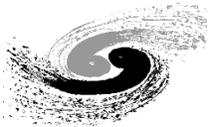


Quantum Computing Platform for High Energy Physics

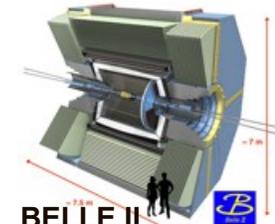
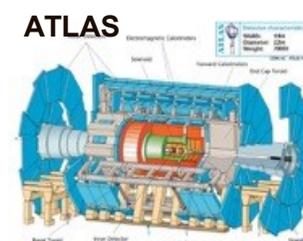
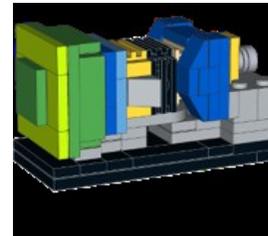
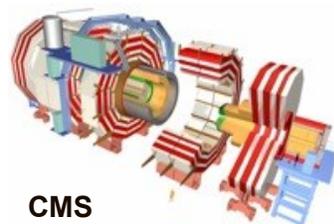
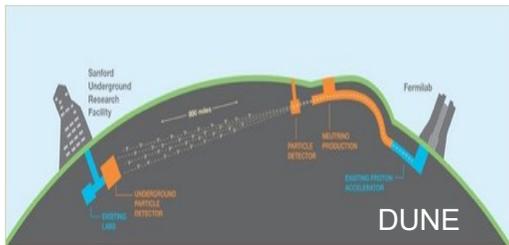
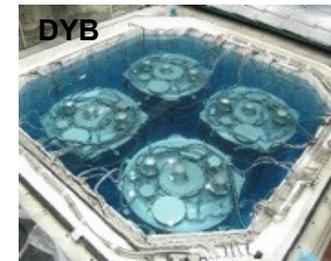
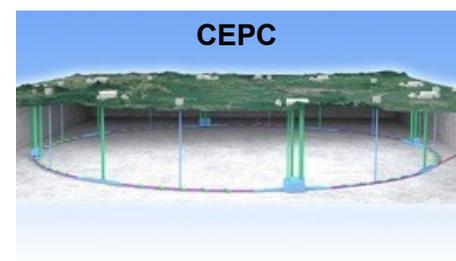
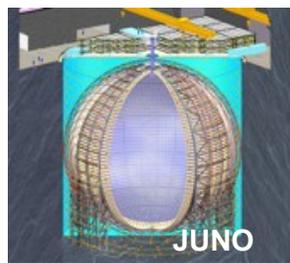
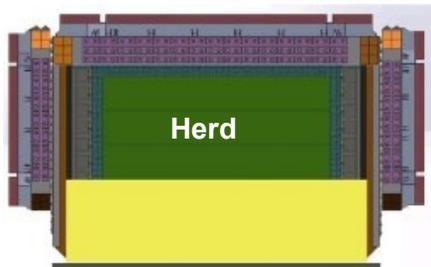
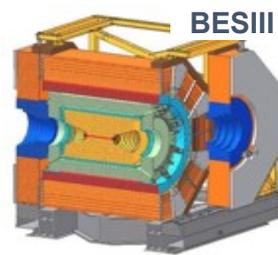
毕玉江(中国科学院高能物理研究所)

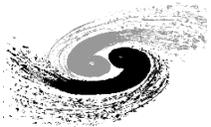
中国格点QCD第一届年会 2021-10



高能所高能物理实验

- 大科学工程为主体的研究单位
- 主持了国内很多大型实验和装置
 - BESIII、LHAASO、JUNO、CSNS等
- 参与了很多国际高能物理实验
 - AMS、DUNE、CMS、LHCb、ATLAS、BELLEII等
- 广泛的理论物理研究
 - 格点QCD、强子物理、中微子、弦理论、宇宙学等





高能物理实验数据分析挑战

• 高能物理实验特点

- 数据量大，存储、计算资源需求大

• BEPCII & BESIII

- 5年累积数据>5PB的数据

• LHAASO高海拔宇宙线实验

- 每年6PB的原始数据*20年

• JUNO江门中微子实验

- 每年1PB的原始数据*10年

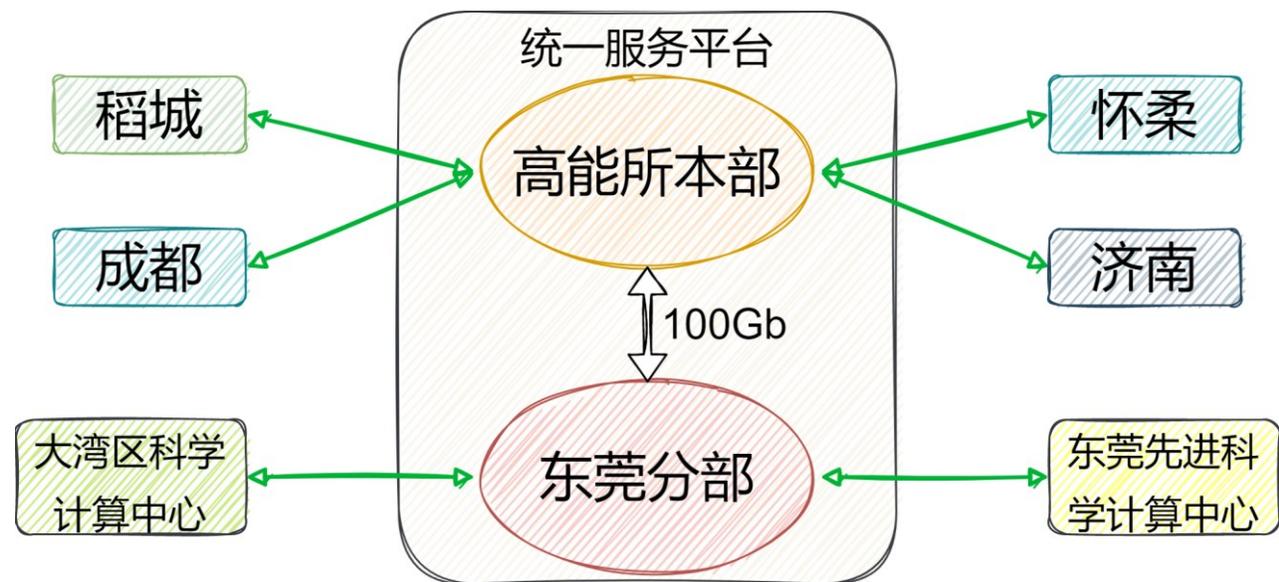
• CSNS 东莞散裂中子源

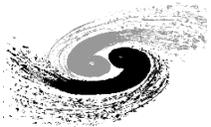
- **每年 10 PB/年**

• 北方光源HEPS

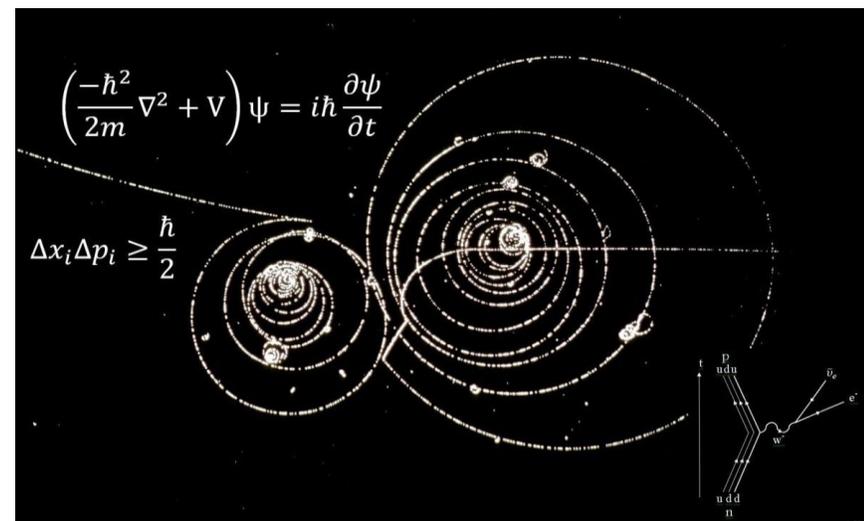
- 预计150PB/年原始数据

• 格点QCD 对计算资源的需求更大，要求更高

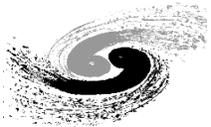




- 经典计算机性能已非常强大
 - CPU, GPU, FPGA等设备性能已经非常高
 - 制造工艺仍在不断发展, 仍有提升空间
 - 超级计算机已经达到百Pflops乃至Eflops量级
 - E级机: 广州天河三号和无锡神威“太湖之光”
- 但经典计算机也是有限制的
 - 制造工艺会有物理极限, 计算性能提升也有限制
 - 很多物理问题难以在有限时间内通过经典计算机解决
- 解决方法
 - 堆积物理硬件, 提高整体计算能力(?)
 - 寻找目标问题的多项式解决算法(?)
 - 采用新原理, 设计新计算架构和硬件

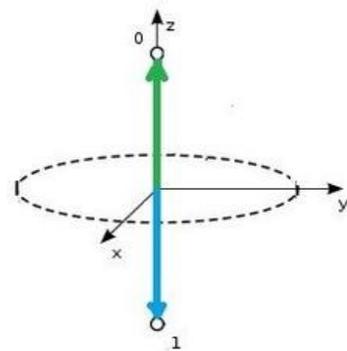


量子计算机???

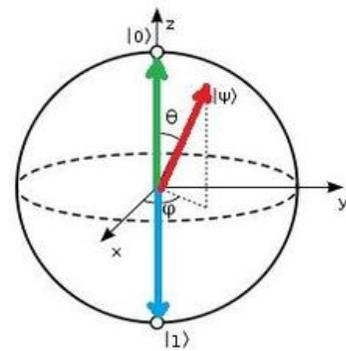


• 经典比特(bit)与量子比特(qubit)

- 经典比特: 0或1两个态
- 量子比特: $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 两个态的组合态 $|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$
 - $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 可以理解为电子的两个上下自旋态
 - α, β 是满足 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 的任意复数
- 量子比特包含了比经典比特更多的信息



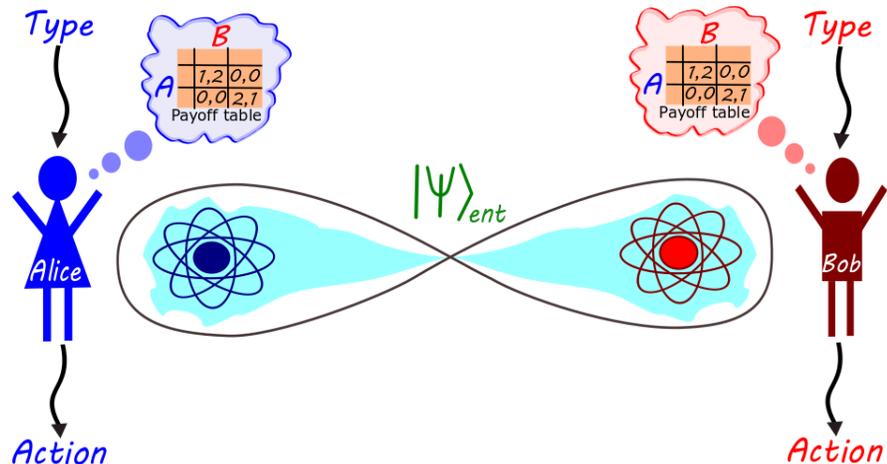
比特 (bit)

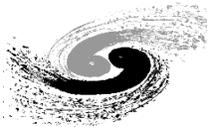


量子比特 (qubit)

• 量子比特特性

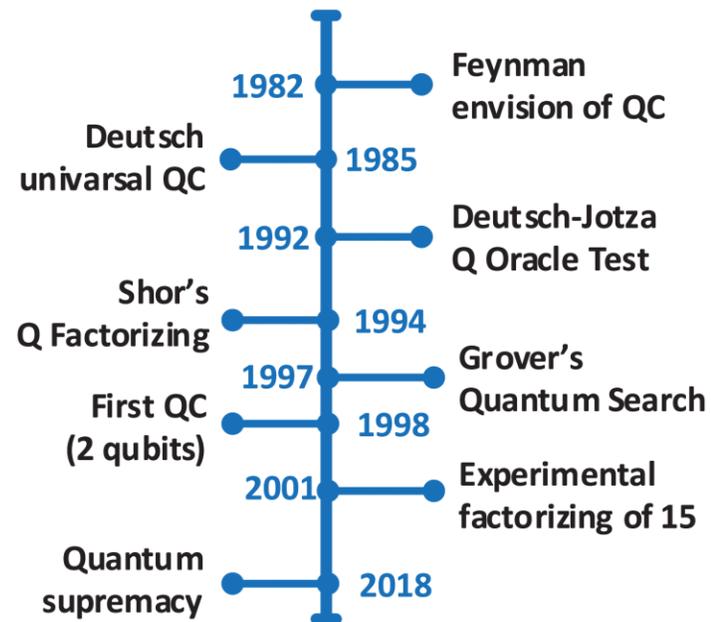
- 量子叠加(superposition): 量子比特处于 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 两个态的叠加状态
- 量子纠缠(entanglement): 两个(及以上)量子比特可以纠缠在一起
 - $|\varphi_1\varphi_2\rangle = \alpha|00\rangle + \beta|11\rangle, |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$
 - 测量 φ_1 若为 $|0\rangle$, 则 φ_2 也为 $|0\rangle$; φ_1 若为 $|1\rangle$, φ_2 也为 $|1\rangle$
- 量子叠加和量子纠缠是量子系统独有的
 - 也是量子计算能够远超经典计算机计算能力的原因





量子计算机

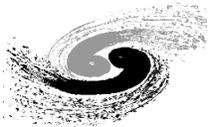
- 由量子力学驱动进行数学和逻辑运算、存储及处理量子信息的物理装置
 - 具有悠久的历史了
 - R. Feynman 在1980s年代提出了用量子系统来模拟量子物理过程的设想
 - Deutsch后又提出了量子图灵机的概念、形成了量子计算的数据基本形式
 - P. Shor 提出了大数质因数分解的量子算法，开启了量子计算新阶段
 - D-Wave 于2011年 发布了 128 qubits(16有效 qubis)的 商用量子计算机 D-Wave One
 - Google 2018年通过72-qubit 量子处理器宣称实现了量子霸权
 -



量子计算至少在某些问题上比传统计算机更快，或传统计算机无法实现

- 大数分解(RSA)
- 量子搜索算法
- 量子机器学习
-

核心算法	算法名称	算法应用	相比传统算法优势	潜在应用领域
量子傅立叶变换	Shor's 算法	破解RSA加密	指数加速	密码学 相位估计 子群搜寻
	HHL算法	矩阵求逆	指数加速	机器学习
Grover's算符	Grover's算法	搜索问题	平方根加速	无序搜索
古典量子混合计算	VQE	本征值求解	在化学分子有指数型加速	量子化学 量子金融 高能物理 最优化问题
	QAOA	最大割问题		
量子退火	QAA	本征值求解	可有效求解大矩阵最小本征值	机器学习 高能物理 量子金融 最优化问题



量子计算模型实现

各种量子计算模型本质是等价的

量子电路(Quantum Circuit)

- 目前常用的通用计算模型, 与传统电路类似, 使用的是量子门

绝热量子计算机(Adiabatic quantum computer)

- 基于量子退火算法, 非通用的量子计算
- 主要用于二次无约束二进制优化问题(QUBO):

$$H_P = \sum_{i=1}^L h_i \sigma_i^Z + \sum_{i<j}^L J_{ij} \sigma_i^Z \sigma_j^Z$$

拓扑量子计算机(Topological quantum computer)

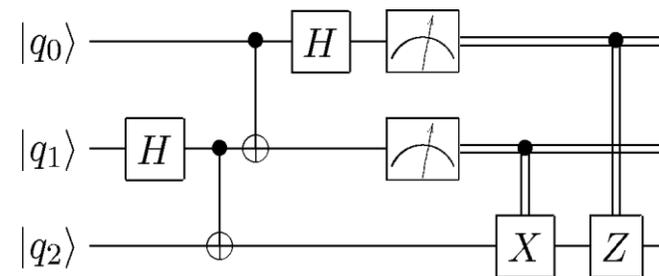
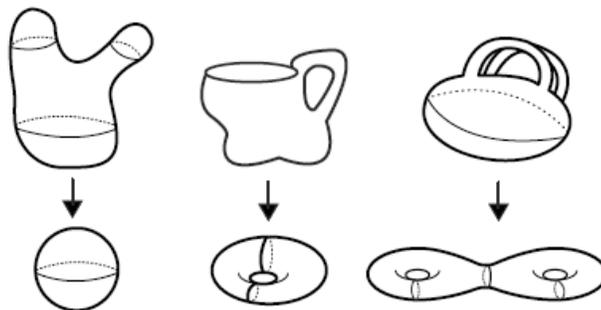
- 利用多体系统中的拓扑量子态来存储和操控量子信息
- 马约拉纳费米子是一种理想的拓扑量子计算实现方式

单次量子计算机(One-way quantum computer)

- 测量制备好的纠缠态, 测量后, 纠缠态即被销毁

量子图灵机(Quantum Turing Machine)

- 主要有理论研究意义, 实际很难制备



Operator	Gate(s)	Matrix
Pauli-X (X)	\oplus	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
Pauli-Y (Y)		$\begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}$
Pauli-Z (Z)		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$
Hadamard (H)		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$
Phase (S, P)		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$
$\pi/8$ (T)		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{bmatrix}$
Controlled Not (CNOT, CX)		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$
Controlled Z (CZ)		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$
SWAP		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Toffoli (CCNOT, CCX, TOFF)		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

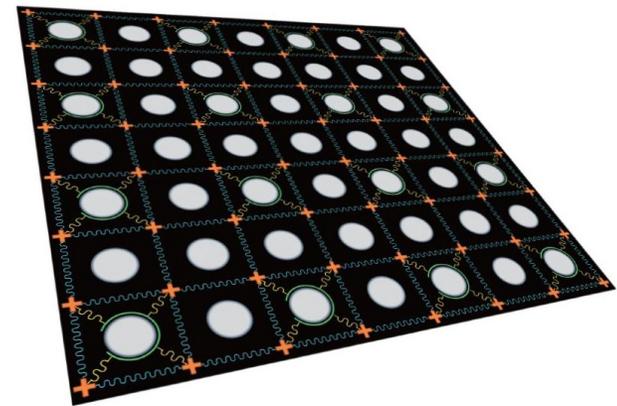


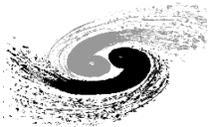
国际上的量子计算机

- **D-Wave**
 - 采用量子退火模型，超导量子技术
 - D-Wave 2000/2000Q: 2015年发布，1000/2048位 qubit
 - D-Wave Advantage: 2020年发布，5000+ qubit
- **IBM**
 - IBM QV64 Hummingbird 芯片，65个 qubit
 - 计划2023年提供1000-qubit的量子计算机
- **Google**
 - 主要使用超导量子技术
 - 2018年推出72-qubit 处理器 Bristlecone
 - 2019年推出新型的 54-qubit 处理器 Sycamore
- **Honeywell**
 - 主要使用离子阱技术
 - 2020年发布了10 qubit/128量子体积的 H0 量子计算机
 - 2021年发布了**512**量子体积的 H1量子计算机
- **IONO**
 - 2019年实现11 qubit，2020年宣称实现了32 qubit
 - 宣称**可在室温下工作**
-

国内的量子计算机

- **本源量子计算**
 - 第一台工程化6 qubit超导量子计算机 “悟源”
- **中科院量子信息与量子科技创新研究院**
 - 12量子比特的超导量子计算机(济南)
- **中科院物理所**
 - 10 qubit 超导量子计算机
- **中国科学技术大学**
 - 76/113 qubit的 “九章” 1号/2号光量子计算机
 - 62/66 qubit的 “祖冲之” 1号/2号超导量子计算机
-





- 已有很多应用尝试，主要是量子机器学习

- 粒子鉴别

- Higgs 粒子优化问题 [10.1038/nature24047](https://doi.org/10.1038/nature24047)

Quantum Algorithm for High Energy Physics Simulations

Benjamin Nachman^{1,*}, Davide Provasoli^{1,†}, Wibe A. de Jong^{2,§} and Christian W. Bauer^{1,‡}

- 粒子分类

- 量子受限波尔兹曼机进行宇宙线分类 (D-Wave, QUBO)
- 量子支持向量机进行粒子分类
- 双光子事例分类

Quantum machine learning in high energy physics

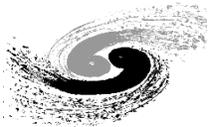
Wen Guan¹, Gabriel Perdue², Arthur Pesah³, Maria Schuld⁴, Koji Terashi⁵, Sofia Vallecorsa⁶ and Jean-Roch Vlimant⁷

- 径迹重建

- 使用量子算法进行粒子径迹重建 [EPJ Web Conf., 245 \(2020\) 09013 , CHEP2019](https://arxiv.org/abs/2005.03791)
- 适用于径迹模式识别的量子退火算法 [EPJ Web Conf. 245 \(2020\) 10006](https://arxiv.org/abs/2005.03791)
- 使用量子图神经网络进行粒子径迹重建 [10.5281/zenodo.4088474,2020](https://arxiv.org/abs/2005.03791)

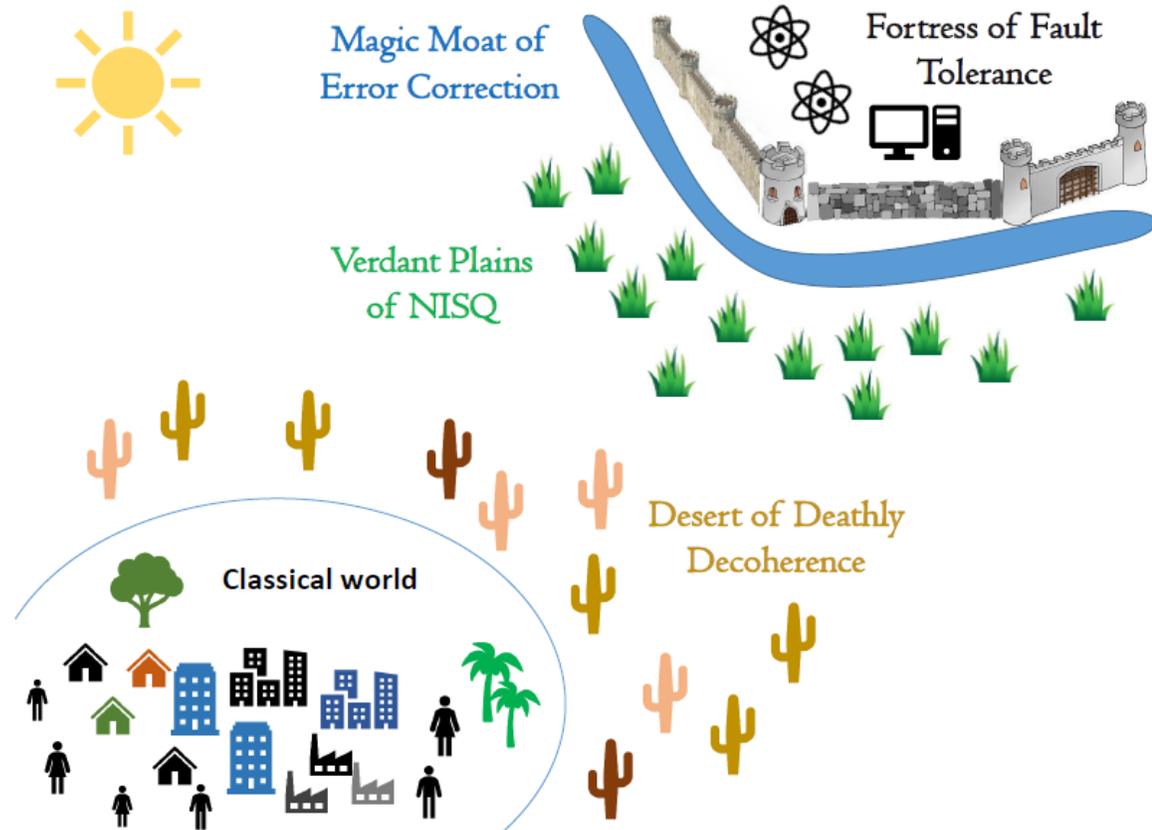
- 格点QCD

- Lattice Gauge Theory for a Quantum Computer[[PoS\(LATTICE2019\)112](https://arxiv.org/abs/2005.03791)]
- Simulating lattice gauge theories within quantum technologies[[Eur. Phys. J. D \(2020\) 74: 165](https://arxiv.org/abs/2005.03791)]
- The Power of Adiabatic Quantum Computation with No Sign Problem[arXiv:2005.03791v1]
- Quantum Simulations of the Non-Unitary Time Evolution and Applications to Neutral-Kaon Oscillations[arXiv:2105.04765]



当前量子计算机的局限性

- 量子计算机制造、操作复杂
 - 超低温，成本高，一般只在实验室中，比较难接触到
- 可用的有效量子比特少
 - 一般10-70，全纠缠量子比特更少
- 物理量子计算原型机少
 - 部分量子计算机如D-Wave等公司使用受限
- 退相干时间短
 - 可执行的量子门数量受限
 - 需要超低温，延长退相干时间
- 量子噪声影响无法消除
 - 影响退相干时间，引起量子相位错误
- 量子纠错能力弱
 - 处于 Noisy Intermediate-Scale Quantum(NISQ) 阶段
- 算法编程相对复杂
 - 部分硬件可编程性不足，编程环境等不完善

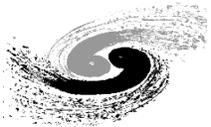


仍处于研究阶段，离实用还有很长时间



- 在物理量子计算原型机上进行开发
 - 资源少，可编程性不足，准确度、稳定性不足
 - 不方便进行量子算法快速调试
- 使用经典计算机来模拟量子计算
 - 量子比特、量子门和量子测量算符可以用复向量、复矩阵表示
 - 量子线路计算过程就是一系列复矩阵的矩阵运算
 - 量子退火计算本质上也是求解复矩阵本征值
- 量子编程IDE
 - 减少量子程序编程开发困难
- 量子计算机实现途径多
 - 需要专门的编译器把量子程序编译成量子机器可识别的指令

量子计算开发框架

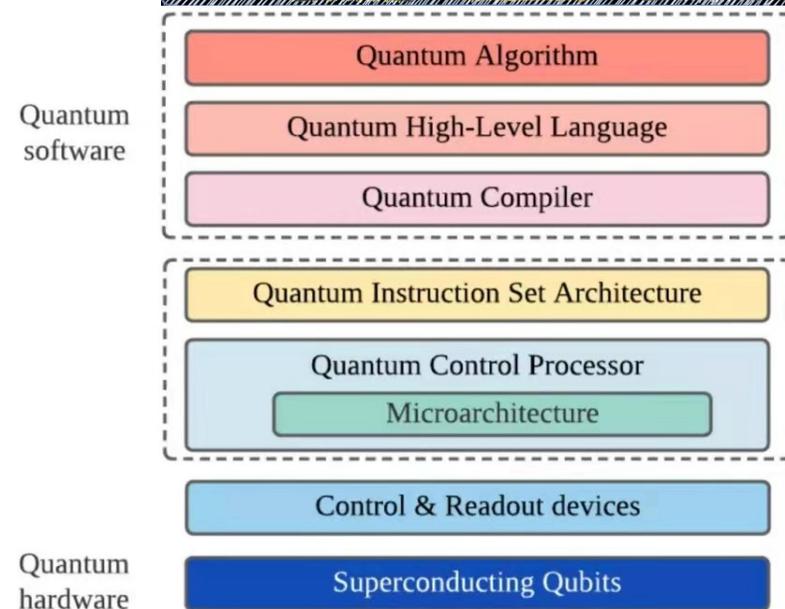
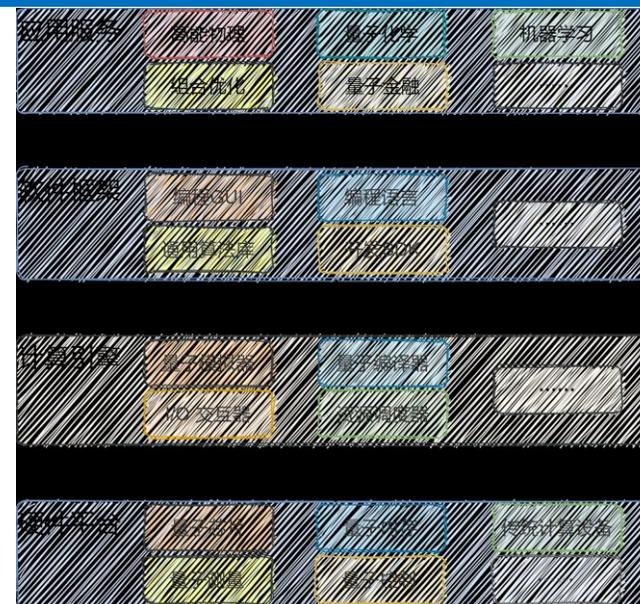


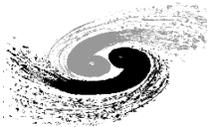
量子计算开发框架

- 量子计算硬件基础
 - 量子硬件设备和传统计算设备
- 量子计算软件基础
 - 模拟器、编译器、I/O交互接口
 - 计算资源调度器
- 量子计算开发框架
 - 可视化的编程界面，集成的通用量子算法
 - 专门用于量子编程的高级语言等
- 量子计算实际应用
 - 高能物理、量子化学、机器学习、量子金融



以云计算方式提供量子计算服务





量子计算开发云平台



• IBM Quantum

- 可视化的用户编程界面, 提供了量子模拟平台和量子计算机

• Google Quantum AI

- 提供了量子模拟平台和量子计算机接入, 无可可视化编程界面

• 中科院量子信息与量子科技创新研究院 量子计算云平台

- 有光量子计算机和超导量子计算机, 提供了模拟平台

• 百度 量易伏

- 国内首个云原生量子计算平台, 可用于模拟和运行量子计算机

• 北京量子信息科学研究院 超导量子计算云平台

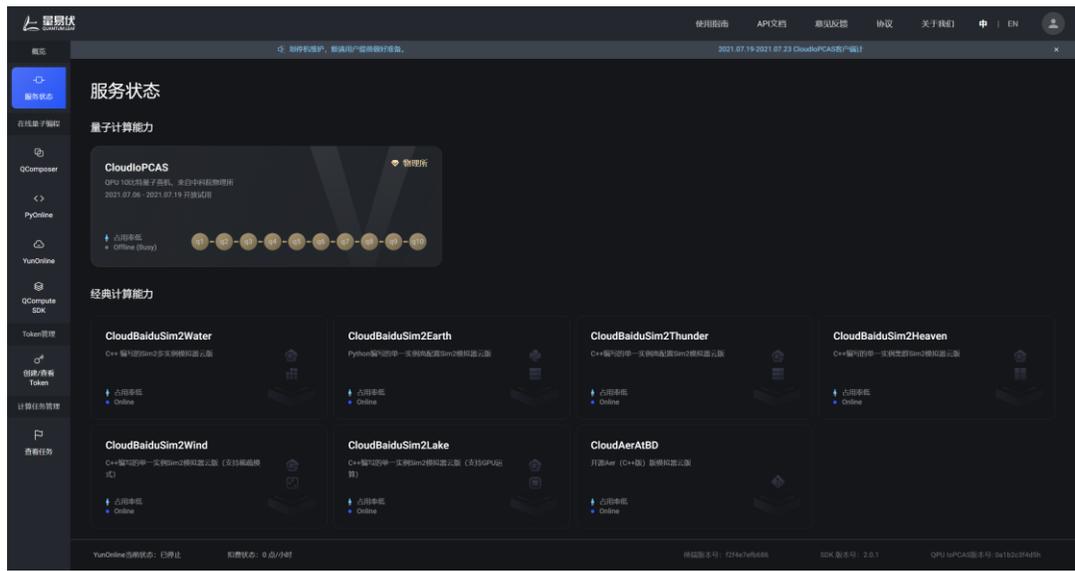
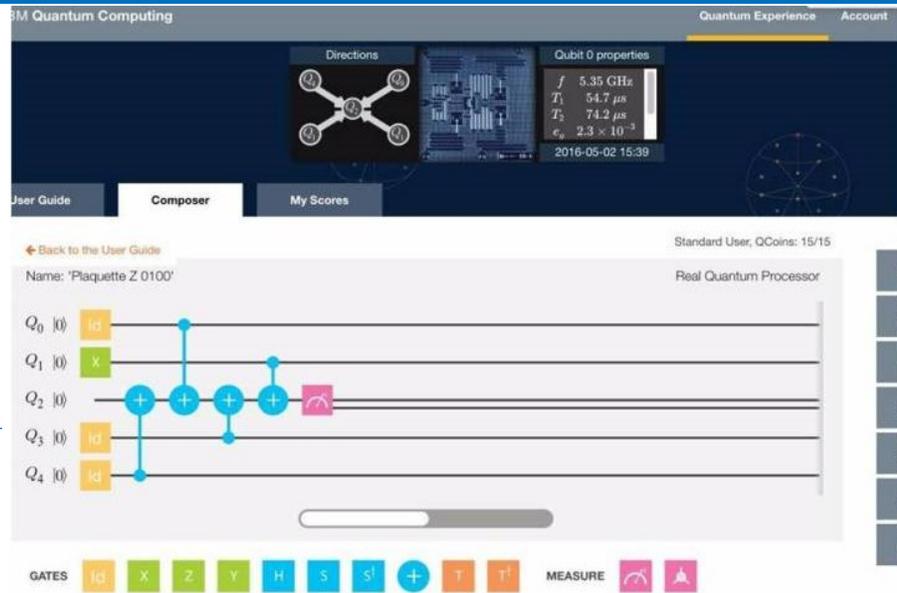
- 提供8个近邻耦合的量子比特, 用户编程界面与IBM类似

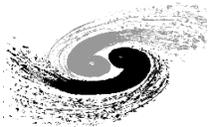
• 本源量子科技 本源量子云

- 可以提供真实量子计算和量子模拟计算

• 中科院物理研究所 ScQ.Cloud

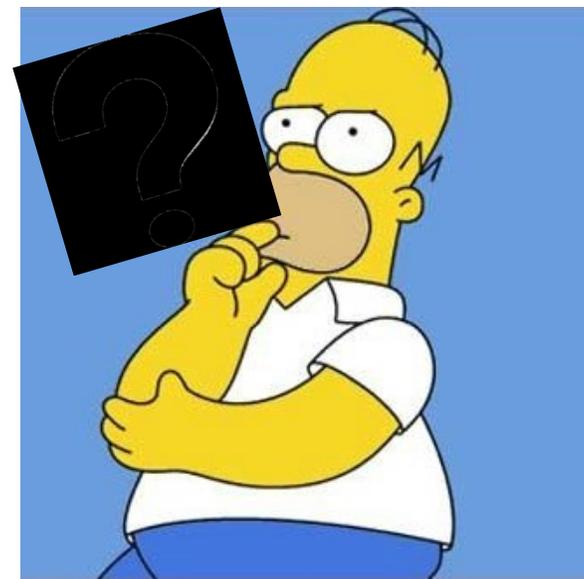
- 提供了模拟平台和量子实体机测试, 界面与IBM类似

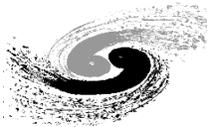




- 量子计算平台仍在快速开发中
 - 不同量子开发平台用户编程环境一般不相同
- 可用的量子计算资源有限
 - 量子硬件资源
 - 量子模拟计算资源
- 量子模拟器问题
 - 多数运行在CPU上，较少使用GPU/FPGA等加速硬件
 - 大部分不能模拟当前真实的量子计算机环境
- 量子编程用户界面
 - 量子比特和量子门数量有限制
 - 可选择的后端量子模拟机有限
- 量子编程环境
 - 自定义功能、二次开发比较麻烦

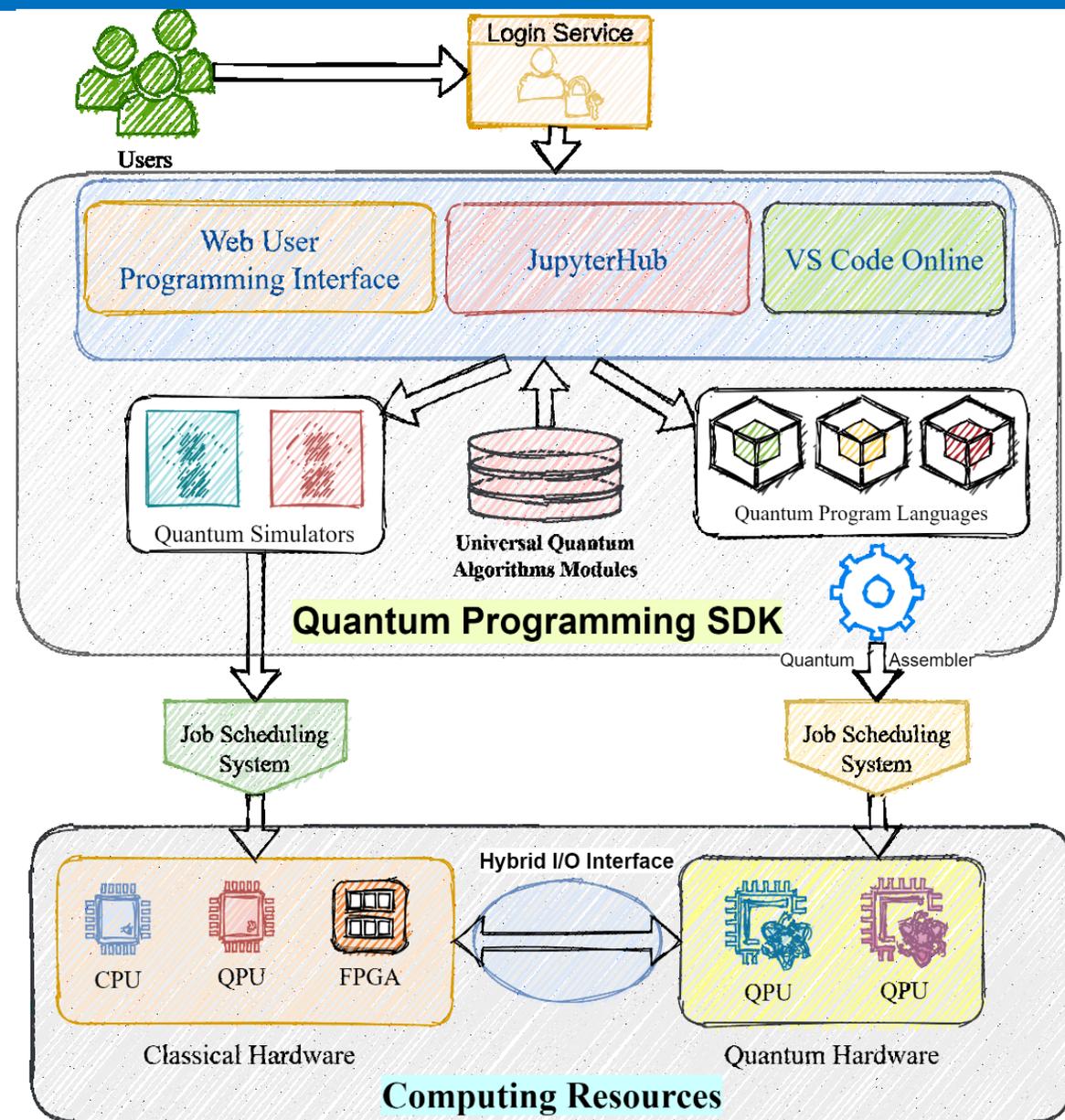
能做点什么？

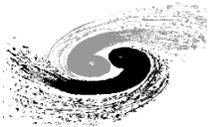




我们要做什么

- 相对通用的量子计算开发平台
 - 集程序开发、测试、任务运行为一体
 - 方便科研人员进行量子算法的开发与验证
 - 支持格点QCD、分波分析、BES等物理分析
 - 探索量子算法在高能物理等领域中的应用
- 友好的量子程序开发环境
 - 量子模拟器、编译器
 - 编程框架、用户编程界面
 - 常用算法库、编程教程等
- 统一的用户和资源管理
 - 用户管理，计算、存储资源管理
 - 后端对接物理量子计算机
 - 模拟计算任务资源调度器





高效的量子模拟器

- 引入现有的量子模拟器

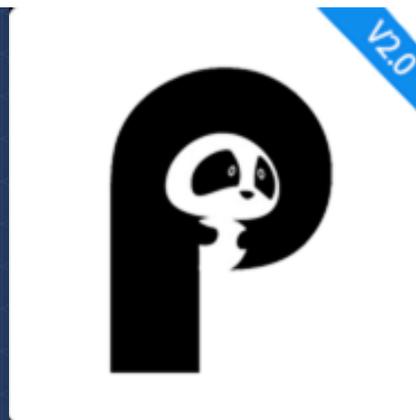
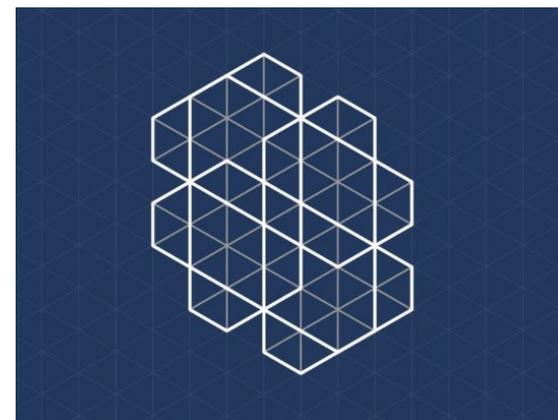
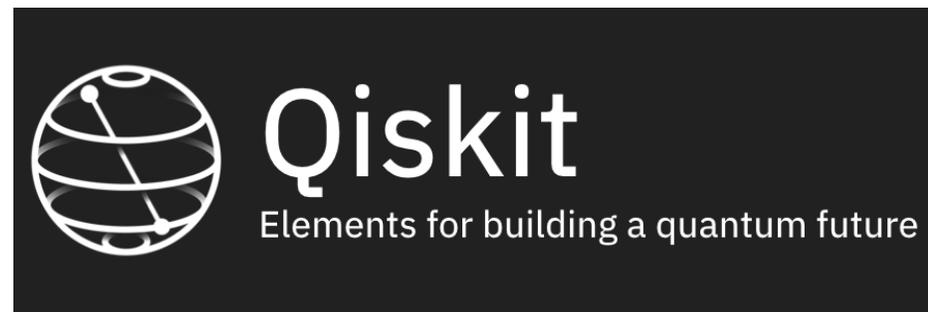
- 本源量子 **Qpanda**; 阿里 **太章**; 百度 **量脉**
- **Google Cirq**; **IBM Qiskit**; **Microsoft Q#**; **D-Wave SolverAPI**
- 可以快速开始量子算法的开发、验证

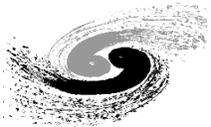
- 开发新的量子模拟器

- 使用 **Python/Julia/C++** 等作为前端，方便量子算法编写
- 开发分布式后端量子模拟引擎，提升量子模拟的规模
- 使用 **GPU**或**FPGA**等计算加速设备，加速量子计算模拟
- 采用**量子退火模拟机**及**量子线路模拟机**
- 探索新型的模拟器如**张量网络**，包含**量子噪声**等

- 量子算法框架研究

- 高维稀疏矩阵运算加速算法
- 高效地量子比特和量子门模拟
- 量子算法研究





• 用户编程GUI

- 全新开发用户界面
 - 独立设计，功能开发方便
 - 可与模拟器高度结合
- 采用已有方案
 - IBM Quantum Composer
 - 根据需要进行二次开发
 - 部署方便，能快速进行开发

The screenshot shows the ScQ .Cloud interface. At the top, there are navigation tabs for ScQ, QtVM, and Tutorials & Links, along with Log In and Sign Up buttons. The main area is divided into a Toolbox on the left and a control panel on the right. The Toolbox contains various quantum gates like X, Y, Z, H, Rx, Ry, X/2, Y/2, Rz, CZ, and others. Below the toolbox, it indicates 'The Pauli X gate.' and 'No gate selected.' The control panel on the right shows 'Server Status: Maintenance' (in a red box), 'Tasks Waiting: 0', 'Quantum Storage: 10 Qubits', 'Measurement: 3000 Shots', 'Advanced Settings: Tomography' (unchecked), 'Sample Information: Detail >>' and 'Help ?', and 'Control: Clear All Run !'.

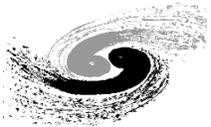
• 量子编译器

- 与量子硬件厂商合作
 - 九章、祖冲之号、悟源.....

• 高级编程语言

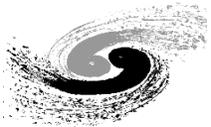
- Python
- C++
- Julia

The screenshot shows a quantum circuit diagram with 10 horizontal lines representing qubits, labeled 0 through 9 on the left. A small blue square box is positioned on the line for qubit 0, indicating a selected or active qubit.

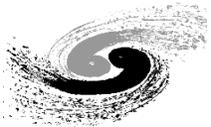


- 刚刚开始研究与开发
 - 目前处于探索阶段
- 中心计算集群资源多
 - 后续还会增加支持
- 逐步与实验开展合作
 - 探索量子计算可能的应用
- 研究人员不足
 - 正在招揽量子计算相关人才





- 高能物理实验数据量大，传统计算有瓶颈，量子计算可能有帮助
 - 量子计算可能加速格点QCD、LHAASO、HEPS等计算分析
 - 一些问题传统计算无法解决，可能只有依赖量子计算
- 量子计算机及量子开发平台正在快速发展中，但存在各种问题
 - 目前处于 NISQ 阶段，量子计算机制造、操作复杂，量子比特少，量子纠错能力弱等
 - 量子模拟平台开发环境、计算资源、计算效率、程序规模等方式存在不足
- 正在开发面向高能物理的量子计算模拟平台
 - 计划支持格点QCD、BESIII、LHAASO等高能物理实验和理论研究，后期推广到其他领域
 - 提供高性能的、高并行的量子模拟器和友好的用户开发界面和编程框架等



Thanks!



广告：欢迎感兴趣的同学加入高能所计算中心