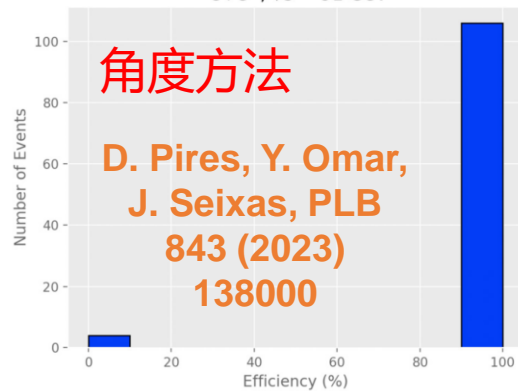
$$T(H_L) = \frac{2 \left| \sum_{i \in H_L} \vec{p}_i \right|}{\sum_{i=1}^N |\vec{p}_i|} = \frac{2 \left| \sum_{i \in H_R} \vec{p}_i \right|}{\sum_{i=1}^N |\vec{p}_i|}, \quad T = \max_{H_L} T(H_L).$$

$e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow qq$

Thr  
 $e^+e^-$ ,  $\sqrt{s} = 91$  GeV



QBC  
 $e^+e^-$ ,  $\sqrt{s} = 91$  GeV

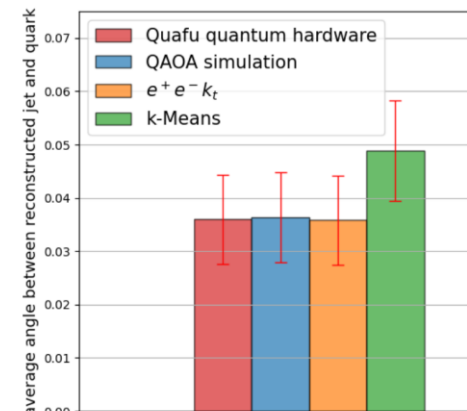
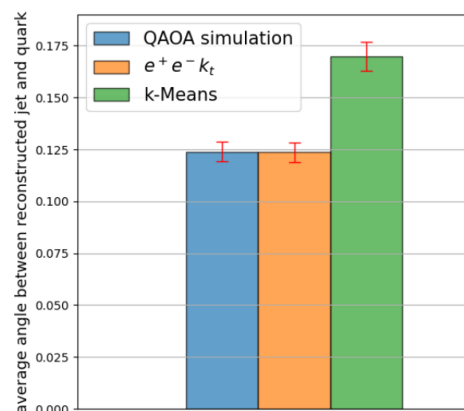


大川英希

高能物理分会第十四届全国粒子物理学术会议

## 量子门 (量子近似优化算法QAOA)

30粒子简化数据 ( $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow vvss$ ) 6粒子简化数据 ( $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow vvss$ )



详见: 朱永峰  
[北大]的  
分会报告

- 喷注重建也可以被视为组合优化(QUBO)问题
- D. Pires等: 角度方法超越Thrust方法, 但 多喷注事例( $N_{jet} > 2$ )中的性能差。
- 朱永峰等: 使用简化数据来评估平均角度。

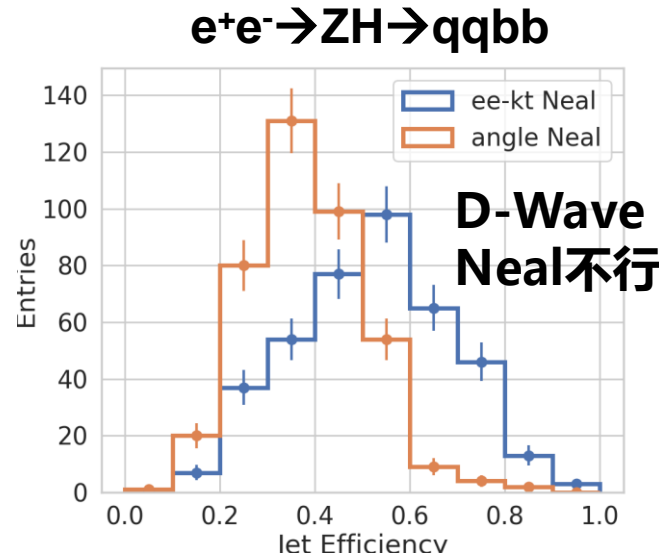
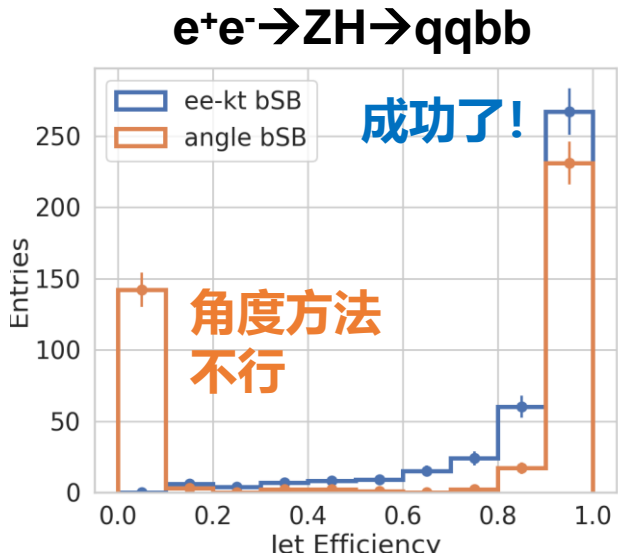
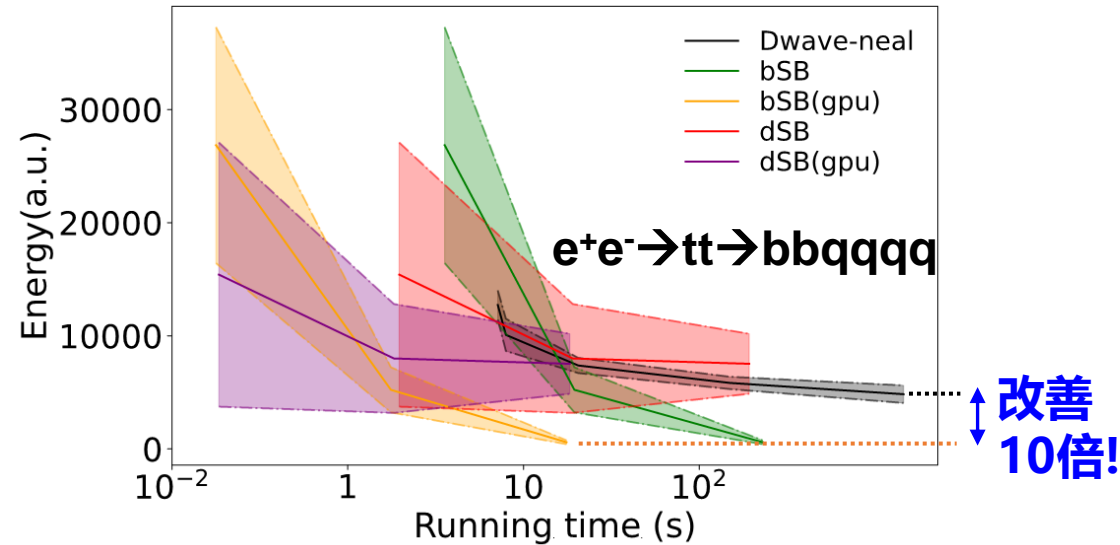


# 喷注重建 (全局方法)

量子启发算法 (基于 $ee-k_t$ 距离的矩阵)

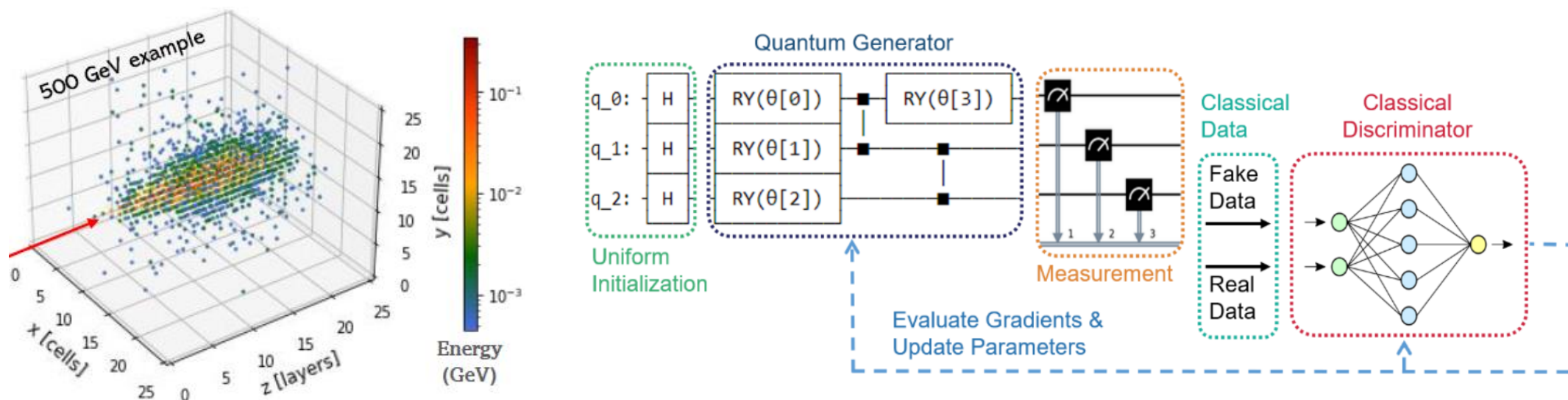
$$O_{\text{QUBO}}^{\text{multijet}}(x_i) = \sum_{n=1}^{n_{\text{jet}}} \sum_{i,j=1}^{N_{\text{input}}} Q_{ij} x_i^{(n)} x_j^{(n)} + \lambda \sum_{i=1}^{N_{\text{input}}} \left( 1 - \sum_{n=1}^{n_{\text{jet}}} x_i^{(n)} \right)^2,$$

$$Q_{ij} = 2\min(E_i^2, E_j^2)(1 - \cos \theta_{ij}).$$



- 量子启发算法没有量子比特数的限制, 可以处理实际数据!
- 角度方法和模拟退火不能处理多喷注重建! 基于 $ee-k_t$ 距离合适。
- 模拟退火不能找到QUBO低能量! 只有模拟分叉算法可以。→ 找到约10倍低能量 (tt事例)。
- 全球首次成功使用QUBO重建多喷注事例!
- 比模拟退火快约20倍 (Z事例)。

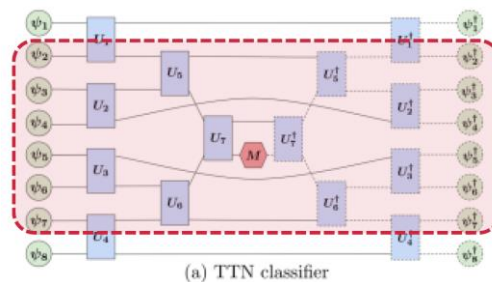
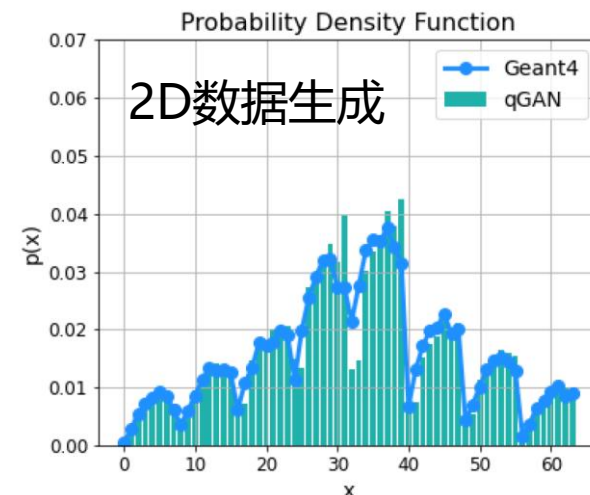
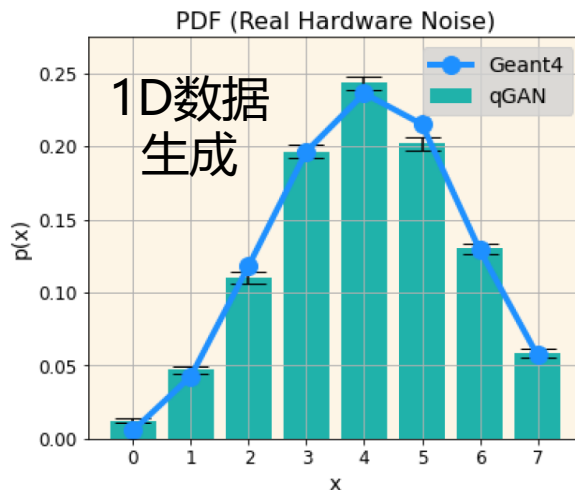
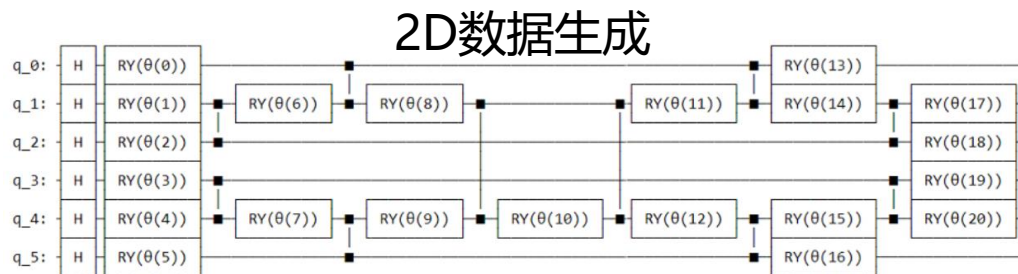
# 量能器模拟



- 量能器模拟非常消耗CPU. 经典机器学习应用 (GAN, VAE等)是当下热门话题。
- 量子生成对抗网络(QGAN)在未来可能能够减少训练时间并提高准确性。
- 两种方法: (1) 量子生成器与经典识别器的混合, (2) 全量子版

# 混合量子生成对抗网络

F. Rehm<sup>1,2</sup>, S. Vallecorsa<sup>1</sup>, K. Borras<sup>2,3</sup>, D. Krücker<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>CERN, <sup>2</sup>Aachen, <sup>3</sup>DESY  
 Proceedings for GRID 2021

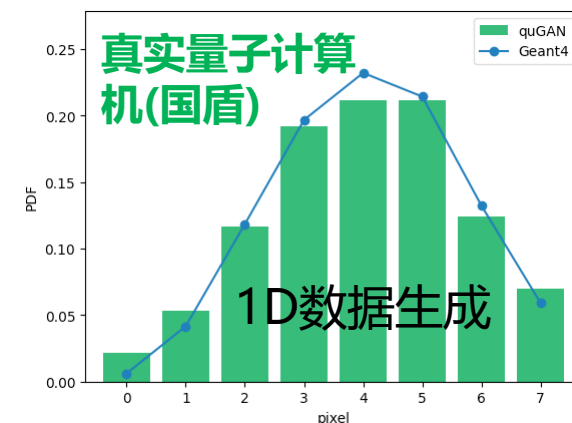


- 缩小数据规模以匹配量子比特数。
- 通过模拟对噪声进行详细研究。
- 基于张量网络的量子线路设计。
- **成功生成1D和2D数据。**
- 问题：二维数据训练中的一些不稳定性，**振幅编码只能再现概率密度分布，而不能逐个事例生成。**

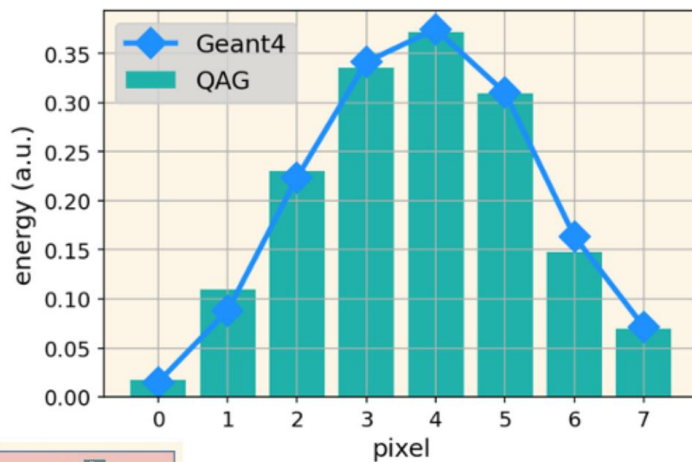
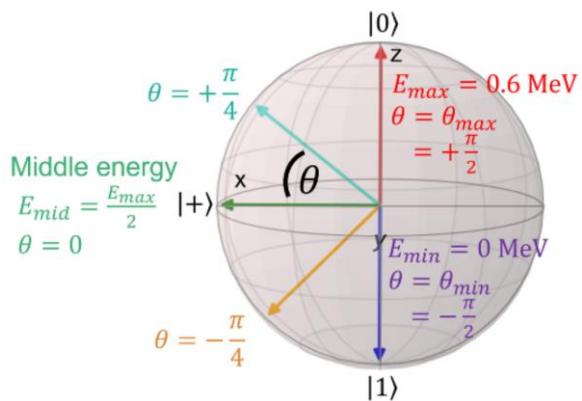
## 国内进展

- 优化CERN-DESY开发的方法，提高了训练稳定性 (优化损失函数)
- 成功使用中国的量子计算机(国盾)。与简化噪声模型模拟一致

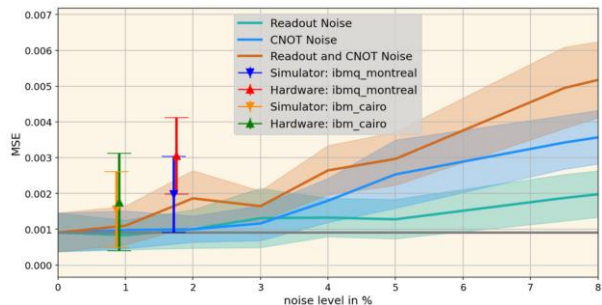
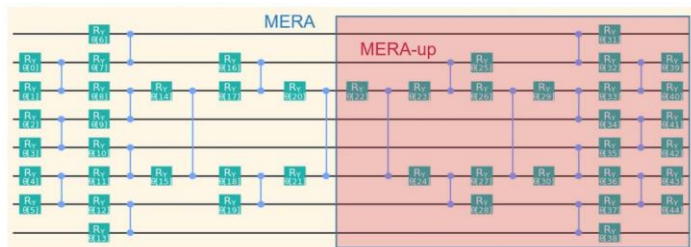
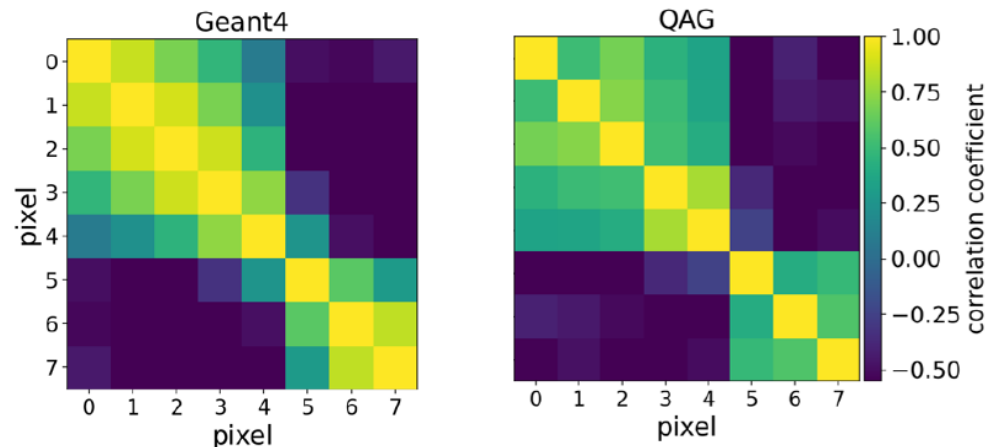
黄晓忠, 李卫东 [高能所]



# 全量子生成对抗网络



## 再现像素相关性



- 角度编码(angle encoding)克服上述问题，能逐个事例生成。
  - 混合量子生成对抗网络也能进行逐个事例生成，但超过4像素的结果较差 (CERN openlab的dual-PQC GAN, S.Y. Chang et al., J. Phys. Conf. Ser. 2438 (2023) 1, 012062)
- 使用两次损失(MMD和Corr)来再现像素相关性。
- 模型可以学习噪声并恢复性能。能接受高达8%的噪声。
- **国内进展**：和DESY沟通，成功运行了QAG。正在优化算法。

黄晓忠, 李卫东 [高能所]

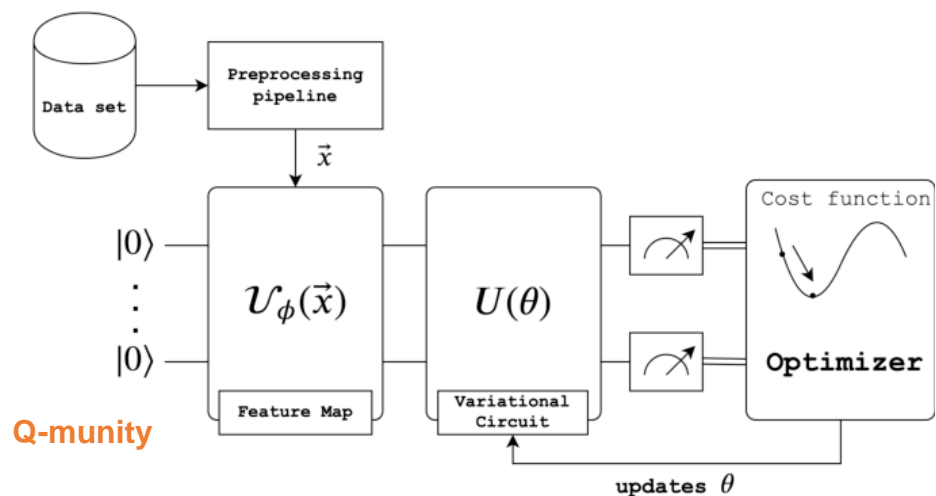
# 监督学习

## 量子退火机

- 将机器学习转化为优化问题 (QBoost, QAML, QAML-Z等)

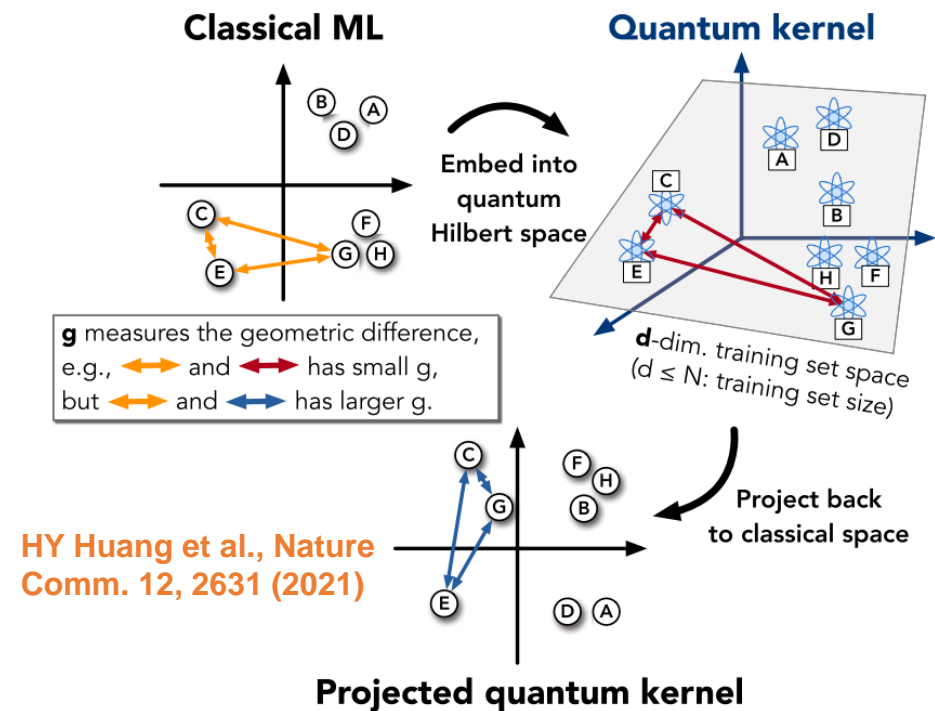
## 变分量子算法

- 在变分线路中, 经典优化器更新了参数



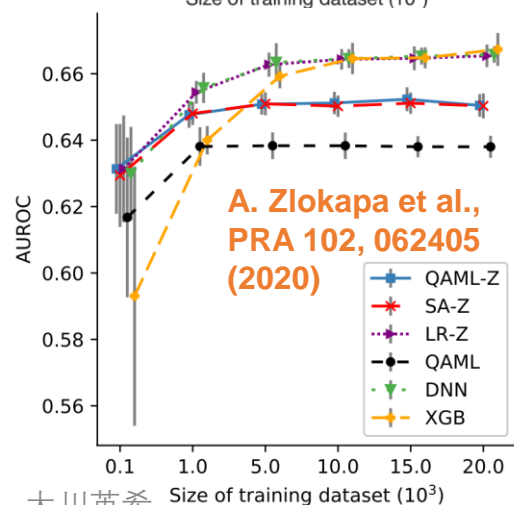
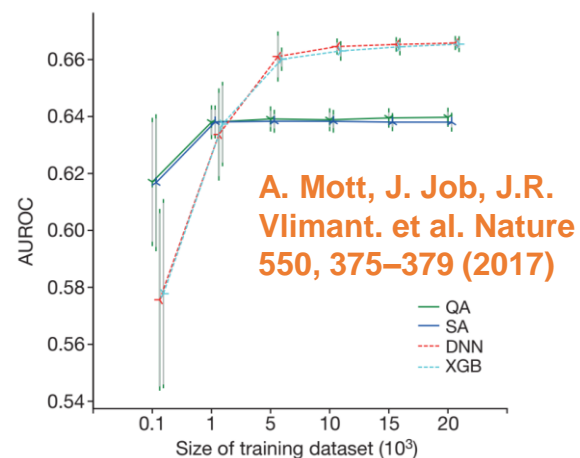
## 核方法 – 量子支持向量机 (QSVM)

- 特征图作为量子核 → 希尔伯特(Hilbert)空间的潜在优势



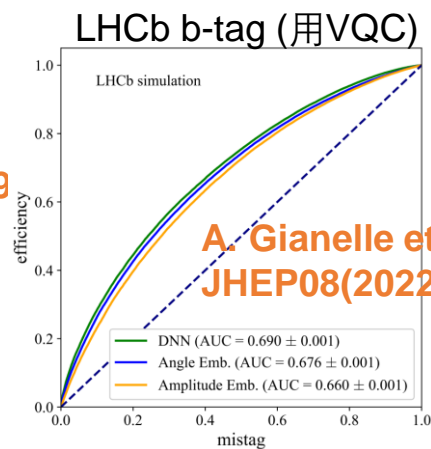
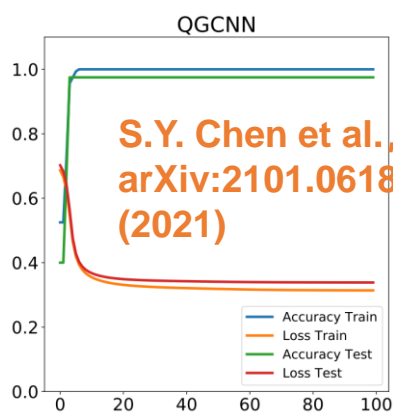
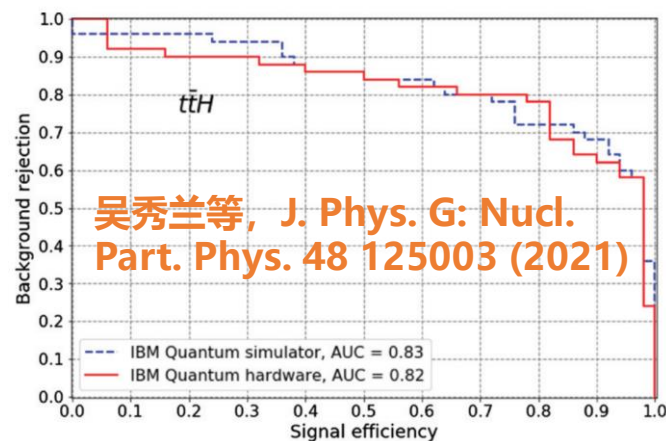
# 监督学习

## 量子退火机



大川英希

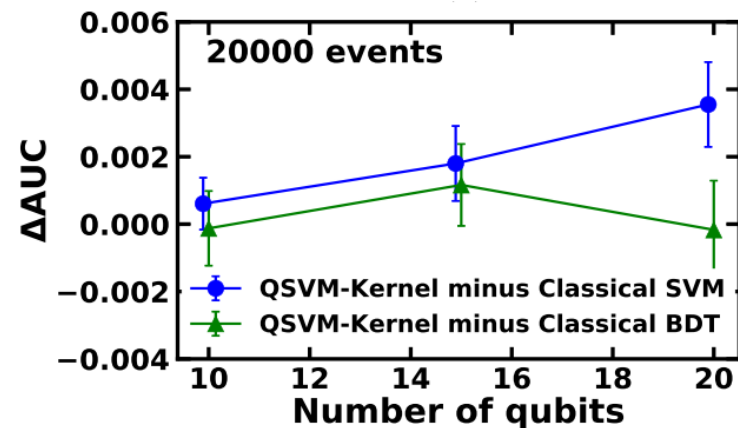
## 量子门(变分量子算法)



高能物理分会第十四届全国粒子物理学术会议

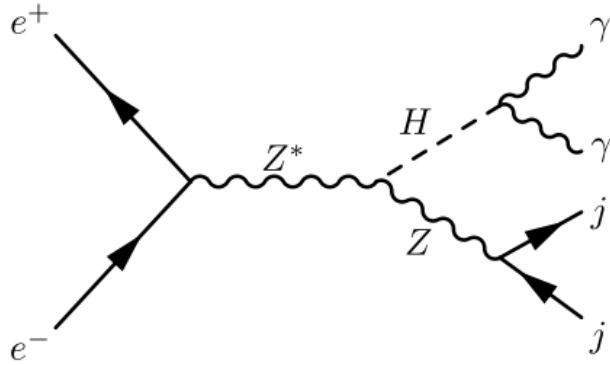
## 量子门(核方法)

吴秀兰等, Phys. Rev. Research 3, 033221 (2021)

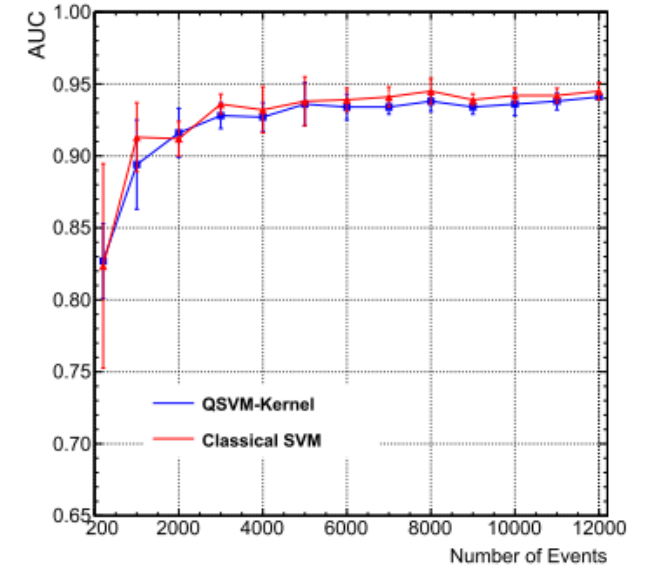
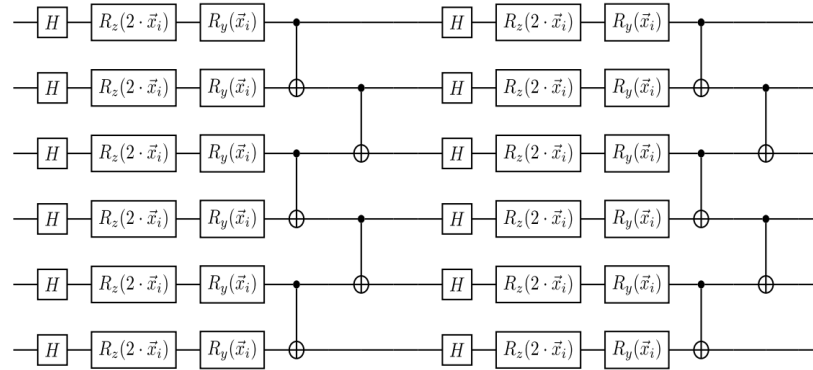


- A. Mott等：量子机器学习(用量子退火机)在高能物理中的首次应用。
- 目前人们仍在尝试各种量子机器学习算法。

# 监督学习 - 事例分类



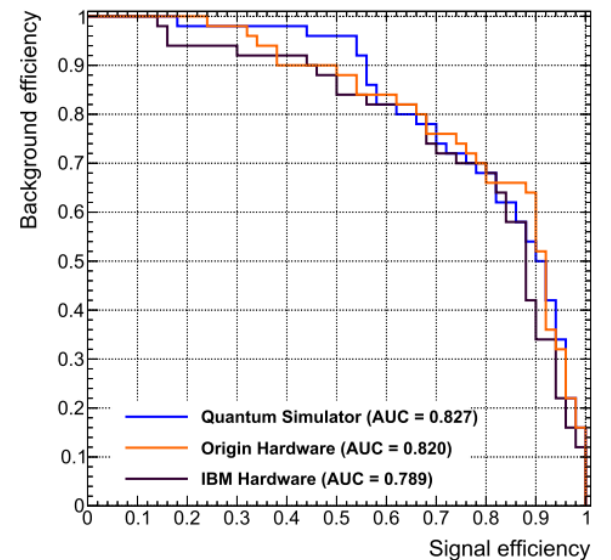
量子特征图



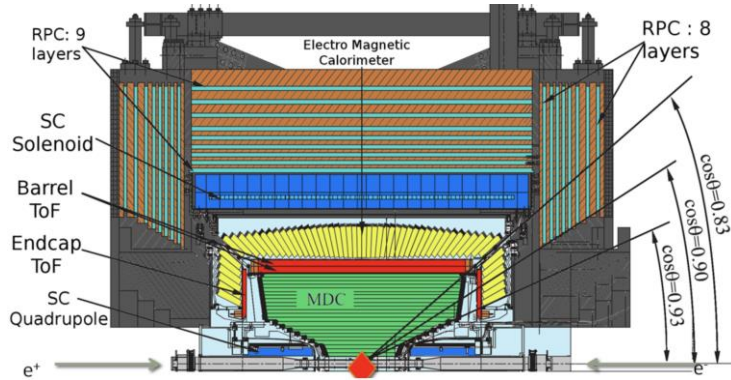
- 在CEPC数据上成功使用了量子支持向量机(QSVM)
- 真实量子计算机(本源和IBM)和量子模拟机的性能差不多

## 进行的其他研究:

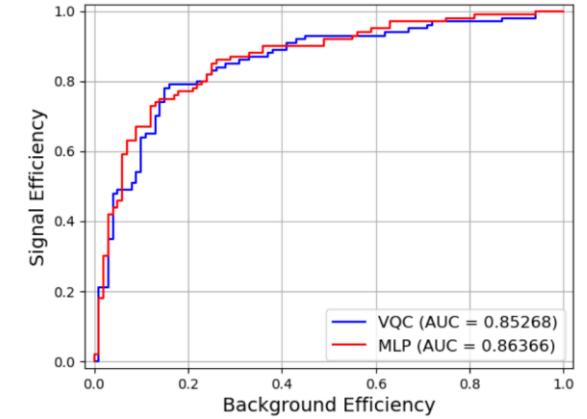
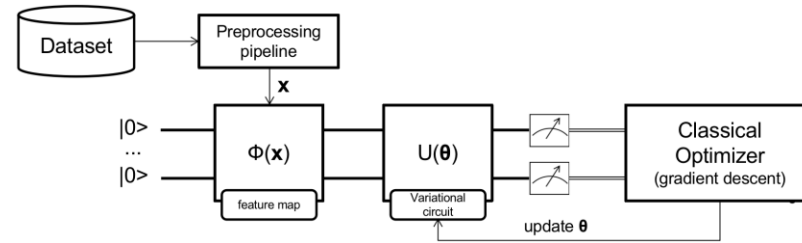
- 在BESIII上用量子支持向量机“再发现”  $Z_c(3900)$  (丁彪等, EPJ Web Conf. 295 (2024) 12008 →正在更新 丁彪\*, 孟召霞 [济南], 邹佳恒, 林韬, 李卫东, 大川英希 [高能所\*], 李腾, 黄性涛 [山大] 等)
- 开发量子Transformer应用 (A. Fadol, 沙其雨, 方亚泉, 大川英希 [高能所], 刘洋 [中山] 等)



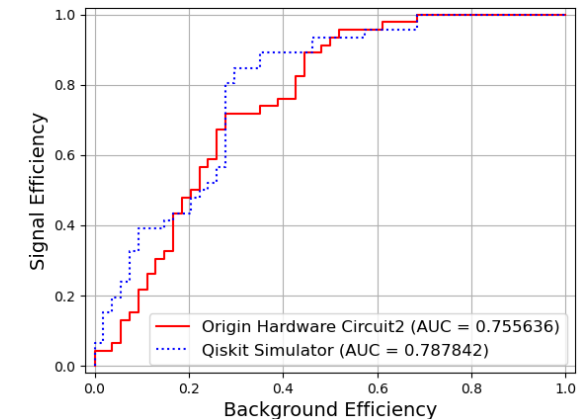
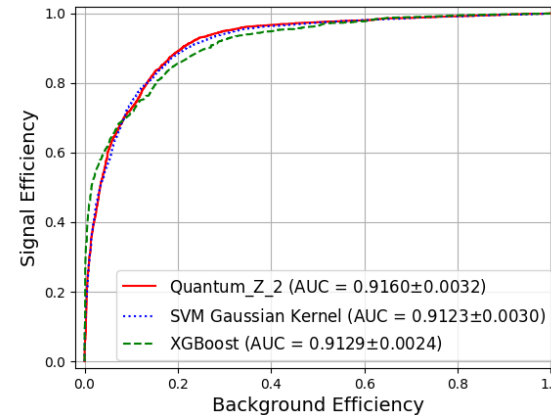
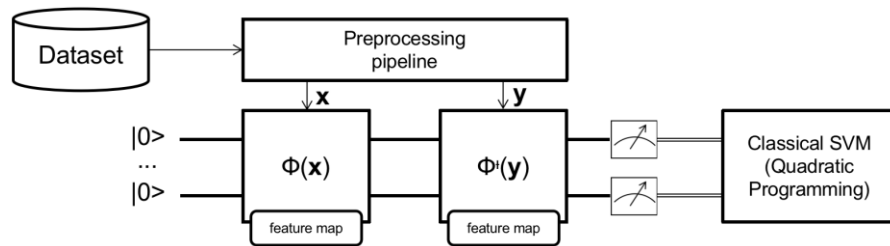
# 监督学习 - 粒子鉴别



## 变分量子分类器 (VQC)



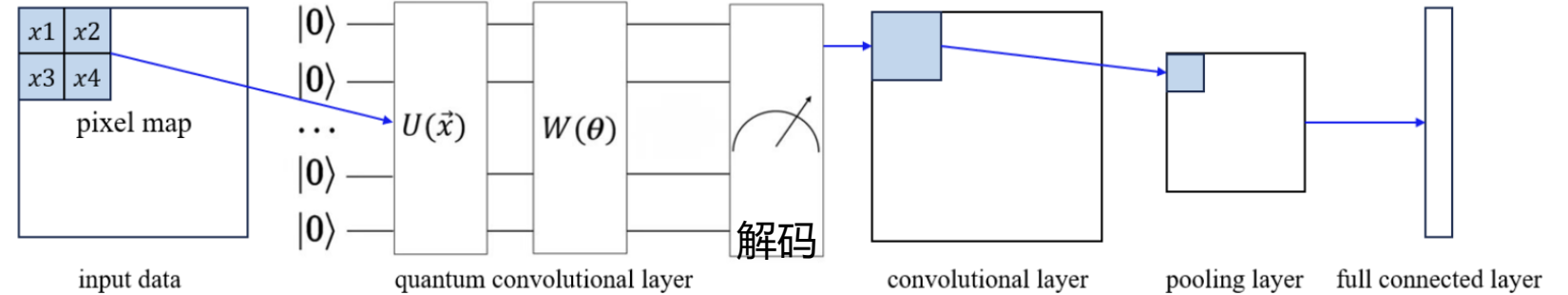
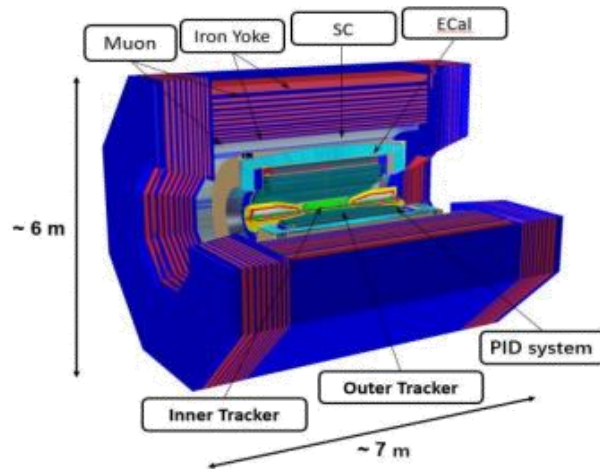
## 量子支持向量机 (QSVM)



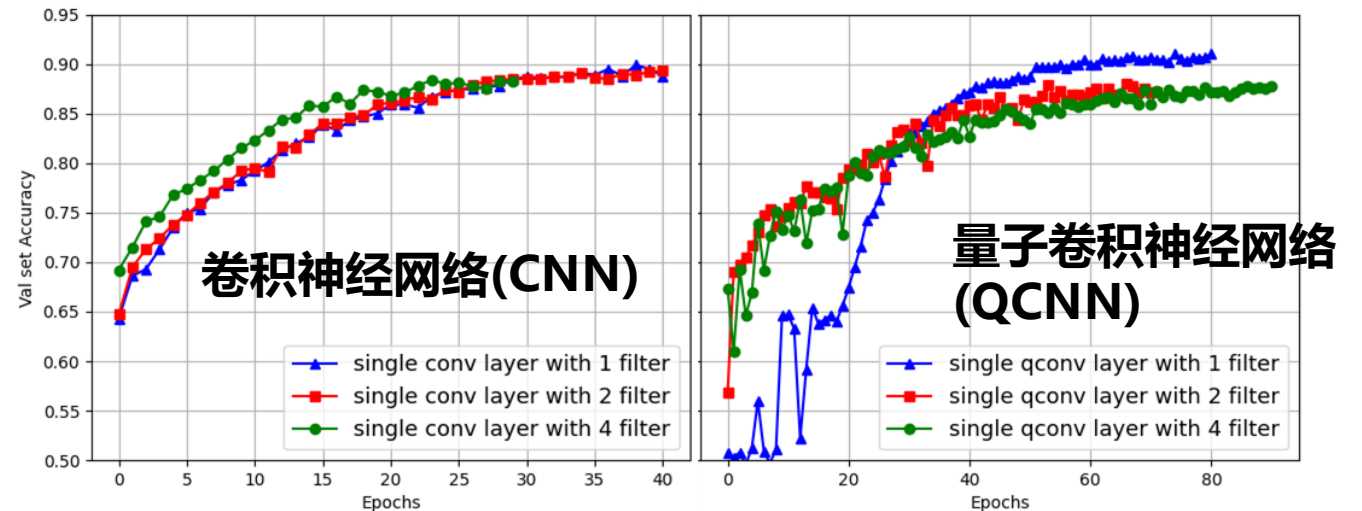
- 在BESIII实验用QSVM和VQC以识别 $\mu/\pi$ 粒子。深入研究量子线路设计, 优化参数。
- 真实量子计算机(本源悟源: 6量子比特)和量子模拟机的性能差不多。



# 监督学习 - 粒子鉴别



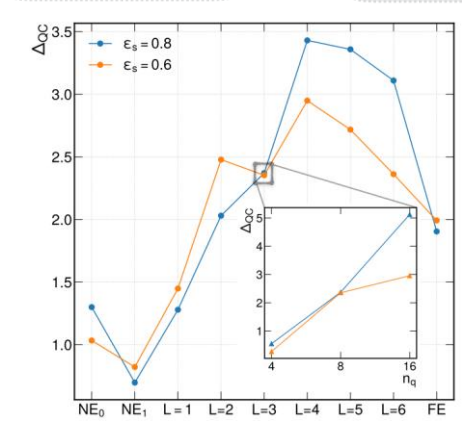
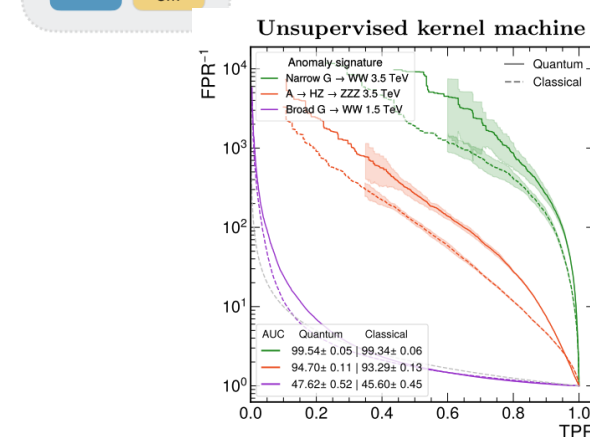
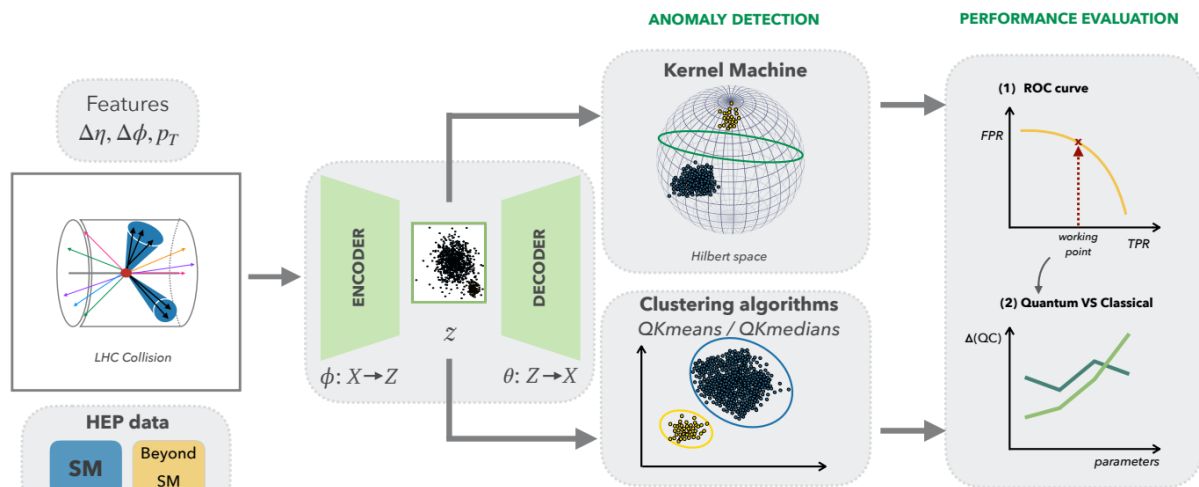
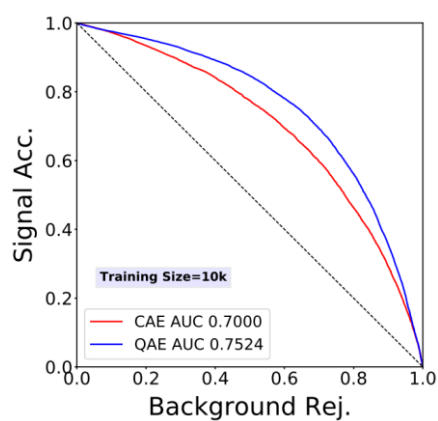
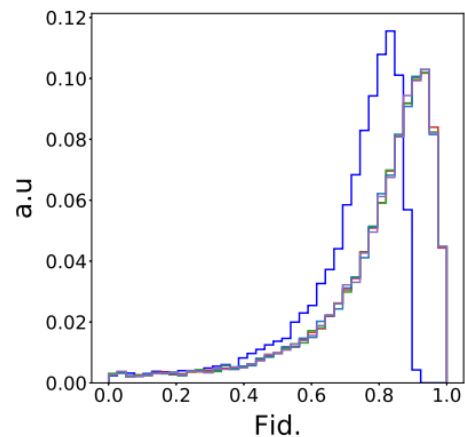
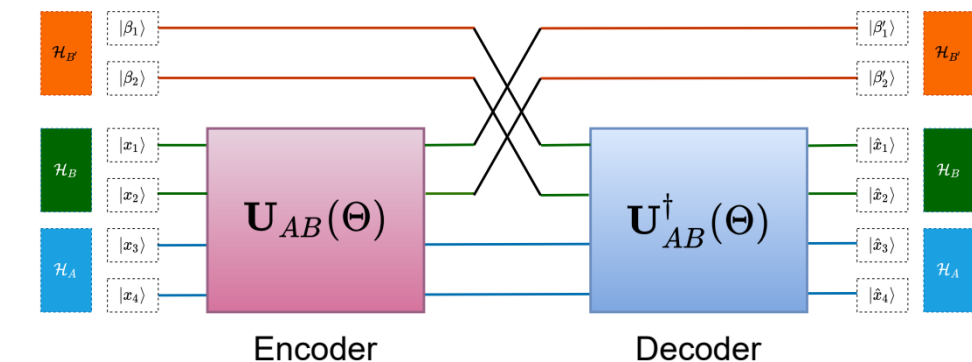
- 在超级陶粲装置(STCF)模拟中用**量子卷积神经网络(QCNN)**识别  $\pi/K$  粒子。
- 使用TensorFlow Quantum和Cirq量子模拟器平台。
- QCNN展现出与经典CNN相似的特征提取和学习能力



# 异常检测

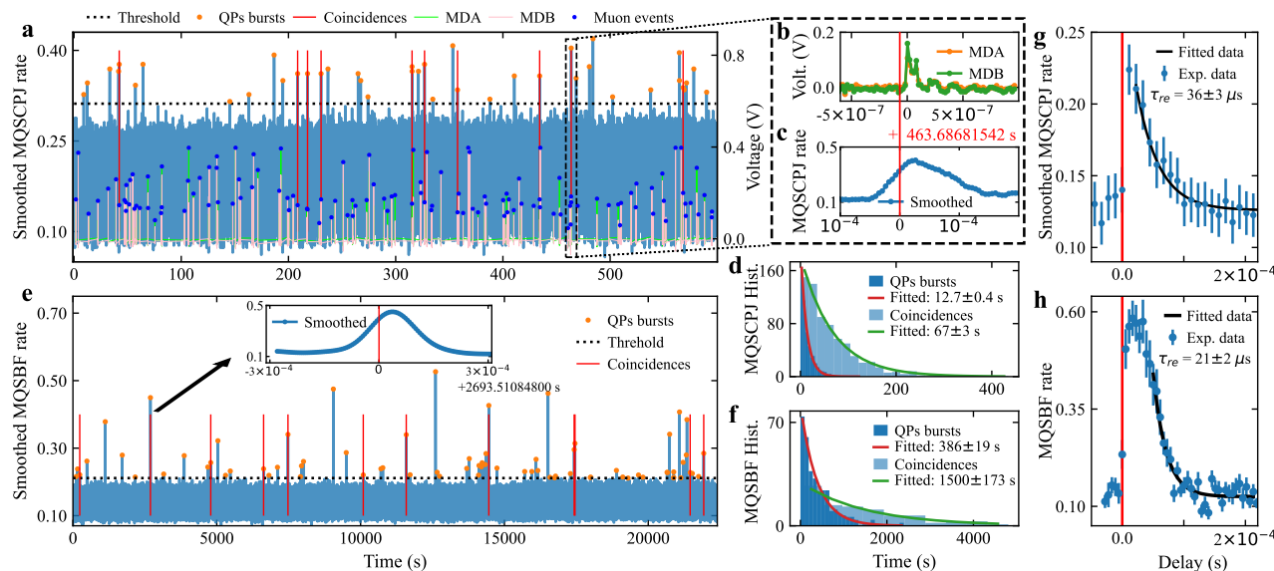
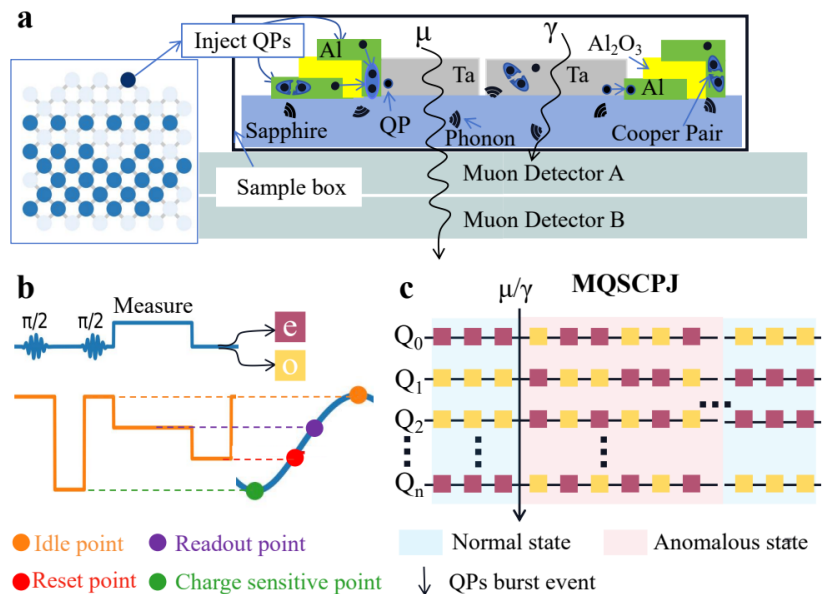
V.S. Ngairangbam, M. Spannowsky, M. Takeuchi, PRD 105, 095004 (2022)

A. Woźniak et al., 2301.10780 (2023)



- V.S. Ngairangbam等: 量子计算在小数据中, 学得很好。量子计算似乎获得了更好的信号显著性?
- A. Wozniak等 & Alvi等: 没看到这种倾向。经典异常检测仍然更好。 S. Alvi, C.W. Bauer, B. Nachman, JHEP02(2023)220
- C. Duffy等: 开发可扩展量子线路ansatz。超越了前人研究的性能。 C. Duffy, et al. arXiv:2407.07961

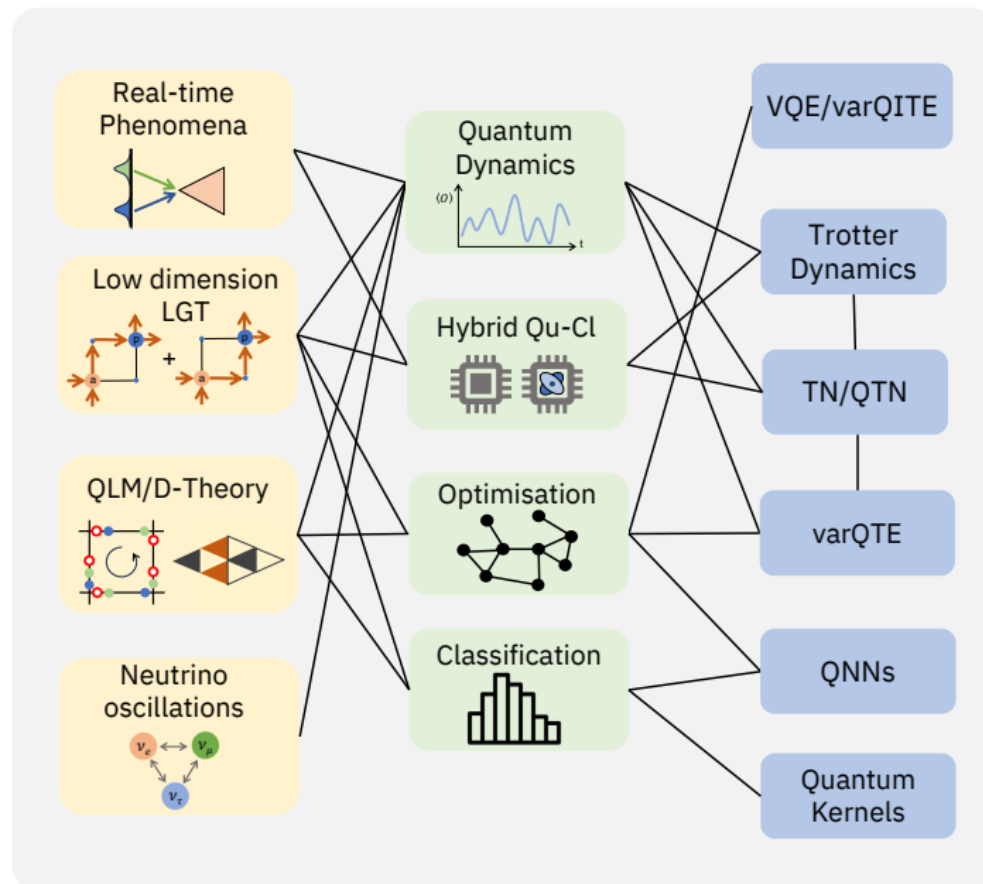
# 硬件研究：宇宙线对量子比特阵列噪音的影响



- **相关错误是量子纠错的严重瓶颈**，预计由辐射和宇宙线引起。先行研究: [M. McEwen, et al. Nat. Phys. 18, 107–111 \(2022\)](#), [J.M. Martinis, npj Quantum Inf 7, 90 \(2021\)](#)
- 北京量子院, 高能所, 物理所, 合肥微尺度国家研究中心, 南京师范大学合作**取得直接的证据并提出定量的测量!**
- 国外类似论文: [P.M. Harrington et al., arXiv:2402.03208](#), [B. Loer et al., arXiv:2403.01032](#), [G. Bratrud et al., arXiv:2405.04642](#).

# 理论方面的应用

这部分收到来自李英英和邢宏喜的报告启发



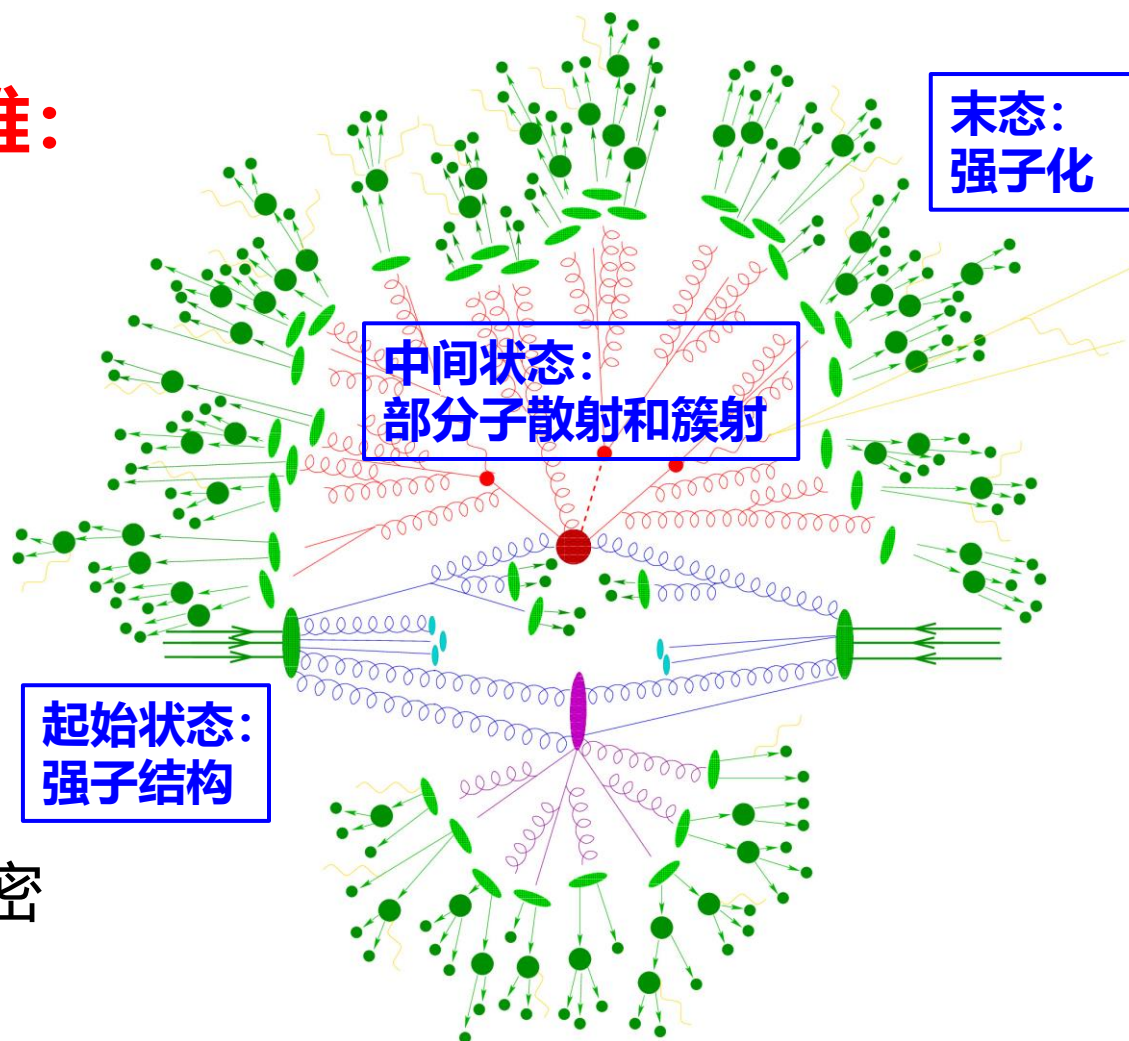
# 量子场论，高能量强子对撞

- **经典模拟高能量强子对撞非常难：**

- 不平衡
- 非微扰
- 高次的过程
- 量子干扰
- 格点QCD存在符号问题

- **量子模拟可能解决这种问题**

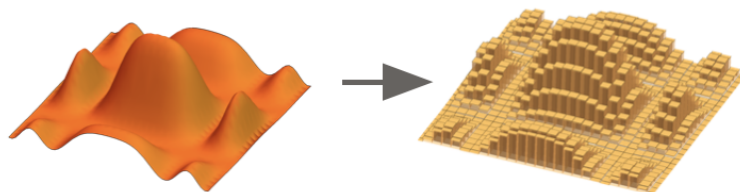
- 量子模拟：用量子计算机评价哈密顿量的时间演化



# 格点场论

建立高保真度格点场论的完整构建块至关重要。  
必须为以下所有组成部分制定算法。

空间离散化 Discretization



*KS Hamiltonian*

关于经典格点QCD:刘柳明  
[近物所]的大会报告

详见:李英英 [中科大]的  
分会报告

场的数字化 Digitization

$$|q\rangle^N \rightarrow |G\rangle$$

*truncation, discrete subgroup, ...*

初始化 Initialization

$$\mathcal{U} |G\rangle^L \rightarrow |\psi_0\rangle$$

*ground/thermal/particle state prep*

时间演化算符 Propagation

$$\mathcal{U} |\psi_0\rangle \rightarrow |\psi(t)\rangle$$

*Trotterization, variational approach,  
Taylor series, ...*

求值 Evaluation

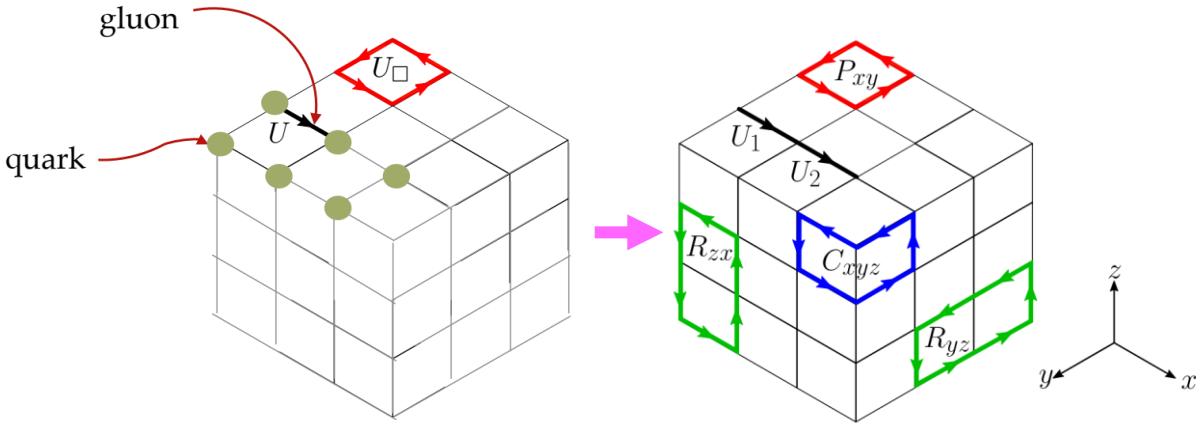
$$\langle \mathcal{O} \rangle$$

*Parton distribution  
function, particle decay, ...*

错误缓解 Error mitigation

李英英

# 格点场论 (空间离散化 & 时间演化技术)

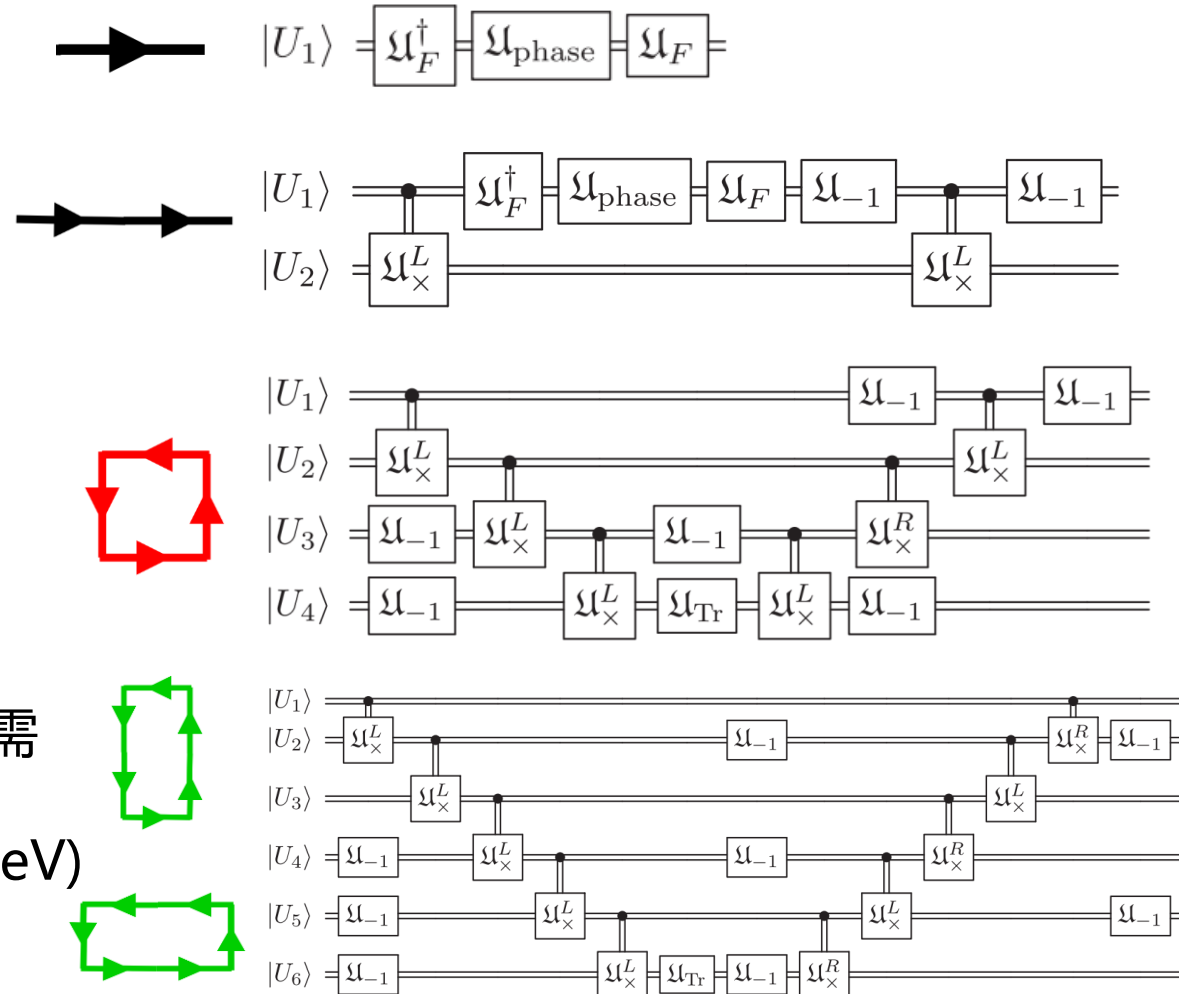


KS哈密顿量 PRD 11, 395 (1975) → 改进的哈密顿量

$$H_I = \sum ( \overset{\rightarrow}{\rule{0.5em}{0.4pt}} + \overset{\rightarrow}{\rule{1.5em}{0.4pt}} + \text{red loop} + \text{green loop} + \text{green loop} )$$

$K_L \quad K_{2L} \quad U_\square \quad R_\square \quad R_\square$

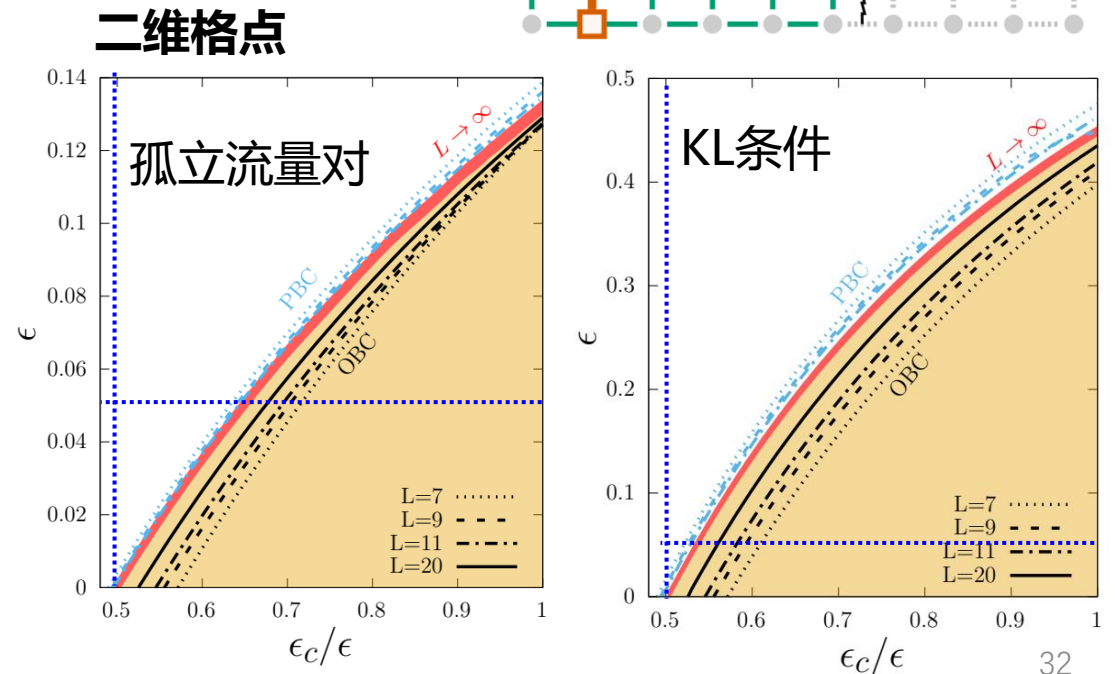
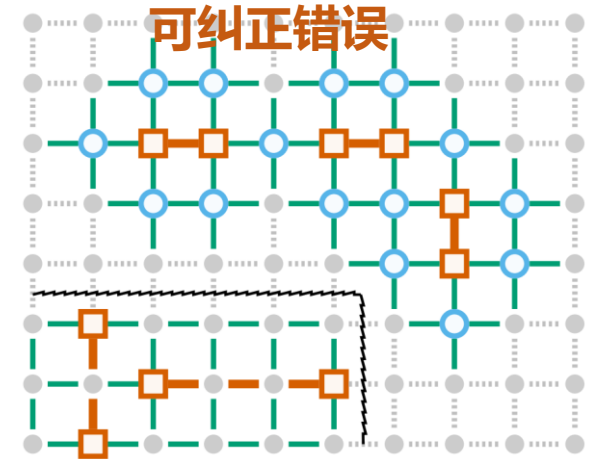
- 改进的哈密顿量将提高线路设计效率，减少所需的量子计算资源，并带来更小的离散化误差：  
 $n_{\text{qubits}} \sim 1000n_{g+q} \rightarrow 125n_{g+q}$  ( $E \sim 100-1000\text{MeV}$ )
- 可以将量子模拟的实现速度加速数年!**



# 格点场论 (场的数字化; 规范冗余 vs 规范固定)

- 有两类数字化方法: 1. 将通过规范变换连接的所有状态数字化为**规范冗余**, 2. 只数字化规范不变状态→**规范固定**

- 需要更多量子比特, 受到更多噪音的影响。但, 可以自然地缓解违反规范的错误。
  - 在近未来量子计算机中应用基于规范冗余带来的错误缓解将带来优势。
  - 相关论文: J.C. Halimeh et al., PR Res. 2, 033361 (2020); M.C. Tran et al., PRX QUANTUM 2, 010323 (2021) 等
- 简化了量子态的制备, 但使哈密顿量复杂化。而且, **没有自然的错误缓解方法**。

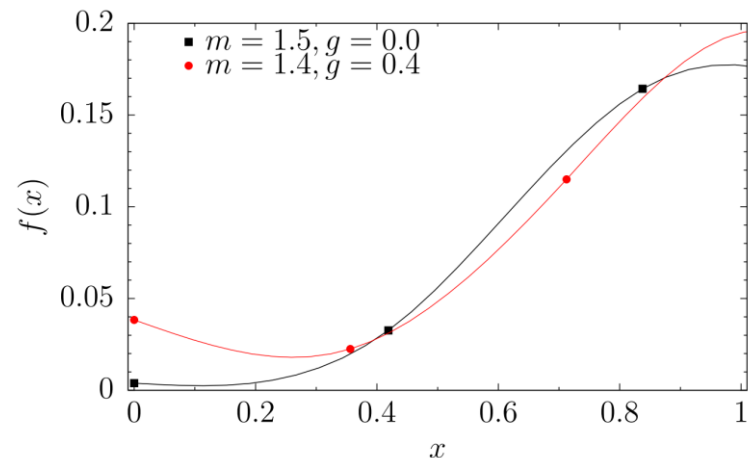




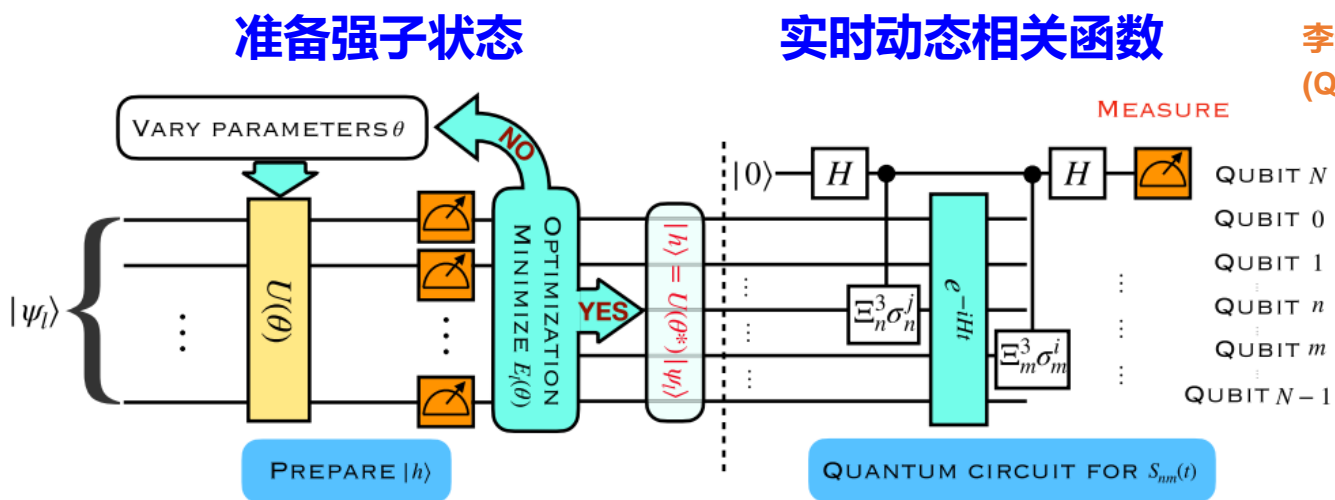
# 物理Benchmark: 起始状态, 部分子分布函数

- **H. Lamm等**: 在1+1Thirring模型中, 预测部分子分布函数和强子张量。建议从强子张量拟合中获得PDF。
- **李天胤等**: 在1+1Nambu-Jona-Lasinio模型中, 预测 $\pi^0$ 的夸克部分子分布函数。**量子模拟和经典方法(数值对角化)之间定性一致!**
- 其他方法: 全局拟合 (global fitting) [不是量子模拟]

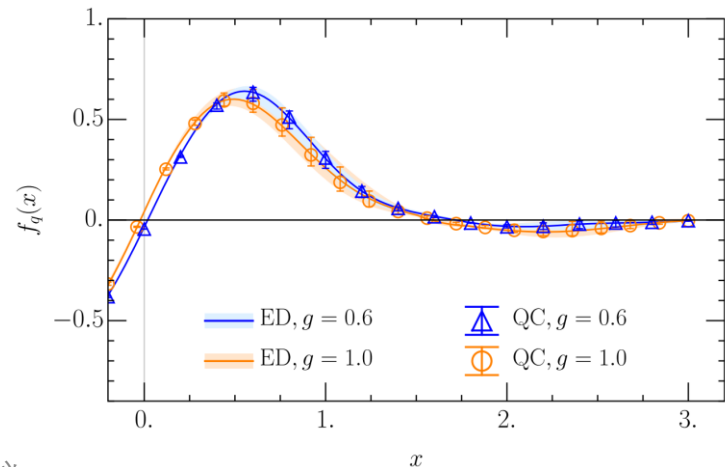
H. Lamm, S. Lawrence, Y. Yamauchi (NuQS Collaboration)  
PR Research 2, 013272 (2020)



A. Salinas, J. Cruz-Martinez, A.A. Alhajri, S. Carrazza, PRD 103, 034027 (2021)

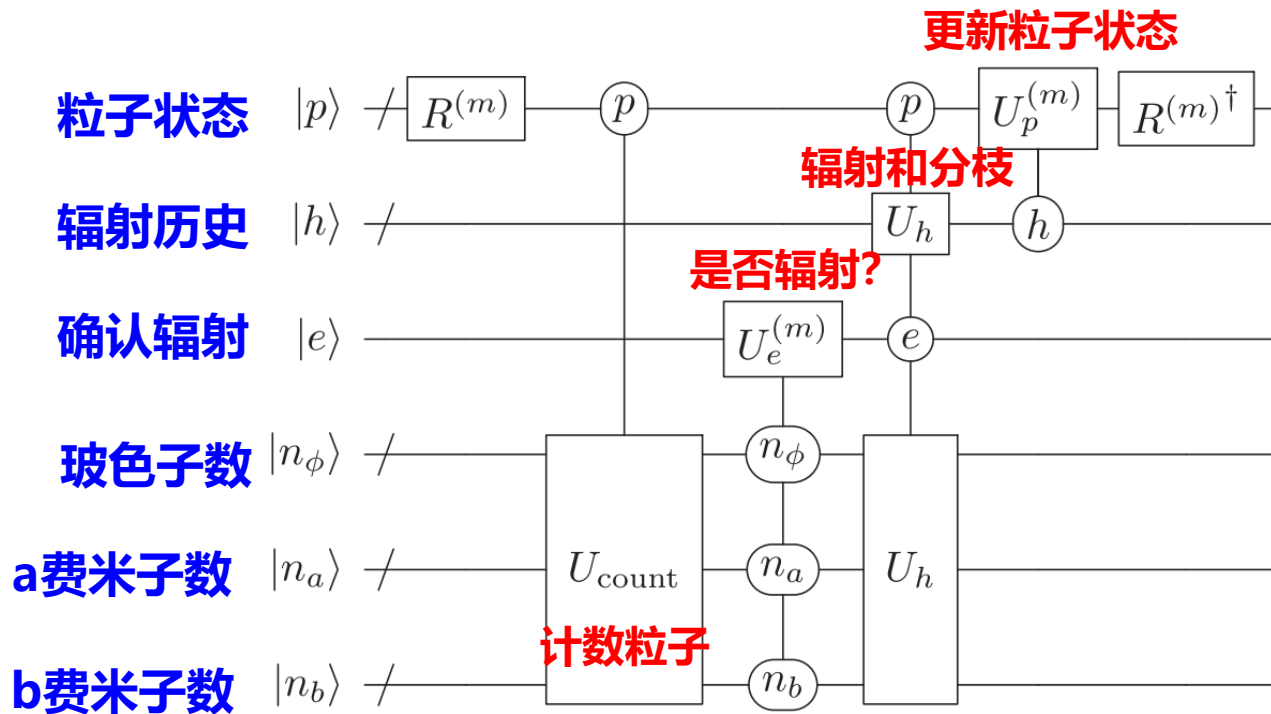


李天胤<sup>1</sup>, 郭星雨<sup>1</sup>, W.K. Lai<sup>1,2</sup>, 刘晓辉<sup>3,4</sup>, 王恩科<sup>1</sup>, 邢宏喜<sup>1</sup>, 张旦波<sup>1</sup>, 朱诗亮<sup>1</sup>  
(QuNu Collab.), PRD105 L111502 (2022) <sup>1</sup>华南师大, <sup>2</sup>UCLA, <sup>3</sup>北师大, <sup>4</sup>北大



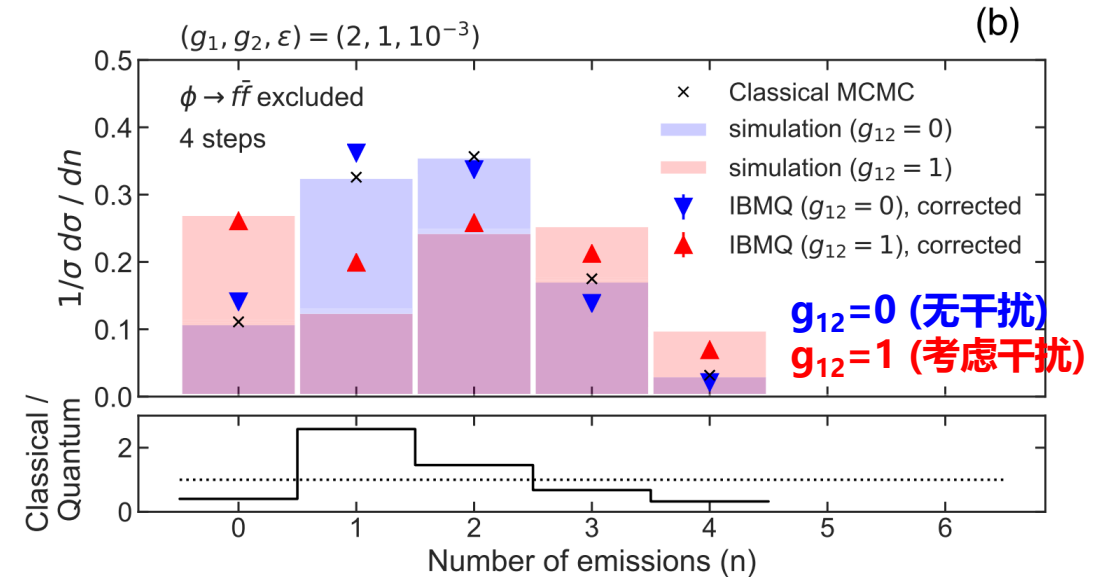
详见: 曹庆宏  
[北大]的  
分会报告

# 物理Benchmark: 中间状态, 部分子簇射



简化Lagrangian (两个费米子, 一个标量玻色子, 二维辐射)

$$\mathcal{L} = \bar{f}_1(i\not{\partial} + m_1)f_1 + \bar{f}_2(i\not{\partial} + m_2)f_2 + (\partial_\mu\phi)^2 + g_1\bar{f}_1f_1\phi + g_2\bar{f}_2f_2\phi + g_{12}[\bar{f}_1f_2 + \bar{f}_2f_1]\phi.$$

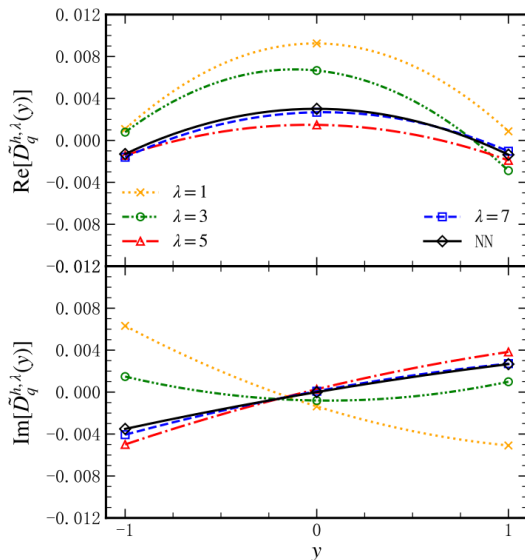
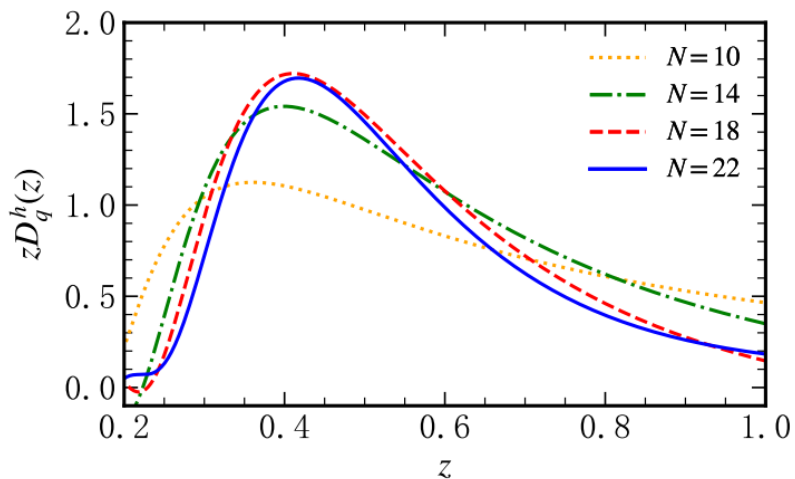


- 成功运行简化Lagrangian的部分子簇射。
- 量子计算能在多项式时间内计算粒子间的干扰效应。辐射粒子数  $> O(10)$  的时候, 预期获得量子超越。
- 类似研究: 量子游走

G. Gustafson, S. Prestel, M. Spannowsky, S. Williams, JHEP11(2022)035; K. Bepari, S. Malik, M. Spannowsky, S. Williams, PRD 103 (2021) 076020 & PRD 106 (2022) 056002

# 物理Benchmark: 末态, 夸克碎裂 & 强子化

## 夸克碎裂



李天胤, 邢宏喜, 张旦波 [华南师大] (QuNu), arXiv:2406.05683

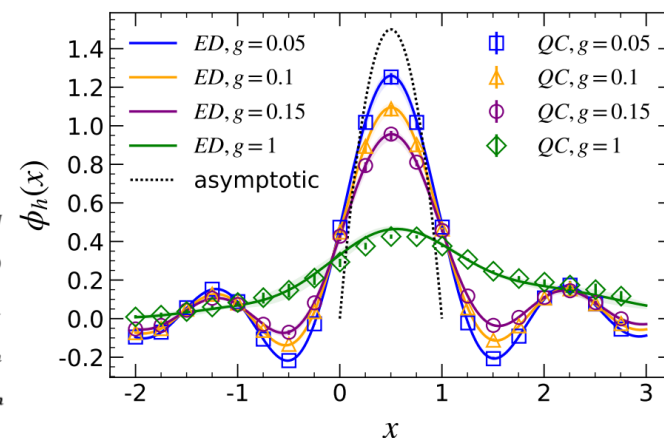
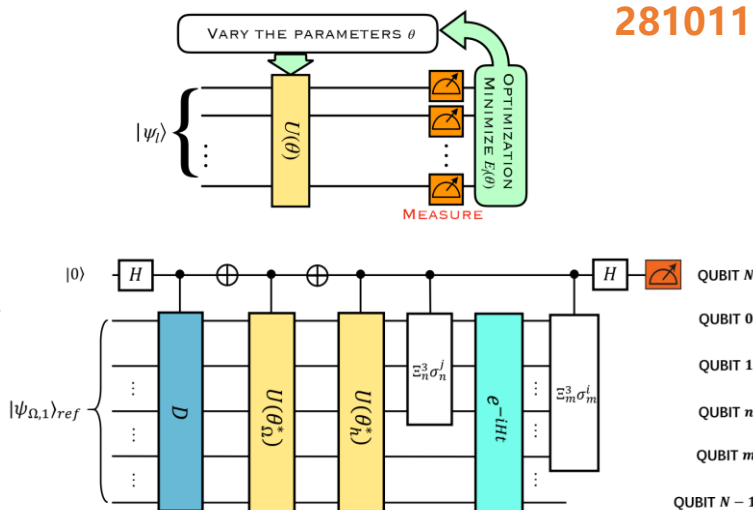
- 为单味Nambu-Jona-Lasinio模型开发了量子算法。
- 与提取夸克碎裂函数的定性一致性。
- 还提出了错误缓解技术。

李天胤<sup>1</sup>, 郭星雨<sup>1</sup>, W.K. Lai<sup>1,2</sup>, 刘晓辉<sup>3,4</sup>, 王恩科<sup>1</sup>, 邢宏喜<sup>1</sup>, 张旦波<sup>1</sup>, 朱诗亮<sup>1</sup> Li et al (QuNu), SCPMA 66 (2023) 8, 281011 <sup>1</sup>华南师大, <sup>2</sup>UCLA, <sup>3</sup>北师大, <sup>4</sup>北大

## 强子化

- 光锥分布振幅 (LCDAs) 描述了束缚态的非微扰方面。
- 提出了计算LCDA的量子算法; **与经典结果非常一致。**

大川英希

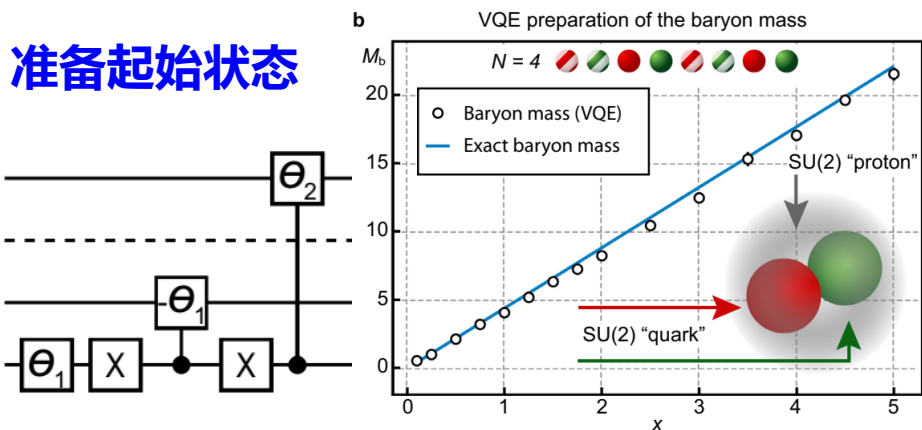


# 其他亮点

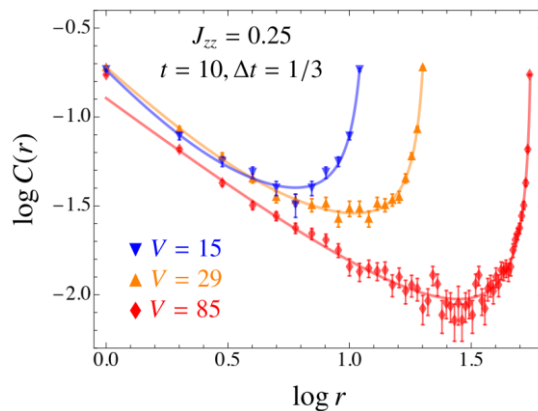
(1+1)D Sphaleron模型: 黄旻[高能所]的分会报告

Y. Atas et al., Nat. Comm. 12 (2021) 6499

准备起始状态

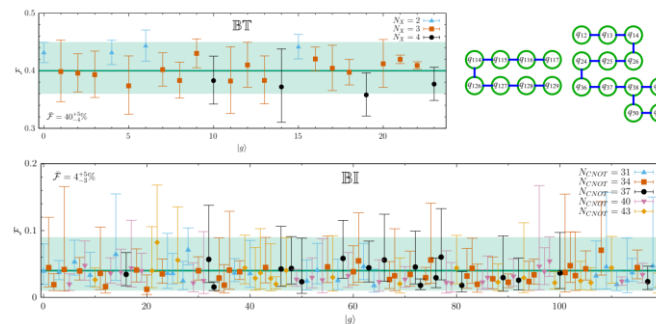


格点全息术 李英英[中科大]等, arXiv:2312.10544



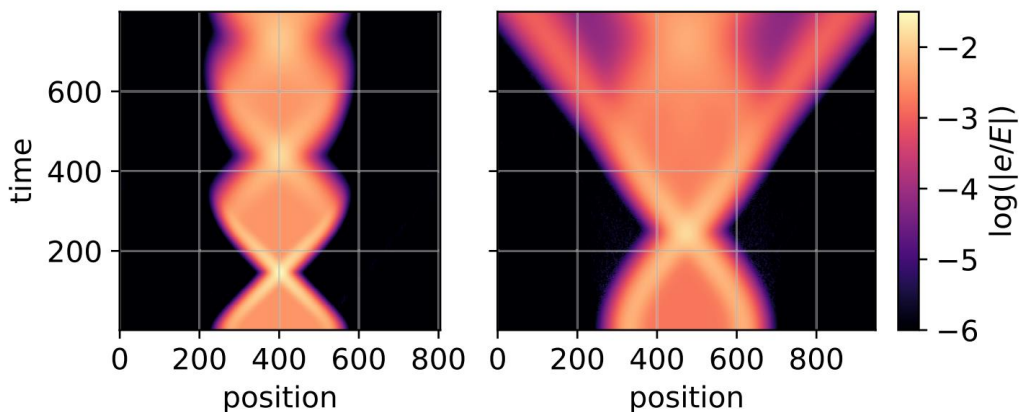
映射离散子群

H. Lamm, 李英英[中科大], 舒菁[北大]等 arXiv:2405.12890



模拟碰撞

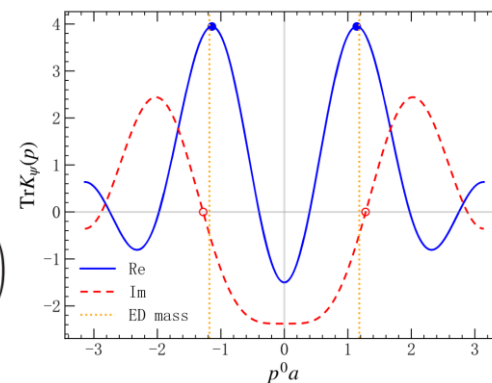
A. Milsted et al., PRX QUANTUM 3, 020316 (2022)



李天胤<sup>1</sup>, Wai Kin Lai<sup>1,2</sup>, 王恩科<sup>1</sup>, 邢宏喜<sup>1</sup> (QuNu Collab.) PRD 109, 036025 (2024) <sup>1</sup>华南师大, <sup>2</sup>UCLA

LSZ约化公式

$$i\mathcal{M} = R^{n/2} \lim_{\substack{p_i^2 \rightarrow m^2 \\ k_j^2 \rightarrow m^2}} G(\{p_i\}, \{k_j\}) \times \left( \prod_{r=1}^{n_{\text{out}}} K^{-1}(p_r) \right) \left( \prod_{s=1}^{n_{\text{in}}} K^{-1}(k_s) \right)$$



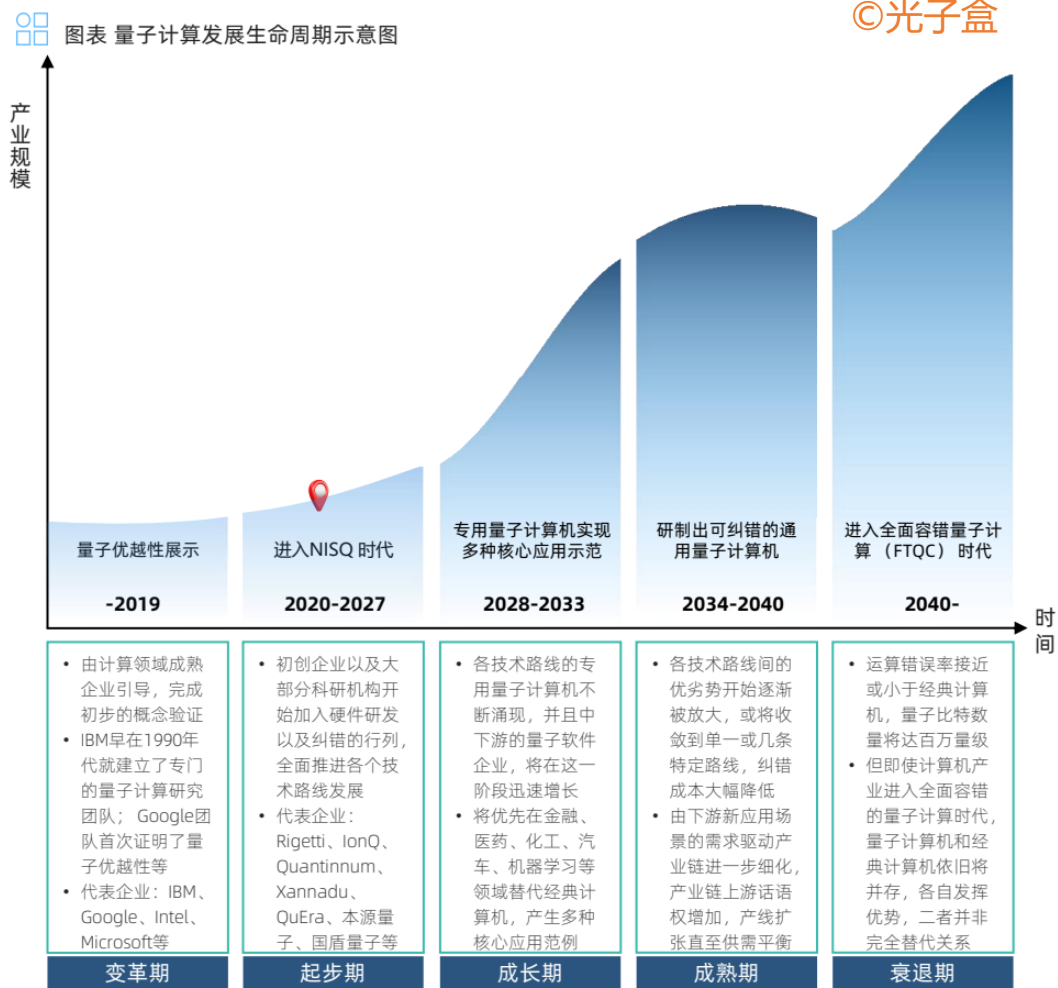
# 未来展望



©量子客


# 量子门计算机的未来展望

- 现在是中等规模带噪声的量子计算机(NISQ)时代
- 容错量子计算机(量子纠错)
  - 超导计算机要约100万量子比特(可能更少)。2030年前可能达到?
  - 离子阱: 2020年首次展示容错量子计算机(13量子比特)。对于纠错, 离子阱比超导需要更少的量子比特(约13:1 vs  $O(10^{3\sim6}):1$ )。
- 3-5年内: NISQ和错误缓解(error mitigation)时代, 容错量子计算机的起步期
- 5年后:  $>O(10^6)$ 量子比特? 可能是容错量子计算机时代
- 形势变化迅速, 难以预测未来。关注最新情况并将其应用于研究很重要



# 总结

- 量子计算机是(近?)未来的计算机。应用领域多种多样。
- 量子计算面临非常激烈的全球竞争，中国占据领先地位。
- 在高能物理应用的方面，许多国外的实验室和大学建立量子技术研究中心。
- 中国高能物理也在积极启动量子计算应用研究！
- 量子机器学习还没有进入实践阶段，但量子启发算法已经开始提供创新！这两种类型的研究都必须进行。
- 量子模拟的重要基础正在建立。
- 请期待进展！



**感谢聆听!**