

证券研究报告



# 量子信息技术乘风起，加速产业链发展变革

——新质生产力系列报告

强于大市（维持）

长城证券产业金融研究院

分析师侯宾

执业证书编号：S1070522080001

分析师姚久花

执业证书编号：S1070523100001

时间：2024年5月29日

# ◆ 核心观点

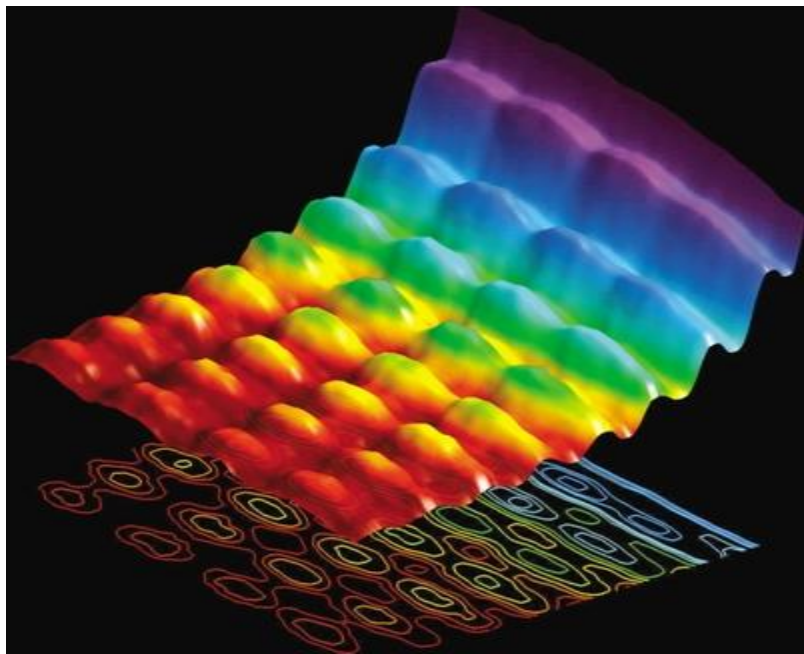
- ◆ **量子通信、量子计算和量子测量是量子信息的三大主要应用方向。**当前各国也在加快在量子信息技术产业的布局，在政府主导下，中国量子信息技术的基础科学和系统研发力量正快速成长，并成为与美欧并驾齐驱的竞争者。
- ◆ **量子通信产业处在量子通信保密第一阶段，中国量子通信基础设施处于领先水平：**量子通信主要包括：量子密钥分发、量子安全直接通信、量子隐形传态、量子数字签名等多种通信技术。目前量子密钥分发有较多的应用案例、量子安全直接通信零星实践、量子隐形传态传输未知量子态，近期取得学术的研究突破，量子数字签名目前处于学术研究验证阶段。我国目前已经建成基于光纤的量子骨干网和城域网，并发射量子通信卫星，初步形成天地一体的广域网量子密钥分发网络。根据Coherent Market Insights数据，2030年全球量子通信产业规模预计达到**78.5**亿美元。
- ◆ **量子计算硬件多技术路线并行发展：**量子计算主要分类两大类：以超导和硅半导为代表的人造粒子路线，第二是以离子阱、光量子和中性原子为代表的天然粒子路线。人造粒子路线可重用半导体集成电路制造工艺，在比特数量扩展方面有一定的优势，但是在提升逻辑门精度等指标方面受到基础材料和加工工艺等限制。天然粒子具有长相干时间和高逻辑门精度等优势。**IDC预测，2022年量子计算的销售额将达到11**亿美元，并将以**48.1%**的复合年增长率增长，到**2027年达到76**亿美元。
- ◆ **投资建议：**网络运营/平台：中国移动、中国联通、中国电信；软件平台：神州信息；量子计算/通信：国盾量子；量子芯片：国芯科技；光纤光缆：亨通光电；元器件：腾景科技、光迅科技
- ◆ **风险提示：**技术研发不及预期风险；监管政策不确定性风险；供应链不稳定风险；宏观经济环境波动风险。

# 第一章：什么是量子信息技术？

## 1.1 量子：最小不可分割的基本单位

- 量子：量子 (Quantum) 即一个物理量如果存在最小的不可分割的基本单位，则这个物理量是量子化的，并把最小单位称为“量子”。量子是构成物质的最基本的单元，也是能量和动量等物理量的最小单位，比如光量子、电量子。
- 波粒二象性：基本粒子，包括原子和分子在内的任何量子都既有粒子的性质又有波的性质。是微观粒子的基本属性之一。
- 量子信息定义：量子力学和信息学科的交叉学科，是基于量子力学原理对光子、电子等微观粒子系统及其量子态进行人工观测和调控，借助量子叠加和纠缠等独特物理现象，以经典理论无法实现的方式获取、传输和处理信息的一门技术。

图表：波粒二象性照片



图表：量子信息的物理基础和基础

### 不可克隆性

- 01 未知量子态不可以被精确复制，是的每个复制比特与初始量子比特相同，这个是量子密码安全性的基础，也是信息提取不可逾越的障碍

### 非局限性

- 02 两个相互纠缠的微观粒子存在非局域关联，对其中之一施加作用，另一粒子瞬间感应到这种影响，并发生相应的状态变化。

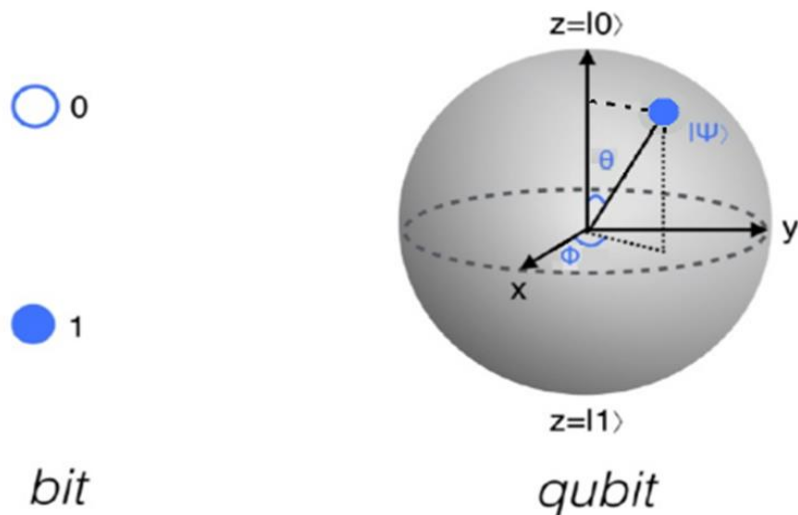
### 量子态的叠加

- 03 微观粒子的各种观测测量（位置、动量、能量等）一般不具有确定值，量子世界的粒子状态必须满足态的叠加原理。从根本上赋予量子计算“并行计算”的能力。

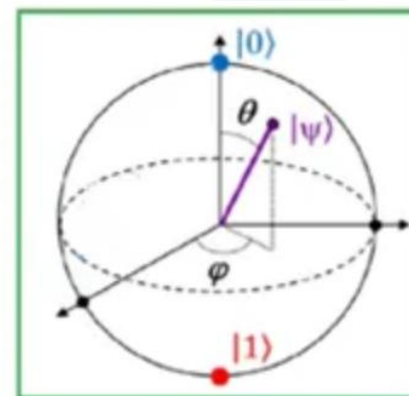
## 1.2.1 量子信息中基础概念一：量子比特

- ◆ **量子比特**: 1992年被发明使用, 经典计算机的基本运算单位是比特 (Bit), 计算机的基本单元是量子比特 (Qubit), 也叫作量子位或者量子元。
- ◆ **量子比特是0和1的叠加态**: 比特只有两个可能的状态, 即0和1。而量子比特是一种叠加态, 它有两个本征态, 即 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ , 它们形式地对应于经典的0和1。但是, 一个量子寄存器在任何时刻的状态 $|\psi\rangle$ , 不是“之一”, 而是两种本征态的叠加。
- ◆ **布洛赫球面**: 量子比特可能的状态有无穷多, 因为布洛赫球面上有无穷多个点, 每个点都是一个叠加态。但比特和量子比特也有相同之处: 任何时刻所处的状态只是一个。

图表：比特和量子比特



$$\begin{aligned} |\Psi\rangle &= \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \\ \alpha, \beta &\text{ 是复数 概率幅} \rightarrow \\ \text{归一化} &\rightarrow \alpha^2 + \beta^2 = 1 \\ \rightarrow |\Psi\rangle &= r e^{i\phi_\alpha} |0\rangle + r e^{i\phi_\beta} |1\rangle \\ &\text{忽略整体相位, 只考虑相位差 } (\phi_\beta - \phi_\alpha) \\ \rightarrow |\Psi\rangle &= r |0\rangle + r e^{i(\phi_\beta - \phi_\alpha)} |1\rangle \\ \rightarrow |\Psi\rangle &= \cos\frac{\theta}{2} |0\rangle + \sin\frac{\theta}{2} e^{i\phi} |1\rangle \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} &\text{概率幅} \\ \text{叠加态} &= \alpha|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle \\ \text{概率} &= |\text{叠加态}|^2 = |\alpha|^2 + |\beta|^2 + \boxed{\text{干涉项}} \end{aligned}$$

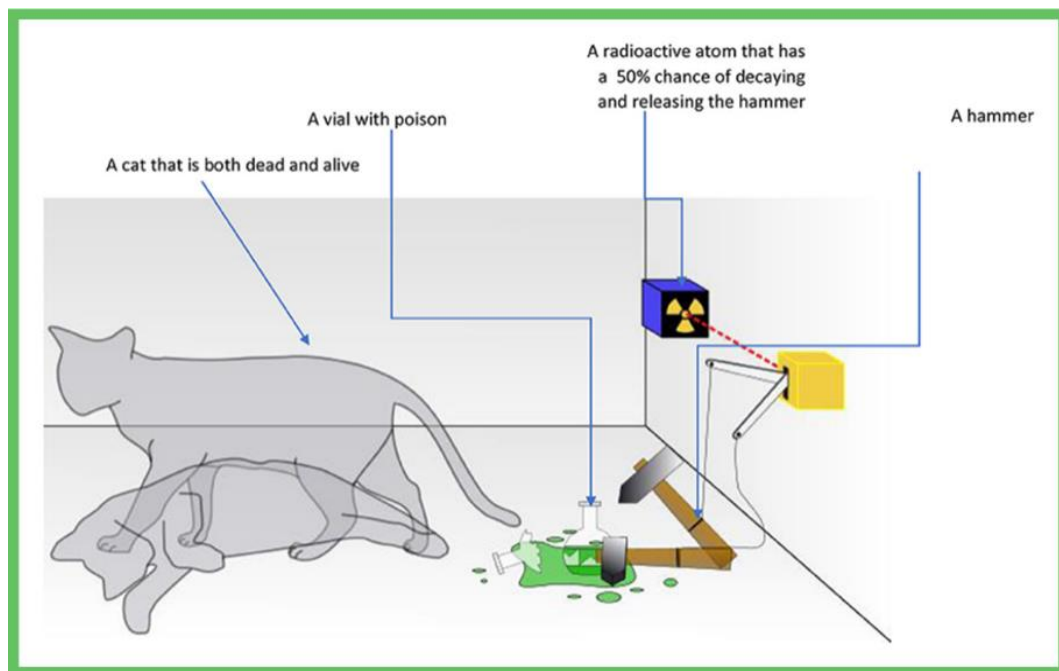
## 1.2.2 量子信息中基础概念二：量子叠加

**量子叠加：**一个量子系统可以处在不同量子态的叠加态上，在量子系统重，量子态是指微观粒子所处的一系列不连续的恒稳运动状态。

薛定谔作为经典物理学派的代表，将量子物理学派信封的微观世界的“概率性”，关联放大到宏观世界中，来违反人们生活中的常识，但是薛定谔的猫的试验还是存在一定的漏洞：

- 1、微观世界的概率性特性，不应该对应着宏观世界的具体事物，存在失效的边界。
- 2、实验中的“毒气释放装置”需要探测到放射性物质发生衰变，才能够出发并导致猫的死亡，只有大量放射性物质衰变的时候，才能够超过探测器阈值，而大量衰变事件仍属于一个宏观事件。
- 3、探测器来探测放射性物质是否发升衰变本身就是一种观察方式，无论是否打开盒子。

图表：薛定谔的猫



### ■ 薛定谔的猫的试验

- 在薛定谔的思想实验中，一个封闭的盒子内装有一只猫，一瓶毒药和一个在实验过程中有**50%**的机会衰变的放射性原子。
- 有**50%**的几率放射性原子不会衰变，猫会活下来。根据量子理论，猫在同一时间既是活的又是死的——只有当我们打开盒子查看时，它才真正成为其中的一个状态

## 1.2.3 量子信息中基础概念三：量子纠缠

- **量子纠缠**：当几个粒子在彼此相互作用后，由于各个粒子所拥有的特性以综合成为整体特性，无法单独描述各个粒子的性质，只能描述整体系统的性质。如果两个量子比特构成一个量子纠缠态，无论携带两个量子比特的粒子相距多远，只要一个量子比特的测量状态发生改变，另一个状态也马上发生改变。

图表：量子信息的三个重要方向

	量子通信	量子计算	量子传感与测量
技术原理	量子力学原理，通过移动量子态来实现信号、信息和量子态的转移和传输	遵循量子力学规律来调控量子信息单元进行计算的新型计算模式	基于量子体系纠缠、压缩、高阶关联等特向实现对量子态的操控和测量
应用场景	量子密钥分发 量子隐形传态技术	量子处理器	量子时频同步、量子重力测试、量子磁场测量、量子定位导航、量子目标识别等。
具体行业	军事国防、国家政务、金融交易、互联网云服务、电力系统等领域的信息安全保障服务	生物制药、材料研发、分子化学、资源勘测等；在AI、量化金融、密码解析、交通优化等大规模计算领域，加速机器学习 and 大数据处理能力等	军事国防、航空航天、生物医学、能源勘测、交通运输、灾害预警等。



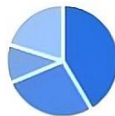
# 1.3 产业联盟兴起，各国加快产业布局

- 全球多国相继成立量子信息领域产业联盟，成员涵盖量子企业、研究机构以及行业用户，持续推动产学研多方合作。
- 从专利地域分布来看，量子计算、量子通信和量子测量技术专利前三技术来源地均为中国、美国、日本，说明三个国家在量子信息领域技术创新活跃。在政府主导下，中国量子信息技术的基础科学和系统研发力量正快速成长，并成为与美欧并驾齐驱的竞争者。

图表：全球代表性量子信息产业联盟概况

图表：2023年全球量子信息技术专利地区和申请人分布

 <ul style="list-style-type: none"> <li>时间：2018年12月</li> <li>成员：290家 (已扩展至39国)</li> <li>网址：quantumconsortium.org</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>时间：2021年4月</li> <li>成员：183家 (~30国)</li> <li>网址：euroquic.org</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>时间：2022年7月</li> <li>成员：68家中国机构</li> <li>网址：chinaqia.cn</li> </ul>
 <ul style="list-style-type: none"> <li>时间：2020年10月</li> <li>成员：42家加拿大企业</li> <li>网址：quantumindustrycanada.ca</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>时间：2021年6月</li> <li>成员：13家德国企业</li> <li>网址：qutac.de</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>时间：2021年9月</li> <li>成员：85家</li> <li>网址：qstar.jp</li> </ul>
 <ul style="list-style-type: none"> <li>时间：2021年1月</li> <li>成员：5家荷兰机构+40合作机构</li> <li>网址：quantumdelta.nl</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>时间：2022年8月</li> <li>成员：135家</li> <li>网址：techcouncil.com.au</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>时间：2021年 (报道时间)</li> <li>成员：约30家以色列企业</li> <li>网址：—</li> </ul>

技术路线	专利地域分布 (2023年11月)	热门申请人前十分布 (2023年11月)																		
量子计算	 <ul style="list-style-type: none"> <li>美国</li> <li>中国</li> <li>日本</li> <li>其他</li> </ul>	<table border="1"> <tr> <td>万国商业机器公司</td> <td>谷歌有限责任公司</td> <td>微软技术许可有限责任公司</td> <td>合肥本源量子计算科技有限责任公司</td> <td>英特尔公司</td> <td>d波系统公司</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>北京百度网讯科技有限公司</td> <td>如般量子科技有...</td> <td>国家商业机器公司</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>本源</td> </tr> </table>	万国商业机器公司	谷歌有限责任公司	微软技术许可有限责任公司	合肥本源量子计算科技有限责任公司	英特尔公司	d波系统公司				北京百度网讯科技有限公司	如般量子科技有...	国家商业机器公司						本源
万国商业机器公司	谷歌有限责任公司	微软技术许可有限责任公司	合肥本源量子计算科技有限责任公司	英特尔公司	d波系统公司															
			北京百度网讯科技有限公司	如般量子科技有...	国家商业机器公司															
					本源															
量子通信	 <ul style="list-style-type: none"> <li>中国</li> <li>美国</li> <li>日本</li> <li>其他</li> </ul>	<table border="1"> <tr> <td>华为技术有限公司</td> <td>三星电子株式会社</td> <td>英特尔公司</td> <td>万国商业机器公司</td> <td>阿里巴巴集团控股有限公司</td> <td>日本电气株式会社</td> <td>日本电信电话株式会社</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>高通股份有限公司</td> <td>中兴通讯股份有限公司</td> <td>科大国盾量子技术股份有...</td> </tr> </table>	华为技术有限公司	三星电子株式会社	英特尔公司	万国商业机器公司	阿里巴巴集团控股有限公司	日本电气株式会社	日本电信电话株式会社					高通股份有限公司	中兴通讯股份有限公司	科大国盾量子技术股份有...				
华为技术有限公司	三星电子株式会社	英特尔公司	万国商业机器公司	阿里巴巴集团控股有限公司	日本电气株式会社	日本电信电话株式会社														
				高通股份有限公司	中兴通讯股份有限公司	科大国盾量子技术股份有...														
量子测量	 <ul style="list-style-type: none"> <li>中国</li> <li>美国</li> <li>日本</li> <li>其他</li> </ul>	<table border="1"> <tr> <td>合肥本源量子计算科技有限责任公司</td> <td>谷歌有限责任公司</td> <td>北京百度网讯科技有限公司</td> <td>万国商业机器公司</td> <td>本源量子计算科技(合肥)股份有限公司</td> <td>微软技术许可有限责任公司</td> <td>英特尔公司</td> <td>清华大学</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>日本电...</td> </tr> </table>	合肥本源量子计算科技有限责任公司	谷歌有限责任公司	北京百度网讯科技有限公司	万国商业机器公司	本源量子计算科技(合肥)股份有限公司	微软技术许可有限责任公司	英特尔公司	清华大学								日本电...		
合肥本源量子计算科技有限责任公司	谷歌有限责任公司	北京百度网讯科技有限公司	万国商业机器公司	本源量子计算科技(合肥)股份有限公司	微软技术许可有限责任公司	英特尔公司	清华大学													
							日本电...													

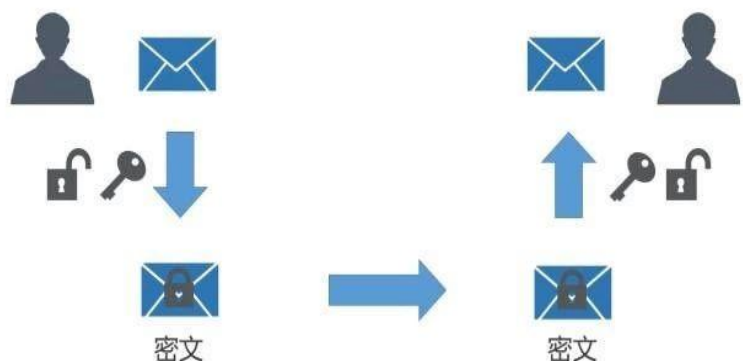
## 第二章：量子通信



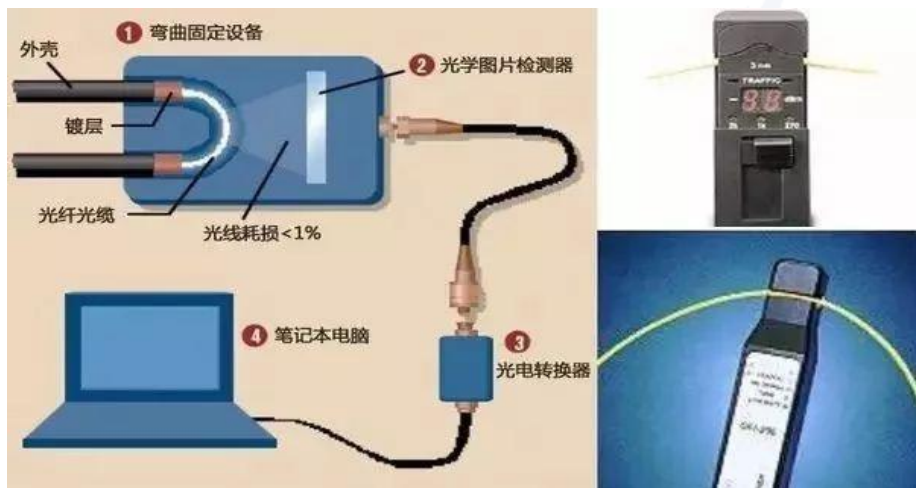
## 2.2.1 密钥分发实现量子信息加密

- 量子密钥分发 (QKD)，将随机数编码到量子态，并通过量子态的传输以及经典通信的辅助，在收发双方之间实现随机数的安全协商，基于部分随机数生成密钥。
- 窃听者如果要窃听量子密码，必须进行相应的测量，因此可以通过检测传输信息的误码率来判断是否存在窃听，而根据不确定性原理和量子不可克隆性，一旦测量必定会对量子系统造成影响，从而改变量子系统的状态。
- 对于传统的加密通信，如果用无线电传输，无线电是开放的，对方很容易截获，有线介质，通讯路程很长，很难保证全程安全，以光纤传输为例，通过弯曲光纤，外泄部分光信号，进行窃听。

图表：传统的加密通信示意图

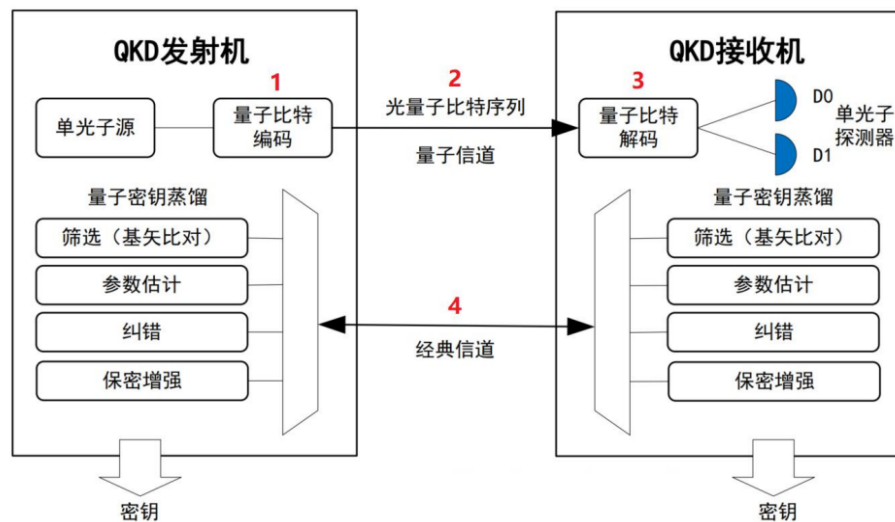


图表：光纤弯曲窃听示意图



1. OKD发射机制备单光子并将光子偏振方向随机调制为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  四种偏振态中的一种(可设定  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  偏振方向表示发送二进制随机数 0, 而  $90^\circ$ 、 $135^\circ$  偏振表示发送随机数 1), 并记录调制结果;
2. OKD发射机通过量子信道将编码后的光量子比特序列发送给 OKD接收机;
3. 对于每个光子, OKD接收机从垂直正交基(+), 斜对角基(x)中随机选择一个基矢, 对接收到的光子进行测量, 并记录使用的基矢及测量结果
4. 通过经典信道的协商, 双方得到相同的随机数并生成密钥。

图表：BB84协议工作过程



## 2.2.2 密钥分发及调制模式

- **按照分发模式分类：**制备测量模式技术最为成熟且已实用，其他两种模式还处在研究验证阶段，其中纠缠测量方式对设备的要求最低，技术难度最高。
- **按照量子态载体及调制方式：**离散变量量子密钥分发（DV-QKD）和连续变量量子密钥分发（CV-QKD）。DV-QKD指发送端编码时，对单光子或者弱光脉冲的偏振、时间、相位等进行离散调制，接收端使用单光子探测器进行探测。CV-QKD指发送端编码时对弱光脉冲的两个正交分量进行连续调制，接收端用平衡探测器进行测量。
- 目前的量子保密通信主要基于制备-测量的离散变量量子密钥分发协议来实现，连续变量量子密钥分发目前也在迅速发展，未来有望在量子城域网等传输距离比较短、密钥速率要求较高的场景应用。

图表：QKD分发模式

图表：QKD调制模式

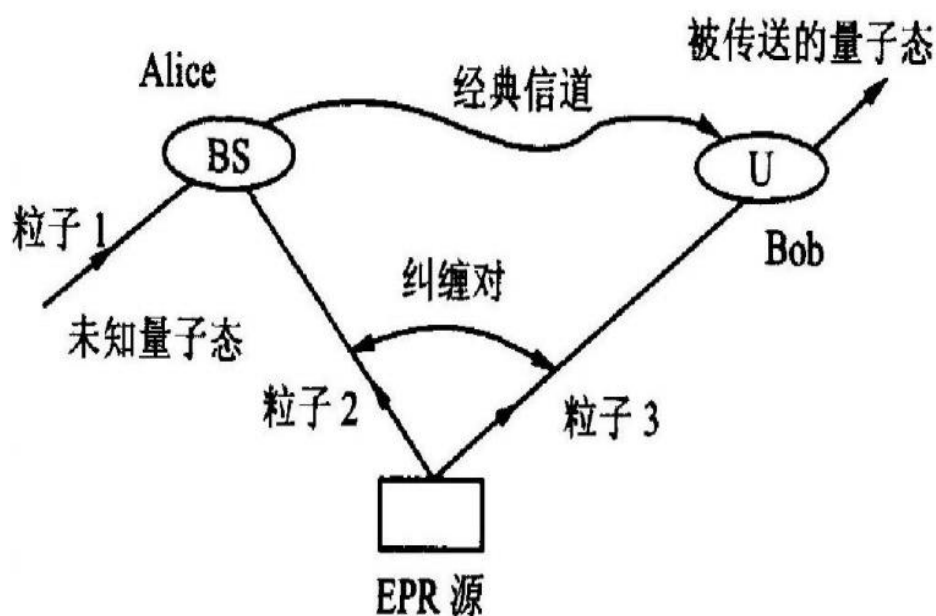
分发模式	量子态分发测量方式	侦测窃听的方式	安全原理	设备可信要求
制备测量	A 发送单量子，B 测量	A 和 B 比对收发结果，分析评估错误率	单量子测不准、不可复制，信道窃听必然留下痕迹	发送、测量设备均可信
纠缠测量	第三方分发纠缠的量子，A 和 B 测量	A 和 B 比对测量结果，分析评估双方最大纠缠的比例	最大纠缠没有第三方关联，第三方无法从中获取信息	设备无关 (DI)
纠缠反演测量	A 和 B 发送单量子，第三方测量	A 和 B 比对双方发送和第三方测量结果，分析在第三方测量时形成最大纠缠的比例		测量设备无关 (MDI)

调制模式	调制物理量	信号载体	测量方式	主要优势	主要劣势
离散变量	偏振、相位、角动量等离散	单光子脉冲	单光子分析	1.噪声分析、密钥提取比较简单； 2.安全证明已完成； 3.传输距离较远。	1.高对比度脉冲调制速率低； 2.单光子探测效率低； 3.密钥生成速率较低。
连续变量	位置-动量等连续的共轭量	相干光压缩光	散粒噪声分析	1.调制速率高； 2.相干探测技术、器件成熟； 3.短距离密钥生成速率高。	1.噪声分析复杂，密钥提取较难； 2.部分方案的安全证明还未完成； 3.传输距离较短。

## 2.3 量子互联网：量子隐形传态+量子计算机终端

- **量子隐形传态**：需要借助经典通信才能实现，因此限制了量子隐形传态不能超越光速，在传输的过程中，带传输的粒子始终留在原地，被传送的仅仅是量子态。
- 量子计算需要直接处理量子比特，因此量子隐形传态将成为量子计算之间的量子通信方式，未来量子隐形传态和量子计算机终端可以构成纯粹的量子信息传输和处理系统，即量子互联网。

图表：量子隐形传态的主要流程

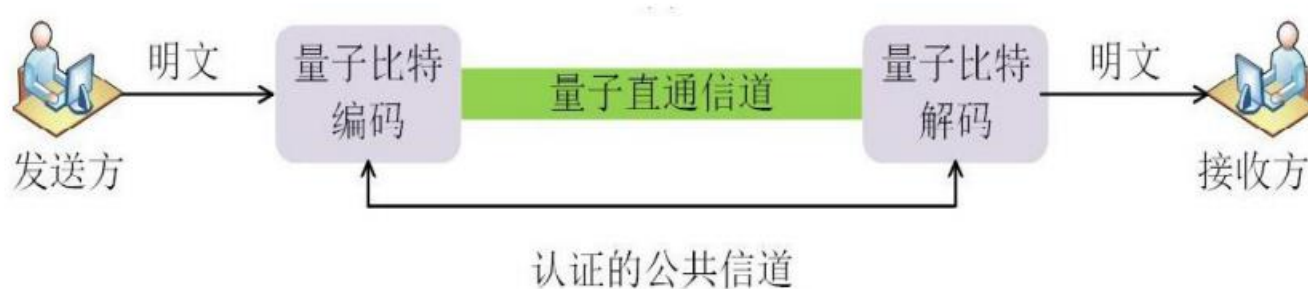


- ◆ (1) 由ERP源（电子顺磁共振）生成一对处于纠缠状态的粒子2和粒子3.其中粒子2传递给发送方，粒子3传递给接收方。
- ◆ (2) 发送方将待传输的粒子1和粒子2进行联合测量(称为贝尔态测量或联合Bell基测量)，由于量子纠缠特性，此时粒子1的量子态会作用于接收方的粒子3。
- ◆ (3) 发送方通过经典信道将粒子1和粒子2的联合测量结果传输给接收方，接收方根据收到的结果对粒子3做相应的酉变换操作，使得粒子3的量子态与之前的粒子1完全相同，从而完成量子态的“转移”。

## 2.4 量子安全直接通信可直接完成秘密信息的安全传输

- 量子安全直接通信：不同于量子密钥分发实现的保密通信，量子安全直接通信可在量子信道中直接传递秘密信息。在通信过程中双方不需要事先生成密钥，而是通过直接建立量子信道的方式进行通信，从而将一般意义上的量子通信过程简化为一步量子通信过程，即直接完成秘密信息的安全传输。
- 量子数字签名、量子秘密共享等技术，受制于通信设备的发展，其实际水平和QKD相比还有很大的差距。

图表：量子安全直接通信流程及发展阶段



2000年提出概念，建立理论。

02

原理验证与样机制备

04

2000-2004

2005-2015

2016-2019

2020至今

01

发展协议与应用探索

03

开展产品并推进试点

## 2.5 量子通信产业链覆盖多种应用领域

图表：量子通信产业链

### 上游：核心器件与设备

**电学芯片**  
模拟信号处理器芯片  
DAC/ADC、射频芯片、  
存储芯片

**光学芯片**  
光波导、光传感  
器等

国盾量子、赛灵思  
(美)、莱迪思(美)、  
Altera(美)、13、24、  
38所、上海贝斯等

**光源**：作为载体，经过对其量子状态的调制  
操作后，可携带量子信息在不同的通信节点  
进行信息传输和共享，常见的如激光器等

QD laser(日)、  
quandela(法)、国盾  
量子、aegiq(英)

**单光子探测器(400nm-1310nm)**：半导体  
探测器、超导探测器

Photek(英)、滨松  
(日)、lightwave  
(美)、国盾量子、启  
科量子

**量子随机发生器(QRNG)**：QKD设备的核  
心部件，保障通信不可预测性的关键工具  
成本角度可以替代经典随机数产品

IDQ(瑞士)、国盾量  
子、启科量子、QMT  
(英)

**晶体**：生成和调制用于  
传输量子信息的光子，  
PPLN(周期极化铌酸锂)

**其他**：光纤光  
缆

Xblue、极量科技、  
NKT Photonics、亨通光  
电

### 中游：网络传输干线及平台系统

量子密钥分发设备：DV-QKD和CV-  
QKD

组网设备(信道交换、数据处理  
类)、网络管理软件平台

网络建设集成：全球大部分可以依托现有的光纤通信网络(国家骨干网、省骨干  
网以及城域网)，**在合适的节点机房内布局QKD发送和接收设备**

**保密网络运营**：管理和协作量子网络的运作，比如监控网络状态、态度量子信  
号的传输、处理密钥分发和管理、优化网络资源、故障检测等。

**PQC**：一切可以抵抗量子计算供给的新算法都可以是PQC，新一代的加密算法、  
安全协议、芯片等

### 下游：行业

终端产品：量子IDC、量子电话、量子白板等

应用领域：军事、电子政务、能源电力、电子商务、电信运营等

## 2.6.1 量子通信基础设施建设现状：中国处于全球领先水平

- 我国目前已经建成基于光纤的量子骨干网和城域网，并发射量子通信卫星，初步形成天地一体的广域网量子密钥分发网络。目前美国、欧盟等国家也在推动量子通信建设，总体落后于中国。

图表：全球各国量子通信基础设施建设现状（截至2024年1月）

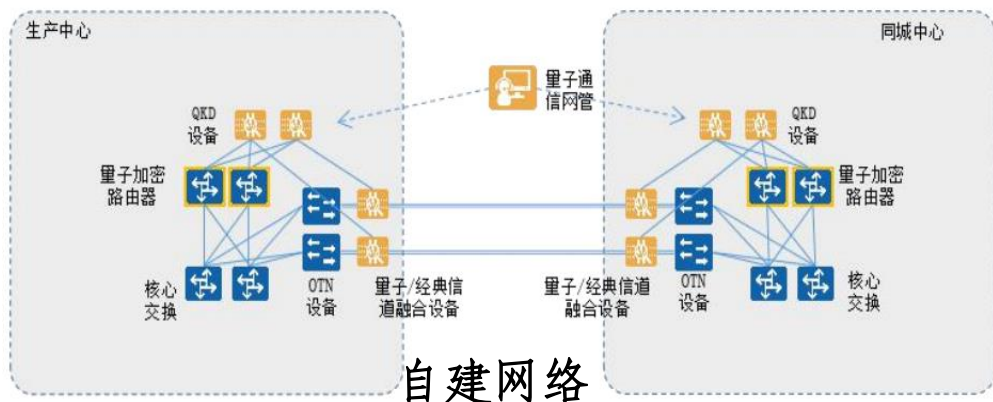
国家	项目/干线名称	具体细节
中国	量子骨干网（6条）	京沪干线（北京、济南、合肥、上海）、武合干线、沪杭合干线、京汉广干线（北京、武汉、长沙、广州，在建）、济青干线、长三角区域骨干网（合肥、上海、南京、杭州、无锡、金华、芜湖等）
	量子城域网	合肥、济南、北京、上海、重庆、武汉、成都、贵阳、海口、乌鲁木齐、宿州、枣庄、金华、南宁 在建：广州、南京、佛山
	量子卫星	墨子号、济南一号
美国	DARPA量子通信网络	美国国防部最高级研究计划局（DARPA）主导，链接波士顿到马萨诸塞州剑桥市等10个节点
	NASA量子保密通信干线	链接洛杉矶和加州湾区的杰尼维尔，长达550km
	Phio洲际量子通信网络	美国首个洲际、商业量子密钥分发网络，从华盛顿到波士顿沿美国东海岸，总长805km。
	中西部量子走廊	连接芝加哥市及其郊区，由6个节点和200km的光纤组成，目前超过80kbps。
	费米实验室量子网络	FQNET是位于芝加哥地区，包括费米实验室、阿贡国家实验室、西北大学及其他合作伙伴，费米实验室和阿贡国家实验室之间相距50km。
欧洲	SECOQC量子通信网络	英、法、德、意等12个国家共同建设，2008年在奥地利首都建成，6个节点，8条链路，最长链路85km。
	欧洲量子通信基础设施	由欧盟27个成员国正在建设，计划连接整个欧盟的量子通信网络，目标是2027年开展初步的运营服务
	欧洲QUDICE项目	欧洲5个国家参与，是服务欧洲的卫星网络，2023年1月启动
	英国和加拿大合作	计划2025年发射量子加密和科学卫星
日本	东京量子实验网络	日本国家情报通信研究机构主导，联合NTT、NEC和三菱机电建设城域量子通信网络，4个接入点，最远传输距离90km，最快的节点通信速率为304kbps。

## 2.6.2 数据中心QKD两大参考架构

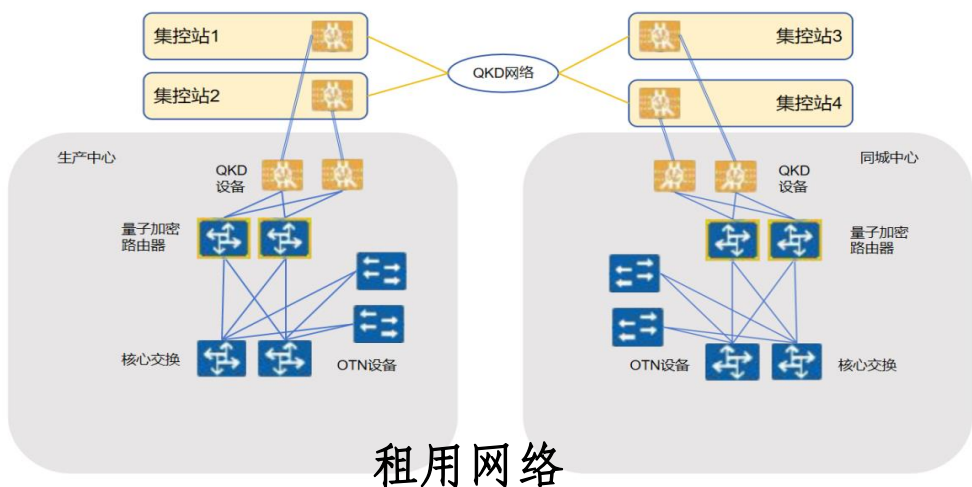
- 同城数据中心：QKD设备与量子加密路由器采用常规的冗余子网设计，量子加密路由器挂在交换机上，提供高性能互联加密通信能力，在交换机的部署策略上由将需要加密的业务数据导入量子加密路由器。
- 异地数据中心：机房之间相距很远，可以租用量子通信运营商的服务来接入当地量子城域网，并且通过量子骨干网实现QKD互联。量子加密路由器通常挂在PE路由器（运营商边缘路由器）或者与PE结合，各个站点与本地通信运营商的集控站接入。

图表：数据中心QKD参考架构

### 同城数据中心

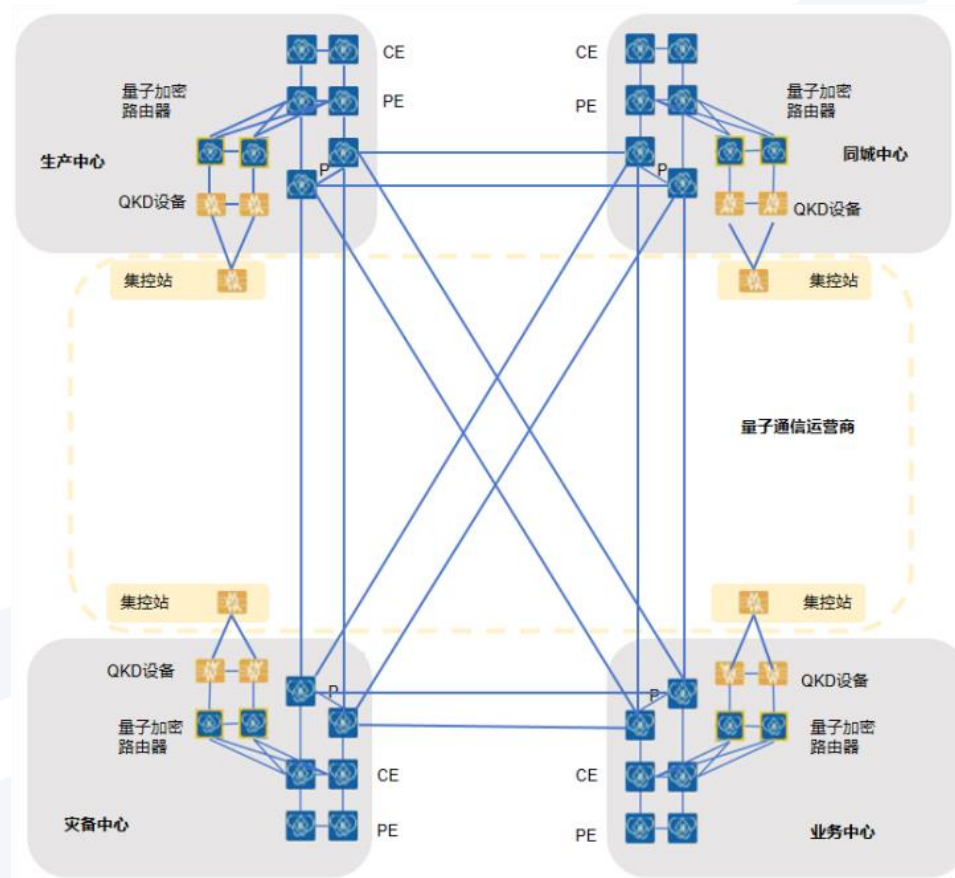


### 自建网络



### 租用网络

### 异地数据中心



## 2.7 墨子号：我国在量子通信领域的巨大进步

- 在地面，我国量子通信的光纤城域网已经趋于成熟，创造了量子密钥分发安全距离达到**404公里**的世界记录。为了将量子通信在更远的距离上应用，有三种方式可以选择，一种是利用量子中继，一种是利用可信中继，另一种就是利用自由空间信道，即量子卫星。
- 2016年8月世界上首颗量子试验卫星“墨子号”顺利升空，目前模组号的地星量子稳态传态试验可以将通信距离从**500km**延长到**1400km**，传输效率等同于地面光纤信道高**20**个数量级（万亿亿倍）。由于量子的不可复制性，不能像经典通信一样被放大，由于光纤信道的固有衰减，量子通信的距离受到很大的限制。

图表：墨子号的三大科学目标

### 量子隐形传态

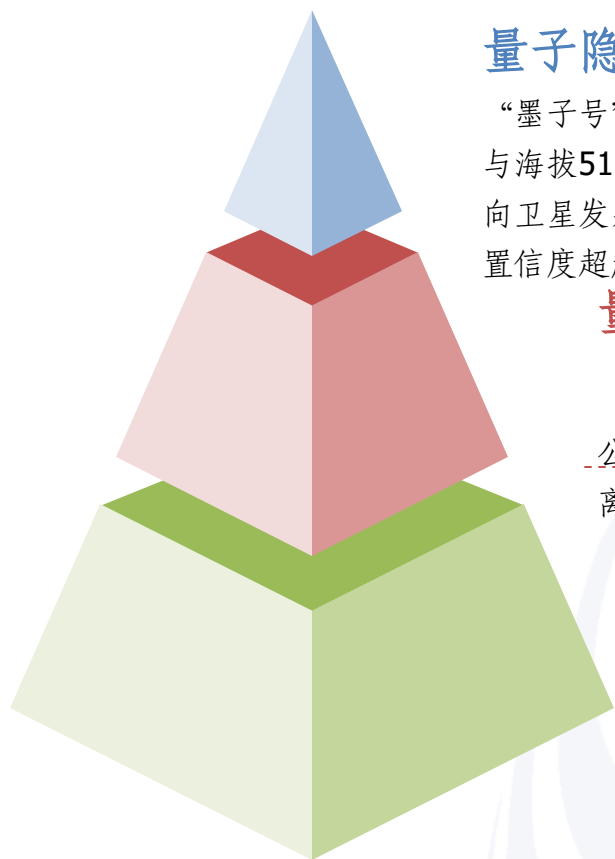
“墨子号”量子卫星采用地面发射纠缠光子，天上接收的方式（即“上行链路”），在过境时，与海拔**5100米**的西藏阿里地面站建立光链路。地面光源每秒产生**8000**个量子隐形传态事例，地面向卫星发射纠缠光子，实验通信距离从500公里到1400公里，所有**6**个待传送态均以大于**99.7%**的置信度超越经典极限。

### 量子密钥分发

“墨子号”量子卫星过境时，与河北兴隆地面站建立光链路，通信距离从**635公里到1200公里**。在1200公里通信距离上，星地量子密钥的传输效率比同等距离地面光纤信道高**20**个数量级

### 远距离量子纠缠分发

墨子号卫星上装备量子纠缠光源，发送设备将成对光子分别发送到青海德令哈地面站和云南丽江地面站后，首次实现了地球上相距1200公里两个地面站之间的量子态远程传输



## 2.8 运营商等通信龙头加速量子通信布局

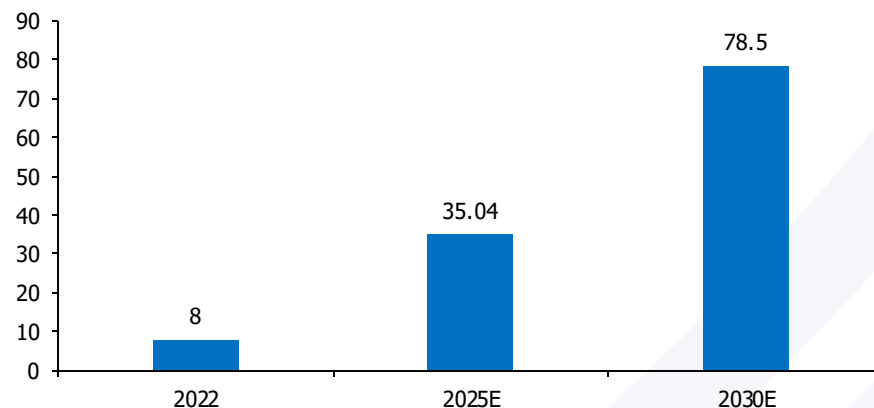
图表：国内主要玩家量子通信主要布局

主要玩家	产品	项目
中兴通讯	量子安全服务中间件vQSC、量子虚拟机、量子存储等	2021年中兴通讯联合国科量子依托前期建设的量子通信基础设施，在重庆璧山建设了全球首个量子安全可信云。
中科曙光	云安全一体机	2017年，全球首款基于量子通信的云安全一体机QC Server
国科量子	云网一体量子设施、融合量子通信技术的云平台	量子保密通信“京沪干线”技术验证及应用示范项目 国家广域量子保密通信骨干网络
国盾量子	量子保密通信网络核心设备、量子安全应用产品、核心组件以及管理与控制软件四大门类，其中，量子保密通信网络核心设备主要包括QKD产品和信道与密钥组网交换产品。	为合肥先进计算中心“巢湖明月”提供一台超导量子计算机、超量融合系统及相应配套的软硬件设施，并负责平台建成后5年的设备运维服务及运营。
中国移动		2023年，中国移动投资了量子初创企业玻色量子和华翊量子，并在同年4月份由旗下移动云发布了“五岳”量子云平台； 2024中国移动算力网络大会期间，中国移动联合国内9家量子计算机企业发布“五岳”量子云计算加速2.0计划
中国电信		2023年，中国电信发布了从真机到操作系统到编译软件全部国产化的量子计算云平台“天衍”。 2024年4月份，中国电信旗下中电信量子宣布，将联合公司拟收购企业国盾量子，依托“骁鸿”芯片研发量子计算整机。 中国电信在合肥市建立的量子保密通信城域网络，通过连接1147公里的光纤，已经成为全球规模最大、用户最多、应用最全的量子通信网络之一。
中国联通		MWC上海2023举办期间，中国联通还展示了量子密钥云平台在车联网以及工业互联网场景的创新应用。

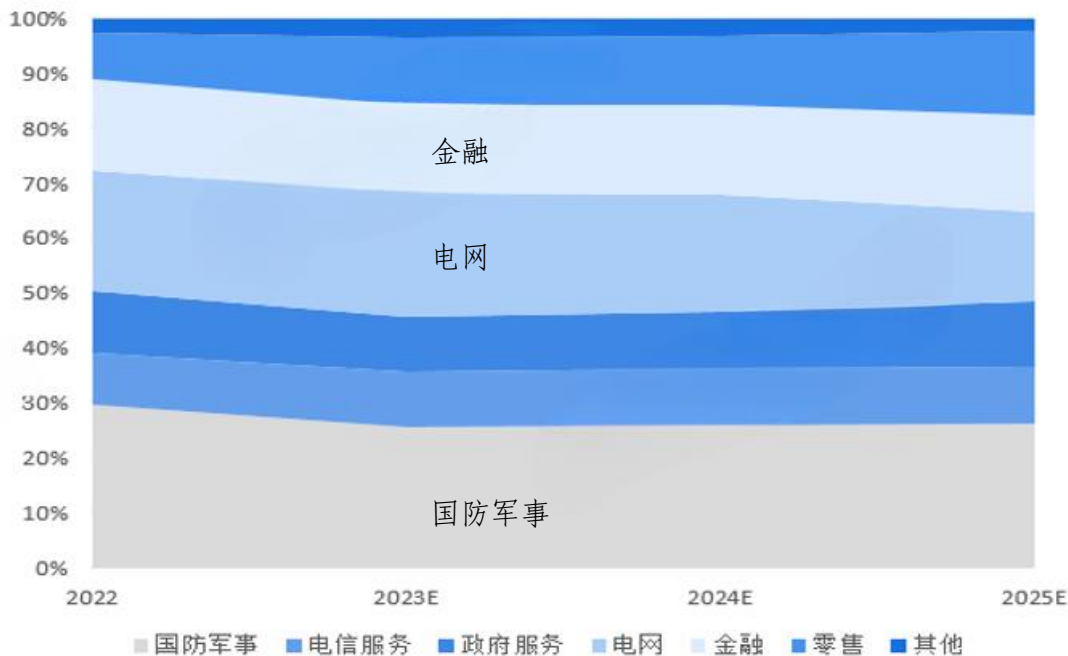
## 2.9 量子通信市场规模空间广阔，国防军事为主要应用领域

- 从应用领域来看，国防军事、电网是QKD的主要应用市场。
- 根据前瞻产业研究院预测，到2025年，预计市场规模将达到35.04亿美元。根据Coherent Market Insights数据，2030年全球量子通信产业规模预计达到78.5亿美元。
- 据智研瞻预测，2024-2030年中国量子通信行业市场规模增长率在6%-8%，2030年中国量子通信行业市场规模228.55亿元。

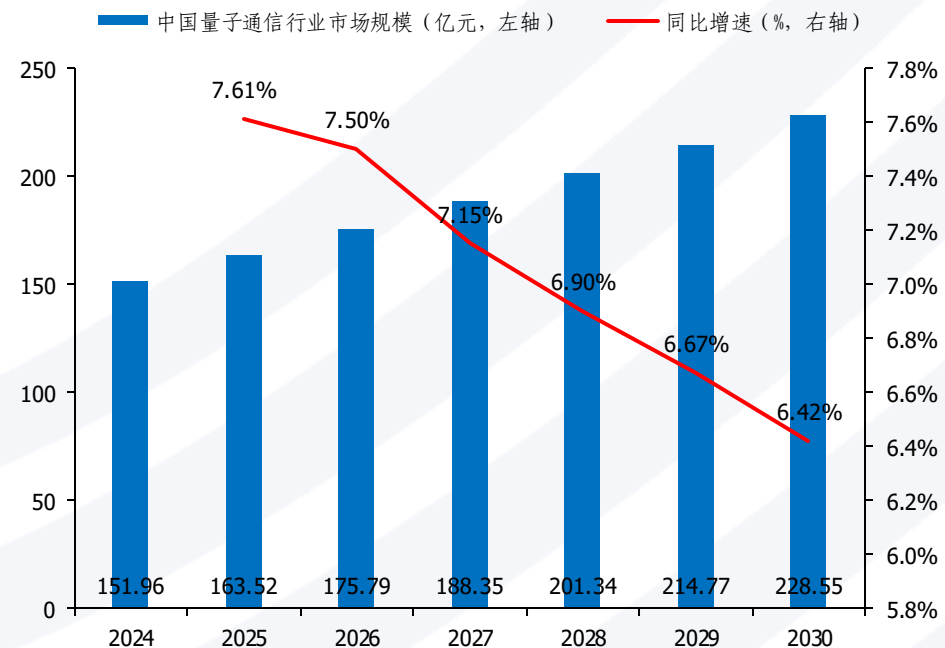
图表：2022-2030年全球量子通信市场规模预测（亿美金）



图表：2022-2025年全球QKD下游应用预测（%）



图表：2024-2030年中国量子通信行业市场规模及增速预测





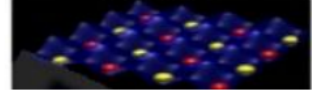


# 第三章：量子计算

### 3.1 量子计算提供指数级加速，拥有五大技术路径

- 量子计算：以量子比特为基本单元，利用量子叠加和干涉原理实现并行计算，能够在某些集散复杂问题上提供指数级加速。
- 量子计算主要分类两大类：以超导和硅半导为代表的人造粒子路线，第二是以离子阱、光量子和中性原子为代表的天然粒子路线。人造粒子路线可重用半导体集成电路制造工艺，在比特数量扩展方面有一定的优势，但是在提升逻辑门精度等指标方面受到基础材料和加工工艺等限制。天然粒子具有长相干时间和高逻辑门精度等优势。

图表：量子计算的技术路径

技术路线	超导	离子阱	硅半导体	光子	中性原子
原理与优势	 <p>&gt;超导约瑟夫森结形成二能级系统。 ✓保真度较高、门操控速度快、集成电路兼容、可设计性较高。</p>	 <p>&gt;利用电荷与磁场间所产生的交互作用力约束带电离子。 ✓保真度高、相干时间长、制备读取效率高。</p>	 <p>&gt;硅同位素量子点电子自旋作为二能级系统。 ✓半导体兼容性、门操作速度快。</p>	 <p>&gt;使用光子多种自由度构建量子位。 ✓环境友好性、保真度高、相干时间长。</p>	 <p>&gt;利用光镊或光晶格囚禁原子悬浮在超高真空中。 ✓保真度高、相干时间长、构建多维阵列潜力。</p>
典型成就	<p>中科院：41位“庄子”芯片模拟侯世达蝴蝶拓扑物态。 中国科大：“祖冲之二号”可操纵量子比特数达176。 Rigetti:84位量子处理Ankaa-1。</p>	<p>华翊量子：37位离子阱量子计算原型机HYQ-A37。 Quantinuum:H2系统实现32位全连接量子比特；H1-1量子系统量子体积达到524288。</p>	<p>Intel:12位硅基自旋量子芯片Tunnel Falls。 中科院：实现硅自旋翻转速率超过1.2 GHz的自旋量子比特超快操控。</p>	<p>中国科大：255光子量子计算原型机“九章三号”。 玻色量子：100比特相干光子伊辛机“天工量子大脑”。</p>	<p>微尺度国家研究中心：实现光晶格中基于自旋交换的量子纠缠。 Atom computing:1180量子比特的中性原子量子计算原型机。</p>
发展趋势	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆增加比特规模、探索可扩展性机制</li> <li>◆提升保真度</li> <li>◆延长相干时间</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆更高性能离子阱</li> <li>◆扩展单离子阱计算架构下的比特数量</li> <li>◆研制稳定激光系统</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆降低测控信号量子位噪声影响</li> <li>◆提纯材料以延长相干寿命</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆研制高性能的光源与光子探测器</li> <li>◆改进光子集成芯片</li> <li>◆研制光子间纠缠的方案</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆提升精确测控能力</li> <li>◆降低原子所受碰撞影响</li> <li>◆研究多维阵列连接方式</li> </ul>

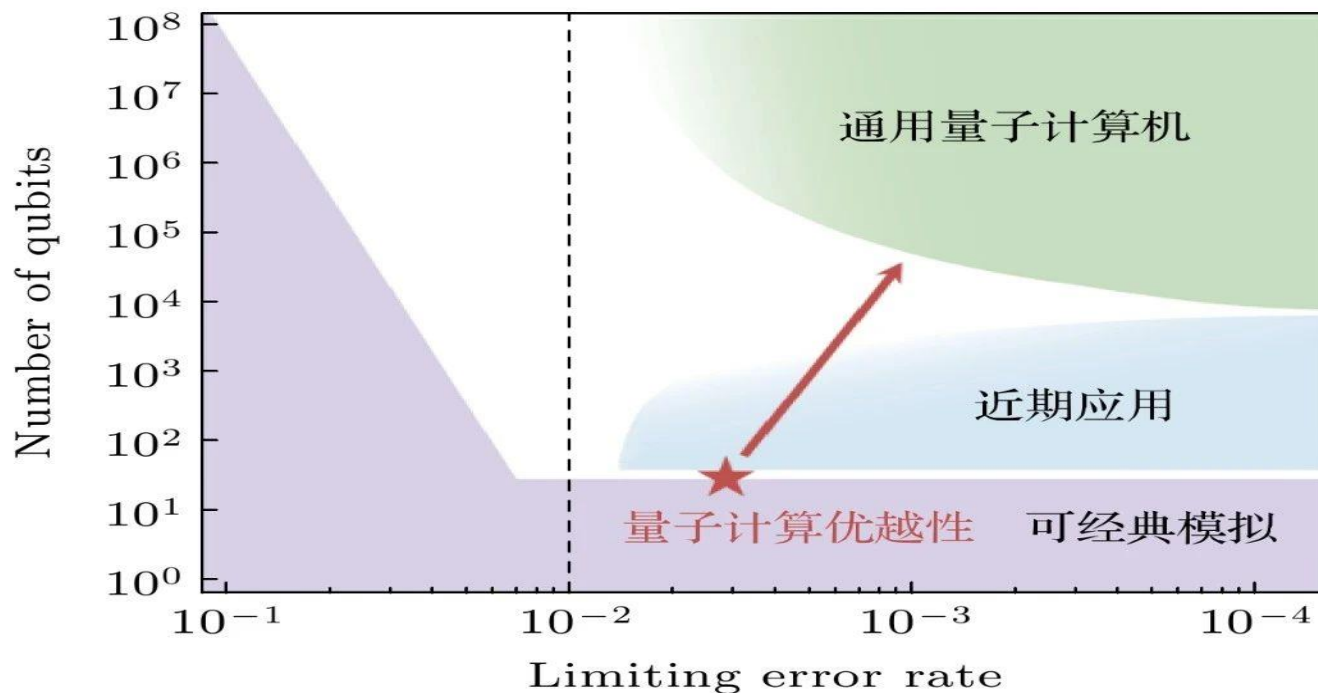
## 3.2 量子计算具有强大的并行计算和模拟能力

### ■ 量子计算的三个阶段:

1. 实现“量子计算优越性”，即量子计算机对特定问题的计算能力超越经典超级计算机，达到这一里程碑需要约50个量子比特的相干操纵。
2. 实现专用量子模拟机，应用于组合优化、量子化学、机器学习等特定问题，为特定领域提供初步算力服务。达到这一里程碑需要实现千量子比特的相干操纵和高精度量子逻辑门，是当前的主要研究任务。
3. 在量子纠错的辅助下实现可编程通用量子计算机，即相干操纵至少数百万个量子比特，能在密码分析、新材料设计、气象预报、生物制药等方面发挥巨大作用。

目前量子纠缠是量子计算发展中的一个重要问题，由于量子计算机中的量子比特非常容易受到环境中的噪声和干扰，因为他们的状态非常不稳定，很容易失去量子特性，变成经典的比特。

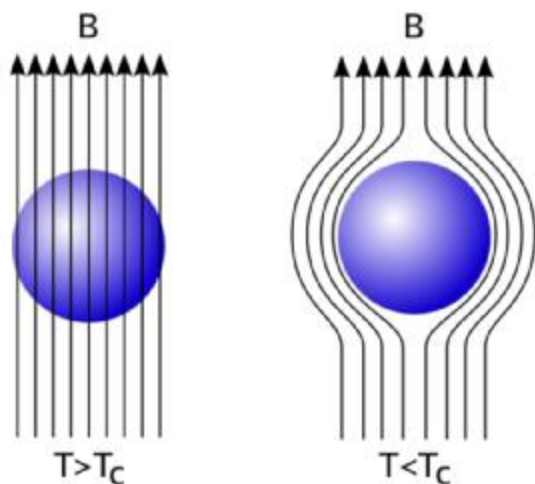
图表：量子计算的三个阶段



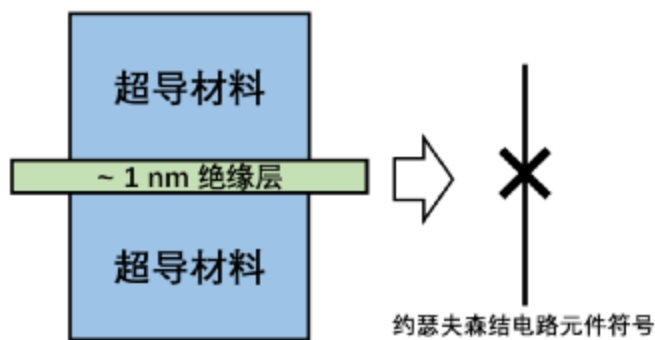
### 3.3.1 量子计算-超导技术路线

- 超导的特性：1、当超导在低于某一临界温度时（通常是零下200°C左右），材料可以无算的传输电流。从而表现出**零电阻的特性**。2、当一个处于超导状态的材料被放置在外界磁场中，超导材料的内部就会产生等值的反向的磁场，这个磁场与外部磁场相互抵消，从而是超导材料内部始终保持总磁场为零的状态，这种状态叫做**完全抗磁性**。
- **超导+量子=超导量子**：超导量子计算，利用超导材料的特殊性质，构造出一种非线性电学元件—约瑟夫森结，从而构造出可以稳定编码**0态**和**1态**的超导量子比特，最终实现具有超强计算力的量子计算。经过量子力学处理后，电路系统的系统能量只能处于某些特定的状态，这种具有分立性质的能量状态叫做**能级**。能级等距的特殊结构并不能直接用以实现量子计算，由于整个系统的能级间距是相等的，跃迁不仅仅会在**0态**和**1态**之间发生，还会在具有更高能量的能级之间发生。比如，在**1态**和**2态**，**2态**和**3态**之间发生跃迁。众多的能级之间进行无规律的跃迁无法构造出只编码**0态**和**1态**的量子比特。

图表：超导材料的完全抗磁性



图表：约瑟夫森结



- 在两个超导体之间插入一层薄薄的绝缘体（厚度在1nm量级），从而构成“超导体-绝缘体-超导体”的“三明治”结构。电路系统的能量就不再线性变化，能级越高，能级之间的间隔就会越小，这种特殊的三明治结构被称为约瑟夫森结。

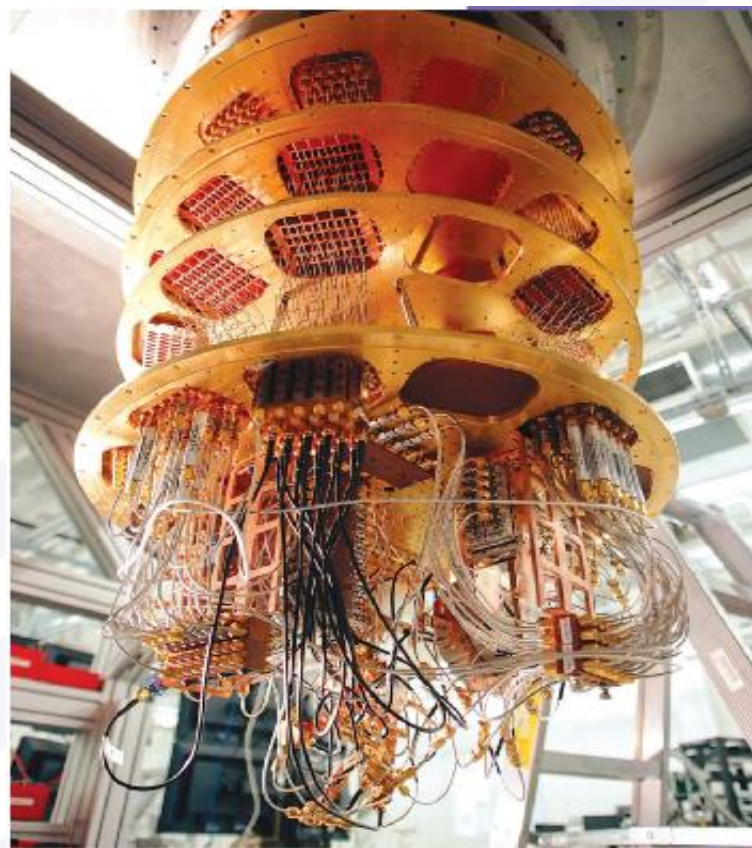
### 3.3.2 我国超导量子计算不断实现新突破

- 在超导量子计算机的发展路线中，**规模（量子比特数目）、速度和容错率**是最重要的几个指标。
- **超导量子比特的数量和质量都有了极大的提升**：相干时间由最初的ns级提升到ms级，可实现 $10^4\sim 10^5$ 的门操作；单双门保真度也分别达到了**99.9%和99%**的最低阈值；比特数量达到**100量级**，进入了含噪声中等规模量子时代（NISQ）。近些年，谷歌、IBM、中国科学技术大学团队先后公布了其最先进的量子计算机，在特定问题求解上宣布了“量子优越性”。尤其是**IBM团队**，其公布的超导量子路线图显示，计划在**2023年量子比特数量突破1000位**，到**2026年达到 $10^4\sim 10^5$ 位**。
- 在国内，中国科学技术大学潘建伟研究组**2021年**也实现了含**62个量子比特**的可编程超导量子计算原型机，本源量子公司**2021年**交付了国内首个工程化超导量子计算机“悟源”，阿里和百度等公司也在开展超导量子计算的研究。

图表：主要玩家超导量子计算的现状（截至2024年4月）

主要玩家	主要进展
IBM	2021年推出127个量子比特的处理器。 2023年12月，发布全球首个模块化量子计算系统IBM Quantum System 2，以及下一代量子处理器芯片，其中Condor（秃鹰）拥有1121个超导量子位，是业内首款1000量子位量子芯片；但是量子处理器之间使用量子接口连接，还需要电缆来连接不同的制冷剂，这些接口和电缆都会减缓处理器的速度。
谷歌	2019年，宣布其量子计算机在解决一个特定的问题上实现了量子霸权，谷歌的量子计算机用200秒就可以解决这个问题，最快的传统超级计算机需要1万年。
中国	2023年中科大扩展超导量子处理器“祖冲之二号”可操纵量子比特至176位；实现51位超导量子比特簇制备。 中科院物理所利用41位超导量子芯片“庄子” 2024年4月，量子创新院发布首颗500比特超导量子计算芯片“骁鸿”，将接入中国电信“天衍”量子计算云平台。

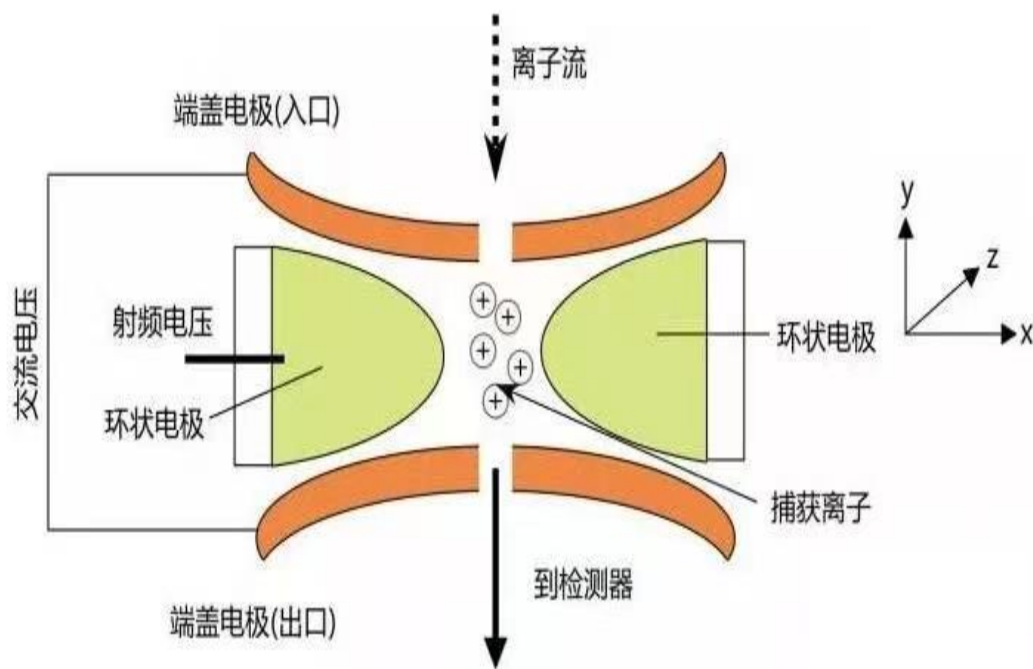
图表：谷歌的超导量子计算机



### 3.4.1 量子计算-离子阱技术

- 离子阱路线：主要利用电荷与磁场间产生的交互作用力约束带电离子，通过激光或微波进行相干操控，具有比特天然全通，操控精度高和相干时间长等优点。
- 离子阱由一对环形电极（ring electrode）和两个呈双曲面形的端盖电极（end cap electrode）组成。在环形电极上加射频电压或再加直流电压，上下两个端盖电极接地。逐渐增大射频电压的最高值，离子进入不稳定区，由端盖电极上的小孔排出。
- 离子阱相对于超导来讲，量子比特提供的门速度要慢很多（通常慢100-1000倍），但是可以通过更长的量子比特寿命和更高的保证度来弥补缺陷。

图表：离子阱工作原理图



图表：离子阱量子比特分类

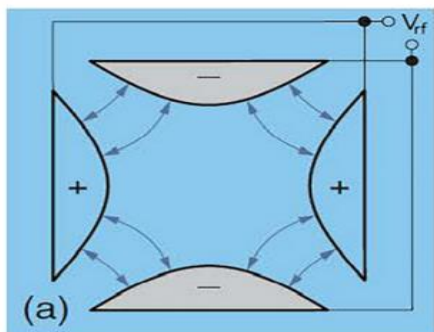
	定义	优点
Zeman塞曼量子比特	两个能级选取基态能级同一超精细能级上的两个塞曼子能级，两个能级频率差在兆赫兹（MHz）量级	量子比特寿命接近无穷长
精细量子比特	两个能级选取基态能级不同超精细结构能级上磁量子数为零的子能级，两个能级频率差在吉赫兹（GHz）量级	量子比特寿命和相干时间长
光学量子比特	一个能级位于基态能级，另一个能级位于亚稳定态能级，两个能级频率差在光学波段	操作激光处于可见光波段或红外光波段

### 3.4.2 离子阱技术的两种常见类型

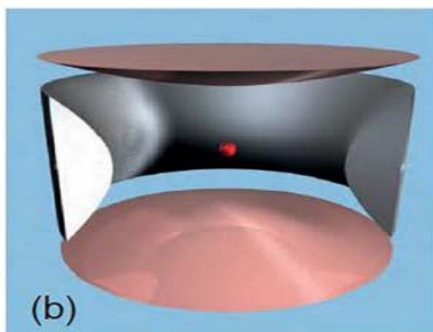
- 两种常见的类型：**Penning陷阱**，由Dehmelt提出，通过电场和磁场的组合形成电势；**Paul陷阱**，由Wolfgang Paul提出，主要是通过静态和震荡电场的组合形成电势。

图表：**Paul陷阱的几何图形**

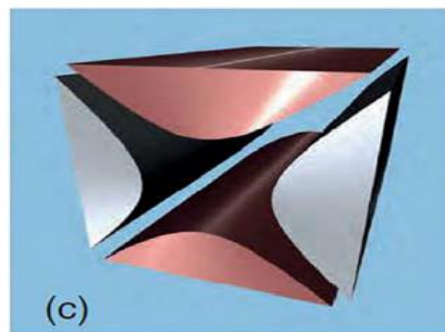
射频陷阱的基本概念，即用一组（抛物线）电极产生以射频频率振荡的四极场



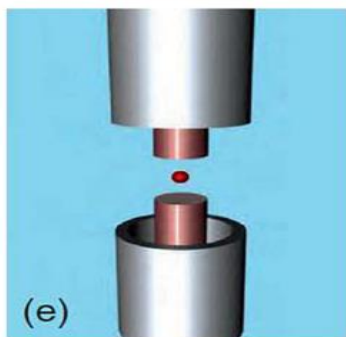
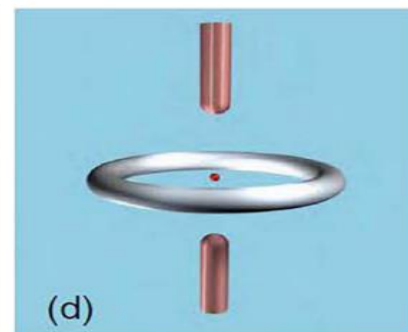
圆柱形对称的基本射频捕获器，具体是“环形和端盖”的点式陷阱几何形状



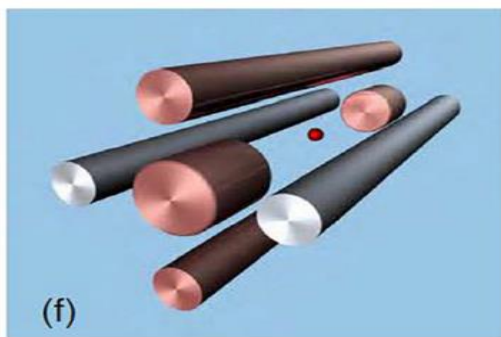
平移对称型基本射频捕获器，可用于制造一个线性陷阱。



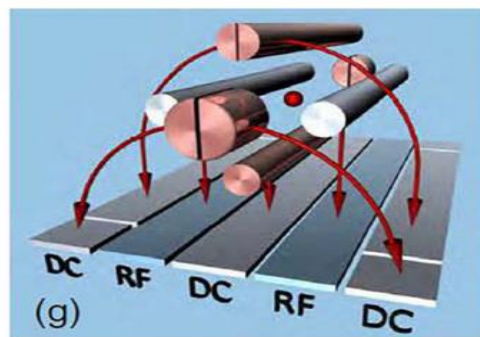
(b) 所示几何形状的拓扑等效变形



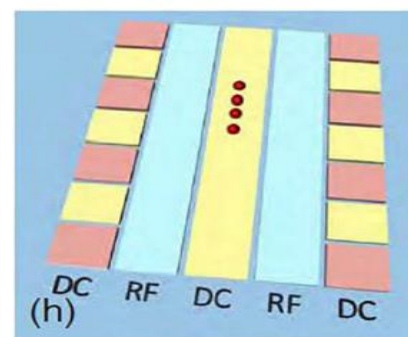
(b) 所示几何形状的拓扑等效变形



(c) 所示几何形状的拓扑等效变形，添加额外的端盖电极，形成一个四杆的线性捕获器。



(f) 中四杆诱捕器的变形，使所有的电极位于一个平面内，形成一个线性的“表面电极捕获器”。

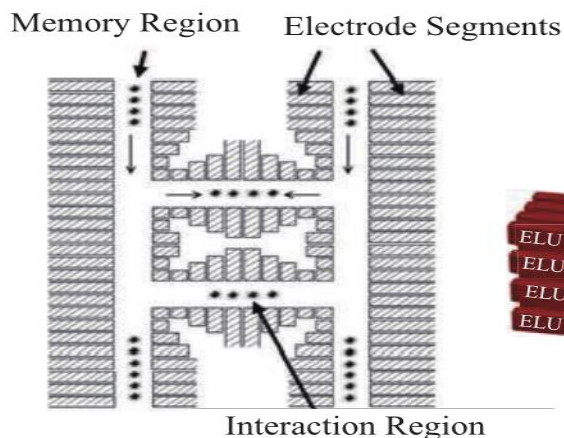


线性捕获器中的一个电极子集，可以被分割以允许沿轴向的多个区域捕集。

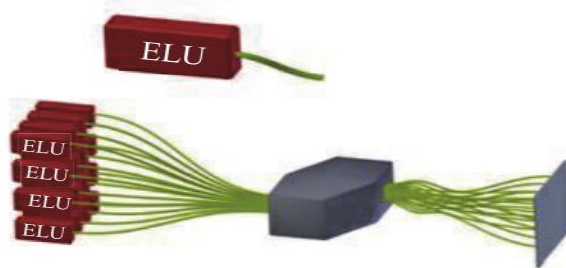
### 3.4.3 离子阱的三种拓展方案

- **QCCD方案**：将离子阱系统划分为多个子系统（或功能区域），每个子系统中囚禁少量的离子，通过在不同子系统间迁移离子来实现信息互联。
- **光量子方案**：利用光子-离子纠缠，可以实现不同离子阱系统之间的信息传递，由此可将多个离子阱系统互联，以实现更大规模的量子计算机，类似于经典计算中的分布式计算技术。光子特有的稳健性（**Robustness**）使得各个子系统之间的距离不受限制。技术瓶颈主要包括不同系统离子之间的逻辑门保真度不够高、纠缠速率不够快等
- **高维离子晶格方案**：在单一势阱中囚禁大规模离子晶体，包括一维长链、二维晶格和三维晶格。一维长链中的离子数通常在百量级，但若制备二维或三维晶格，则离子数将快速扩展到上千甚至上万。
- **QCCD使用迁移离子来传递信息，而光量子计算网络方案则使用光子来传递信息**。它们共同的出发点是在小系统中可以实现少量离子的稳定囚禁和高保真操控，子系统中离子数规模通常认为需要控制在百个以内。而具备实用价值的大规模量子计算往往需要十万甚至百万的量子比特，
- **高维离子晶格方案+光量子计算网络方案或将最适合大规模扩展**：利用现有成熟低温阱技术，在单一离子阱中实现二维或三维离子晶体的稳定囚禁和操控，使得量子比特数量快速提升至成千上万甚至十万量级，再通过光量子计算网络方案的分布式架构，将多个离子阱系统互联互通；通过离子-光子纠缠以及光子传输实现不同节点之间的连接，以及分布式的量子计算网络。

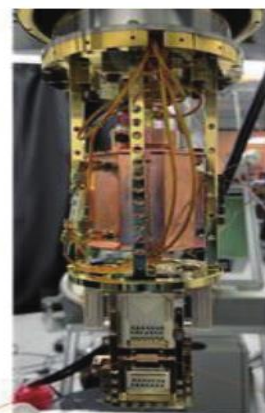
图表：离子阱的三种拓展方案



(a) QCCD 方案<sup>[39]</sup>



(b) 光量子计算网络方案<sup>[40]</sup>

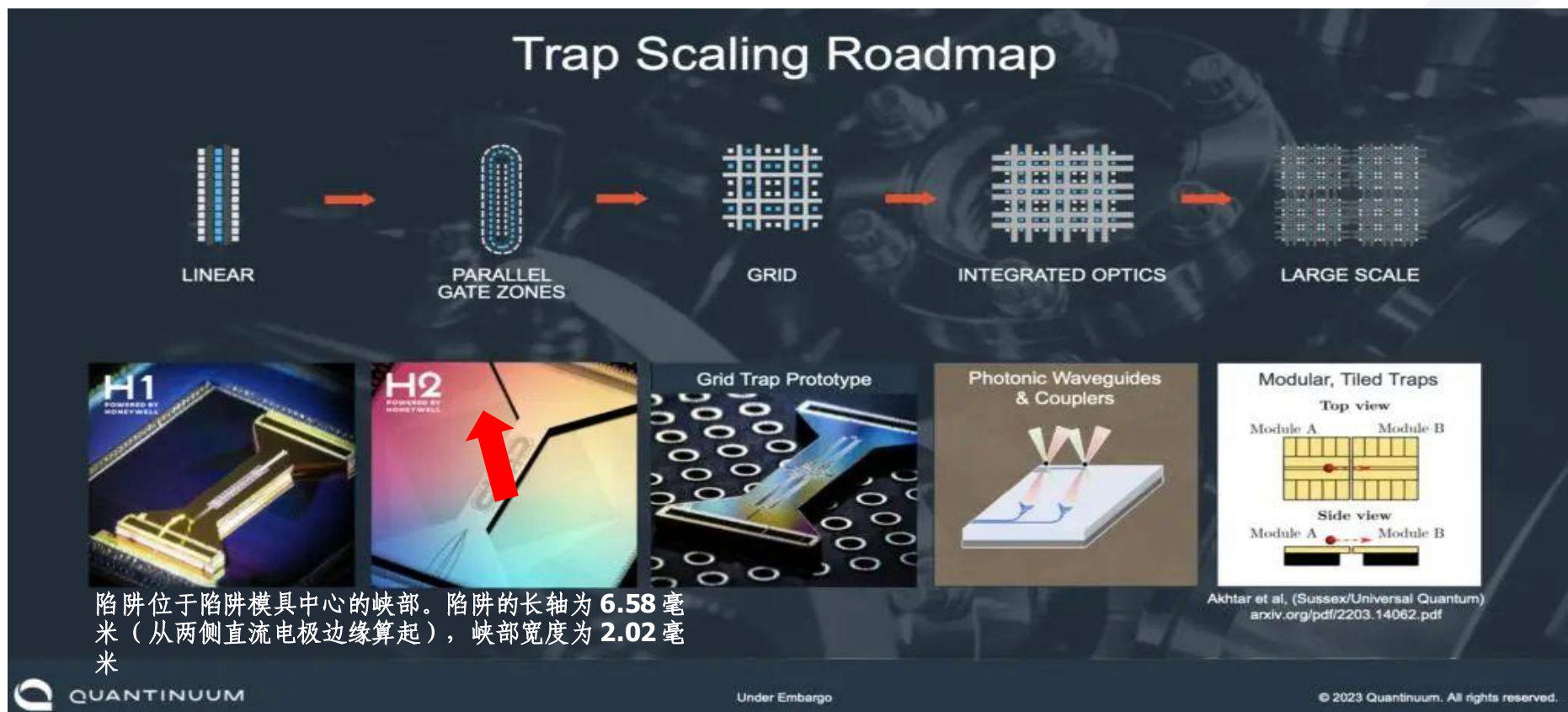


(c) 高维离子晶格方案

### 3.4.4 Quantinuum: 首台实现99.914(3)%双量子比特门保真度的商用量子计算机

- 2021年从国防承包商巨头霍尼韦尔分拆并收购英国量子公司Cambridge Quantum后，Quantinuum公司开始全力发展量子计算机。
- 最初的H1处理器，仅拥有10个量子比特，其QV为128（或 $2^7$ ），从H1中获得的所有改进和经验应用到下一代H2处理器中，该处理器目前支持32个量子比特。2024年，其离子阱量子计算机成为首台实现**99.914(3)%**双量子比特门保真度的商用量子计算机，QV体积超过**100万**，并以指数级增长。
- 模型H2: 基于新型QCCD架构的离子阱量子计算机，即Quantinuum系统模型H2，他们能够在不增加错误率的情况下增加量子比特的数量（从20到32）。新系统成功地融合了对未来可扩展性至关重要的多项技术，包括电极广播、多层射频路由和磁光陷阱(MOT)加载，同时保持甚至在某些情况下超越了先前QCCD系统的栅极保真度。

图表：Quantinuum量子计算路线图



陷阱位于陷阱模具中心的峡部。陷阱的长轴为 6.58 毫米（从两侧直流电极边缘算起），峡部宽度为 2.02 毫米

Akhtar et al, (Sussex/Universal Quantum)  
arxiv.org/pdf/2203.14062.pdf

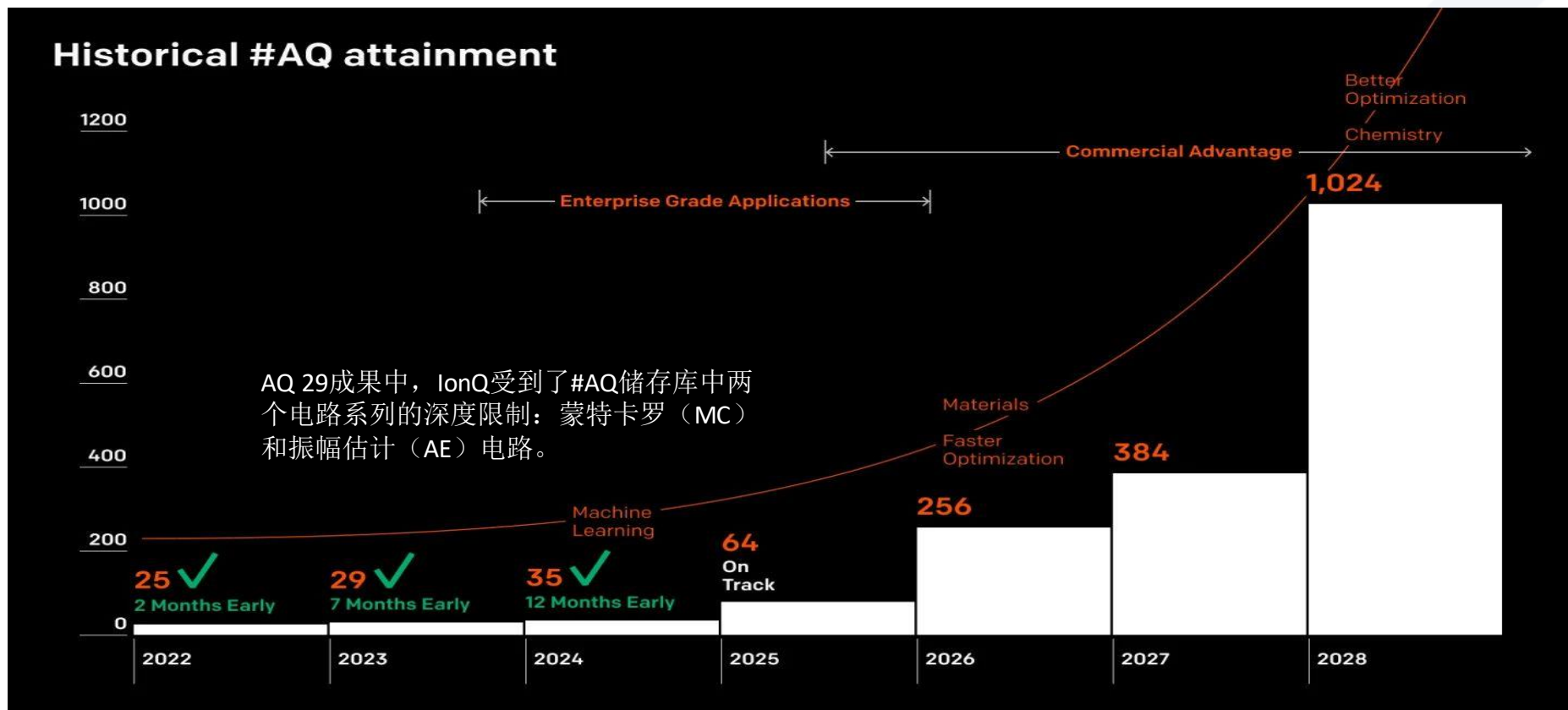
Under Embargo

© 2023 Quantinuum. All rights reserved.

### 3.4.5 离子阱：IonQ

- IonQ 由马里兰大学和杜克大学教授Christopher Monroe和Jungsang Kim于2015年共同创立，IonQ的硬件基于俘获离子架构。IonQ在最大的量子行业联盟QED-C的基础上，推出了一个名为Algorithmic Qubits (#AQ)的基准，系统提供的#AQ越高，量子计算机就能为合作伙伴和客户创造更多商业价值。
- #AQ35的优点：首先，量子比特数从30个增加到36个。由于对可配置AOD进行了优化，这些额外的量子比特的增加不会影响栅极保真度或连接性。其次：#AQ 35编译器通过应用新颖的编译策略，有效地搜索电路中重复的小量子比特块，将MC的双量子比特门数减少了97%，仅为26门；将AE的双量子比特门数减少了95%，仅为36门。

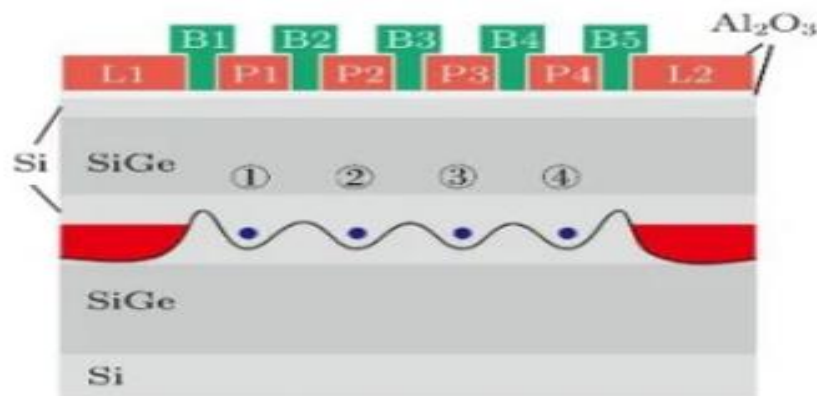
图表：IonQ软件和硬件的路线图



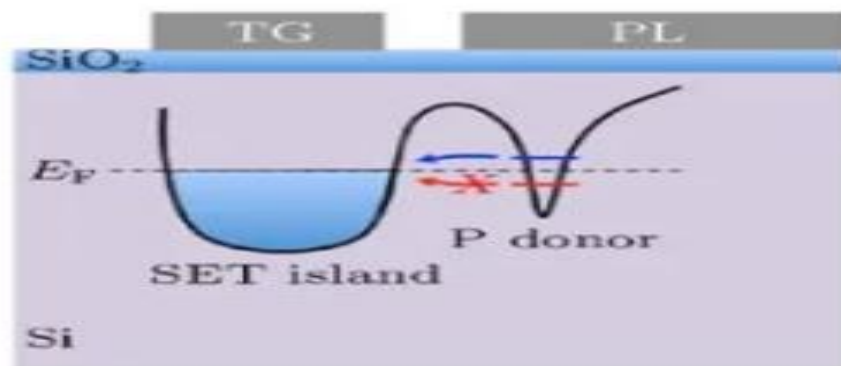
### 3.5.1 量子计算-硅半导体技术

- 1998年，DiVincenzo和Loss率先提出采用半导体量子点中电子自旋作为量子比特的载体来构建量子计算机，被认为是半导体量子计算研究的开端。
- **硅基自旋量子比特**：指利用硅基衬底量子点中的**束缚电子(空穴)或原子核的自旋量子态**编码形成的量子比特，其中硅/硅锗(Si/SiGe)异质结、锗/硅锗(Ge/SiGe)异质结以及硅金属氧化物半导体/二氧化硅(SiMOS或Si/SiO<sub>2</sub>)是目前研究最多的硅基衬底材料。利用微纳米加工技术在这些衬底表面制备金属栅极，**给栅极施加一定的电压以在衬底中构成电势阱**，进而束缚衬底中的自由电子(空穴)形成一个孤岛，即半导体量子点。

图表：硅半导体量子期间结构图



Si/SiGe四量子点器件结构图



硅中掺<sup>31</sup>P原子量子点装置图

- 栅极Pi控制量子点的化学势，栅极Bi控制量子点间的势垒以及量子点和电子库的隧穿速率。调控栅极使得量子点中仅占据单电子时，在一定大小外磁场作用下，电子的自旋态劈裂为自旋↑和自旋↓态，这两个自旋态构成良好的二能级系统，用于编码形成电子自旋量子比特。
- **可调性较高**，并且可以和现代先进集成电路制造工艺完美兼容，而具有非常突出的扩展优势。

- 硅衬底中采用离子注入或扫描隧道显微镜氢光刻技术掺入杂质或引入缺陷，如掺入施主<sup>31</sup>P原子，利用其原子核的势场囚禁电子形成量子点，<sup>31</sup>P原子核及其结合的电子均可用于量子比特编码，分别构成核自旋量子比特和电子自旋量子比特。
- 掺杂<sup>31</sup>P的量子点体系，虽然电子自旋比特，尤其是核自旋比特具有超长的相干时间，但是其特征尺寸接近原子尺度，在比特的独立调节以及操控方面存在很大的挑战，目前**仍缺乏可靠的扩展方案**。掺杂<sup>31</sup>P的硅基单原子体系中核自旋比特具有超长的退相干时间，可以用于量子信息的存储单元，

## 3.5.2 硅半导体量子计算现状：我国实现硅基锗量子点超快调控

- 硅半导体路线得到Intel等传统半导体制造商支持，由于同位素材料加工和介电层噪声影响等瓶颈限制，比特数量和操控精度等指标上升缓慢。
- 英特尔一直是硅晶体管技术（用于经典计算机）主要先驱之一，英特尔在量子计算竞争中最大的优势应该是利用硅晶体管构建高性能计算模块方面的能力。最近几年，英特尔也在研发自己的量子芯片，而且走的是硅自旋量子技术路线，且使用传统的CMOS半导体工艺就能生产。2023年发布12位硅基自旋量子芯片Tunnel Falls。
- 2023年，中国中科大实现硅基锗量子点超快调控，自旋翻转速率超过1.2GHz。

图表：硅半导体量子计算存在的瓶颈

### 01 实现高保真度的逻辑门

当比特的数目增加后，栅极串扰等因素会显著增加量子点参数的调控的复杂度，降低门操作保真度，目前Si/SiGe量子点实现高保真度的单比特们，双比特门保真度仍未90%

### 02 测试线路、制冷设备要求提升

目前普遍采用商用的仪器设备在室温控制信号，经过逐级降温的信号线传输至极低温的量子芯片实现比特控制，但是受限于制冷机的量和空间，控制线的数量存在瓶颈，可能的解决办法之一是将量子比特测控芯片并集成在制冷机内部

### 03 量子比特芯片的制造设备

实验室级别的微纳技术工艺已不能满足需要，需要引入先进的半导体工业技术。

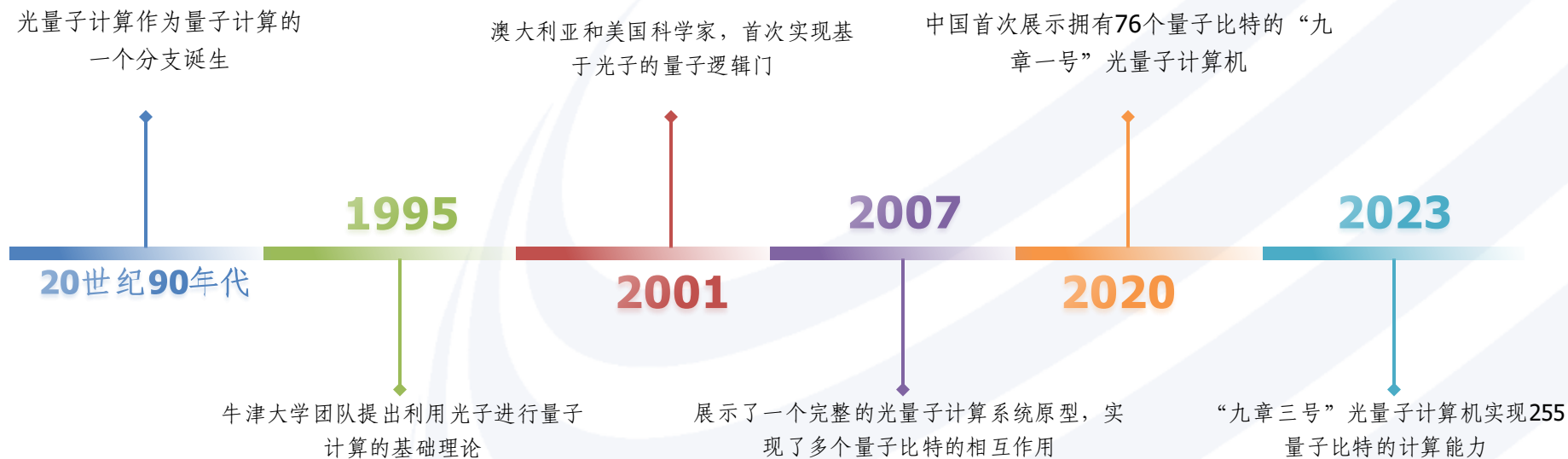
### 04 远距离量子比特间的信息传递

微波谐振腔是一种可靠的信息传递媒介，目前国际上基于微波谐振腔已经实现了电子自旋与微波光子的强耦合以及微波光子介导的远距离自旋比特间的耦合

## 3.6 光量子计算：没有相对劣势的技术路线

- 光量子计算：量子比特信息编码在单个光子上，通过对光子进行量子操控及测量来完成计算。与超导、离子阱、半导体等技术路线相比，光子与外部环境的相互作用极其微弱，无需真空和低温；信息存储量大、热量散发少、能耗相对较小；兼容量子通信。光量子计算是没有相对劣势的技术路线。
- 光量子的计算机的工作原理：光量子计算机依靠光子（自然界的光粒子），通过激光和各种光学元件来操控光子，实现复杂的量子运算，运算通过特殊设计的光学网络实现，比如光束分束器和相位移位器。
- 从分类上来讲：逻辑门型光量子计算和专用光量子计算两类，以玻色采样和相干伊辛为代表的光量子研发成比较多。
- 光量子目前主要面临，技术复杂性（精密的光学组件等）、可扩展性以及相关软件和算法的限制。

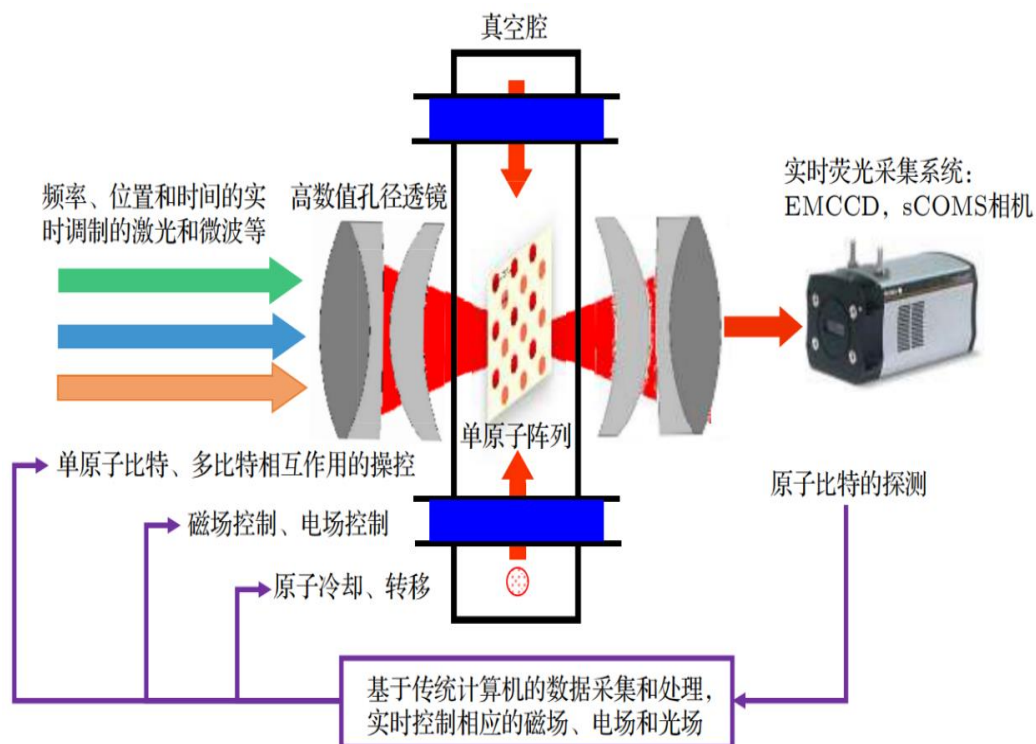
图表：光量子计算的发展史



## 3.7 量子计算-中性原子路线

- 中性原子路线：中性原子是指核外电子等于核内质子数的原子，具有全同性，且处于低能态的特点。量子信息被编码成非常稳定的低能原子态，因此中性原子作为量子比特具有长的长干时间。全同性使得中性原子比特不像超导电路或硅自旋量子比特那样存在异质性。
- 里德堡态：通过发射激光脉冲，中性原子可以进入一种高激发态，称为里德堡态，实现它们之间的相互纠缠。里德堡原子指的是外层电子被激发到主量子数 $n$ 很大的高激发态原子，由于里德堡原子的主量子数 $n$ 很大，因此它们之间的相互作用很强。

图表：中性单原子量子计算的概念架构



图表：基于里德堡相互作用的中性原子量子计算的特点

### 01 相干时间长

中性原子体系采用原子基态超精细能级的磁子能级编码量子比特，目前中性原子体系中单比特相干时间已经超过12.6秒，这一指标超过了目前大多数量子计算的候选体系。

### 02 可控的相互作用

基于里德堡态原子的偶极-偶极相互作用是一个长程的、强度比基态相互作用大12个量级的相互作用，可有效控制两比特逻辑门的操控时间，并通过多种方式进行调整。

### 03 良好的扩展性和灵活性

中性原子体系可以实现上千个原子，并且其构型灵活可变，结合里德堡态原子的多比特逻辑门，可优化并提高算法的适应性

### 3.8 上游环境测控产业链条完备，下游应用场景多元发展

图表：量子计算产业链

产业链	国际	国内	
上游 环境与测控	稀释制冷机	BLUEFORS Leiden Cryogenics OXFORD INSTRUMENTS LT LAB CryoConcept Janis ULT FORM FACTOR ULVAC ULVAC CRYOGENICS INC.	CryoPride PHYSIKE Tsinghua Scientific Instruments
	测控系统	Zurich Instruments QM QUANTUM MACHINES QBLOX KEYSIGHT TECHNOLOGIES Mento Systems	ZND 宇瞻通信 国盾量子 QuantumCTek
	低温组件	STAR CRYOELECTRONICS Atlantic Microwave Lake Shore COOLIDGE AmpliTech	赋闻量子 PROTEC- 中微通信
	真空系统	Joh. Jen. JVC Kurt J. Lesker Leybold Agilent EDWARDS PFEIFFER VACUUM	FERMI 力美特真空技术(北京)有限公司 LianYi
	激光器	M NKT Photonics THORLABS TOPTICA nLIGHT OEwaves	precislasers 精准激光 HOTTECH Accelink
	光学探测器	SINGLE QUANTUM SCONTEL Photon Spot Pixel Photonics	赋闻量子 PROTEC SIMINICS CETC
中游 原型机	超导	IBM Google rigetti IQM OQC bleximo ATLANTIC QUANTUM seeqc qci Nerd	本源量子 ORIGIN QUANTUM Baidu 百度 CETC SPINQ
	离子阱	QUANTINUUM IONQ AQT oxford ionics LQ eleQtron	光瑞电子 QUDCOR 启科量子 么正量子
	光量子	XANADU PsiQ QUANDELA ORCA QUIX	本源量子 ORIGIN QUANTUM
	硅半导体	intel Riken Quantum Computing NTT equal 1 QUANTUM MOTION EeroQ C12 HITACHI photonics	本源量子 ORIGIN QUANTUM
	中性原子	atom computing ColdQuanta PASQAL IQEra NanoQT planqc	中科院量子 CHINA QUANTUM
	其他	Microsoft (拓扑) D-WAVE (量子退火) QUANTUM BRILLIANCE (NV色心)	BosonIQ 玻色量子 (CIM) SPINQ (核磁)
软件	HORIZON softwareQ Q-CTRL ENTROPICA LABS QUBIT parityqc QuantumOx Light Solver Quantum South QADIS SAVANTIX river Lane	CLASSIQ QUANTASTICA MYRS blueqat	Baidu 百度 HUAWEI 本源量子 ORIGIN QUANTUM
	IQBit Quemix Qu & Co HO QuantFi QCWARE GOOD CHEMIST ProteinQure QUANTUM ZAPATA QCI POLARIS MAVINS CogniFrame inspirationQ QSIMULATE QNOVA Qubit	ARC LIGHT 本源量子 腾讯量子实验室 Tencent Quantum Laboratory 京东探索研究院 JD EXPLORE ACADEMY	
下游 云平台	IBM aws XANADU rigetti Quantum Inspire - By QuTech QMware	HUAWEI Baidu 百度 本源量子 ORIGIN QUANTUM	
	Google QUANTINUUM Microsoft IONQ IQEra COMPUTING INC. STRANGE WORKS PASQAL	国盾量子 QuantumCTek ARC LIGHT 本源量子 中国移动 China Mobile	
应用探索	JPMorgan Booz   Allen   Hamilton SAMSUNG JSR BCG accenture AFORÉ	建信金科 CCB FinTech 光大科技有限公司 EVERBRIGHT TECHNOLOGY CO. LTD. 中国移动 China Mobile 中国民生银行 CHINA MINSHENG BANK	

### 3.9 量子计算市场蓝海广阔，未来将实现多场景应用

- **短期投资大于收入：**IDC预测，2022年量子计算的销售额将达到**11亿美元**，并将以**48.1%**的复合年增长率增长，到2027年达到**76亿美元**。IDC还预计，2023-2027年预测期间，量子计算市场的投资将以**11.5%**的复合年增长率增长，到2027年底达到近**164亿美元**。

图表：量子计算应用场景分析

行业领域	关键环节	问题原型	应用时间(+代表影响力)			产业估值(亿美元)	
			3~5年	5~10年	10年以上	保守估值	乐观估值
金融	金融服务	组合优化 人工智能	++	++	+++	~3940	~7000
能源与材料	传统能源	量子模拟 组合优化 人工智能	+	++	++	~100	~200
	可持续能源		+	++	+++	~100	~300
	化工		++	++	+++	~1230	~3240
生命科学	制药	量子模拟 组合优化 人工智能	++	++	+++	~740	~1830
先进工业	汽车	人工智能 量子模拟 组合优化	++	++	+++	~290	~630
	航空航天与国防	因式分解 量子模拟 组合优化	+	++	++	~300	~700
	电子产品	因式分解 量子模拟 组合优化	+	++	++	~100	~200
	半导体		+	++	++	~100	~200
电信传媒	电信	量子模拟 组合优化	+	+	++	~100	~200
	传媒					~100	~200
出行、运输和物流	物流	组合优化 量子模拟 人工智能 因式分解	+	++	++	~500	~1000

# 投资建议

- 网络运营/平台：中国移动、中国联通、中国电信
- 软件平台：神州信息
- 量子计算/通信：国盾量子
- 量子芯片：国芯科技
- 光纤光缆：亨通光电
- 元器件：腾景科技、光迅科技

**技术研发不及预期风险：**量子通信技术尽管进展迅速，但仍处于相对早期的发展阶段。技术研发的不及预期是影响其广泛应用的关键因素。

**监管政策不确定性风险：**政策环境的变化可能会影响项目的批准、资金的流向以及技术标准的制定，从而对行业的发展造成不利影响。

**供应链不稳定风险：**量子通信行业的发展依赖于一个稳定且成熟的供应链体系。量子通信作为一项高精尖技术，相关组件和材料的供应可能受到限制。

**宏观经济环境波动风险：**若宏观经济环境出现下行波动，可能会对量子通信行业的资金筹集和投资活动产生负面影响，进而影响技术的研发和商业化进程。

## 免责声明

长城证券股份有限公司（以下简称长城证券）具备中国证监会批准的证券投资咨询业务资格。

本报告由长城证券向专业投资者客户及风险承受能力为稳健型、积极型、激进型的普通投资者客户（以下统称客户）提供，除非另有说明，所有本报告的版权属于长城证券。未经长城证券事先书面授权许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制和发布，亦不得作为诉讼、仲裁、传媒及任何单位或个人引用的证明或依据，不得用于未经允许的其它任何用途。如引用、刊发，需注明出处为长城证券研究院，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。

本报告是基于本公司认为可靠的已公开信息，但本公司不保证信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、工具、意见及推测只提供给客户作参考之用，并非作为或被视为出售或购买证券或其他投资标的的邀请或向他人作出邀请。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。

长城证券在法律允许的情况下可参与、投资或持有本报告涉及的证券或进行证券交易，或向本报告涉及的公司提供或争取提供包括投资银行业务在内的服务或业务支持。长城证券可能与本报告涉及的公司之间存在业务关系，并无需事先或在获得业务关系后通知客户。

长城证券版权所有并保留一切权利。

## 特别声明

《证券期货投资者适当性管理办法》、《证券经营机构投资者适当性管理实施指引（试行）》已于2017年7月1日起正式实施。因本研究报告涉及股票相关内容，仅面向长城证券客户中的专业投资者及风险承受能力为稳健型、积极型、激进型的普通投资者。若您并非上述类型的投资者，请取消阅读，请勿收藏、接收或使用本研究报告中的任何信息。

因此受限于访问权限的设置，若给您造成不便，烦请见谅！感谢您给予的理解与配合。

## 分析师声明

本报告署名分析师在此声明：本人具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格或相当的专业胜任能力，在执业过程中恪守独立诚信、勤勉尽职、谨慎客观、公平公正的原则，独立、客观地出具本报告。本报告反映了本人的研究观点，不曾因，不因，也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接接收到任何形式的报酬。

## 长城证券投资评级说明

### 公司评级：

买入——预期未来6个月内股价相对行业指数涨幅15%以上；

增持——预期未来6个月内股价相对行业指数涨幅介于5%~15%之间；

持有——预期未来6个月内股价相对行业指数涨幅介于-5%~5%之间；

卖出——预期未来6个月内股价相对行业指数跌幅5%以上。

### 行业评级：

强于大市——预期未来6个月内行业整体表现战胜市场；

中性——预期未来6个月内行业整体表现与市场同步；

弱于大市——预期未来6个月内行业整体表现弱于市场。

行业指中信一级行业，市场指沪深300指数

## 长城证券产业金融研究院

### 深圳

地址：深圳市福田区福田街道金田路2026号能源大厦南塔楼16层

邮编：518033

传真：86-755-83516207

### 北京

地址：北京市西城区西直门外大街112号阳光大厦8层

邮编：100044

传真：86-10-88366686

### 上海

地址：上海市浦东新区世博馆路200号A座8层

邮编：200126

传真：021-31829681

# 长城研究 · 与您共成长

长城证券产业金融研究院