
量子纠缠网络研究进展

李传锋

中国科学技术大学中科院量子信息重点实验室

哈尔滨 2018年1月

报告提纲

- 一、量子纠缠网络
- 二、固态量子存储器
- 三、总结

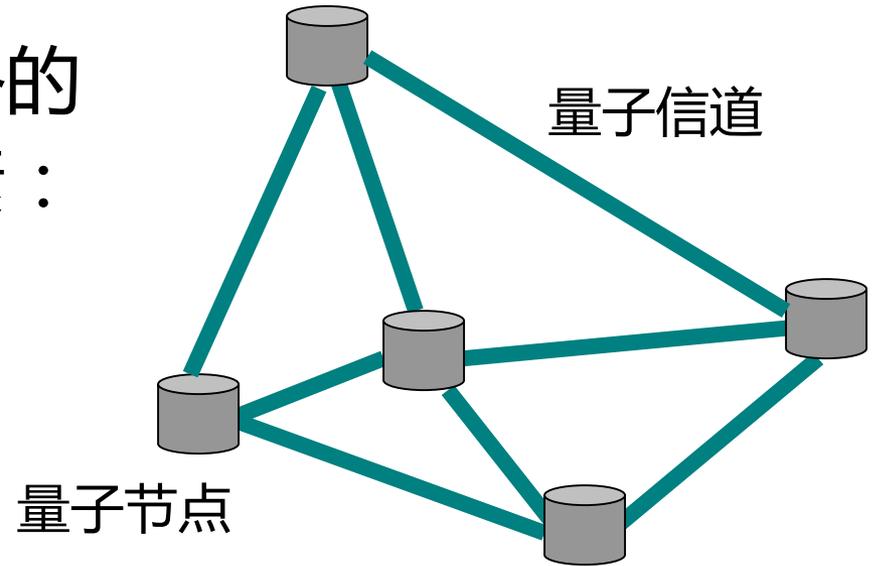
报告提纲

- 一、量子纠缠网络
- 二、固态量子存储器
- 三、总结

量子纠缠网络

量子纠缠网络是经典网络的扩展与完善，其构成要素：

量子节点、量子信道



量子节点分为：**存储节点**和**操作节点**，完成量子信息的存储和操作。

各量子节点通过量子信道共享**多光子纠缠**！

与经典网络相比，量子网络中信息的存储和传输过程理论上绝对安全，信息的处理则更高效。

量子纠缠网络

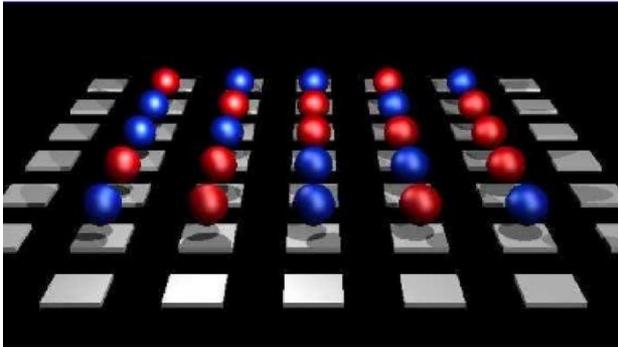
构建量子纠缠网络的任务分解

1. 构建单个节点：量子操作节点、存储节点
2. 连接多个节点：量子界面（Quantum Interface）
3. 构建长程网络：长程纠缠分发
4. 量子编码网络
5. 分布式量子计算网络

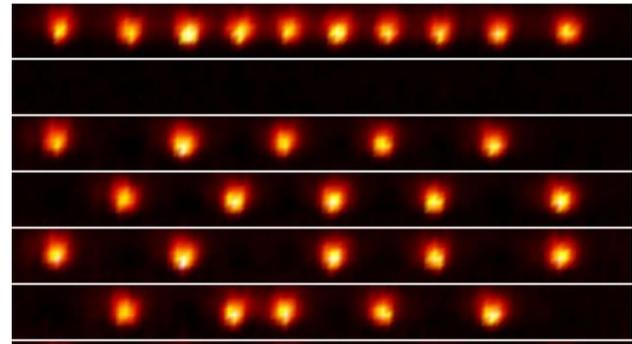
*现有光纤可以传输量子信息

量子纠缠网络

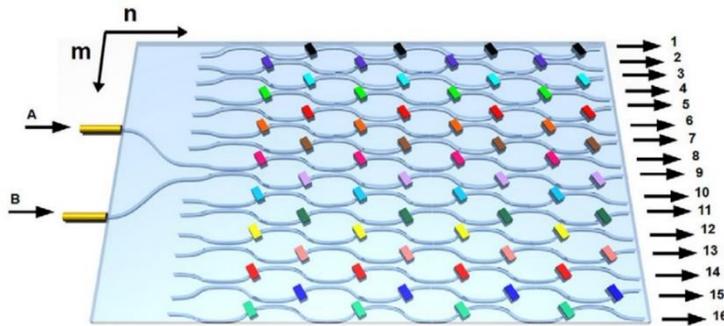
1. 构建单个节点：量子操作节点



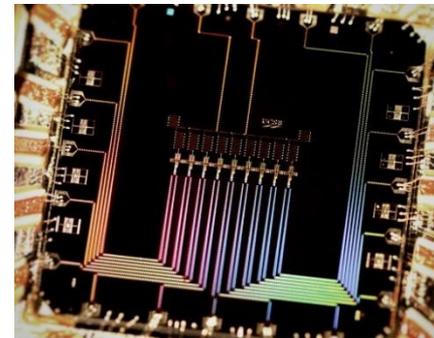
原子系统



离子系统



光子系统

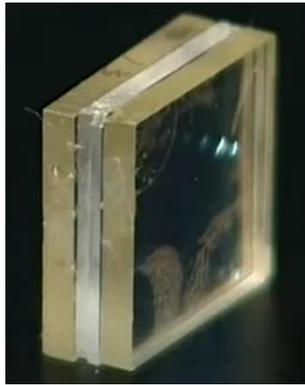


超导系统

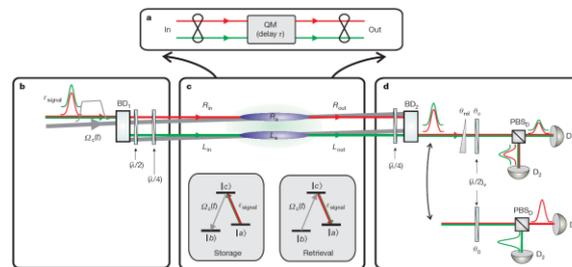
以及NV色心等系统

量子纠缠网络

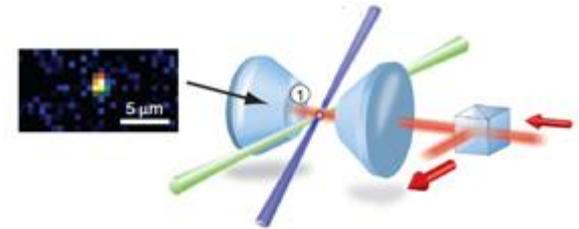
1. 构建单个节点：量子存储节点



稀土掺杂晶体



冷原子



单原子

以及热原子等系统

Z.Q. Zhou, W.B. Lin, M. Yang, C.F. Li, G.C. Guo, PRL 108, 190505 (2012)

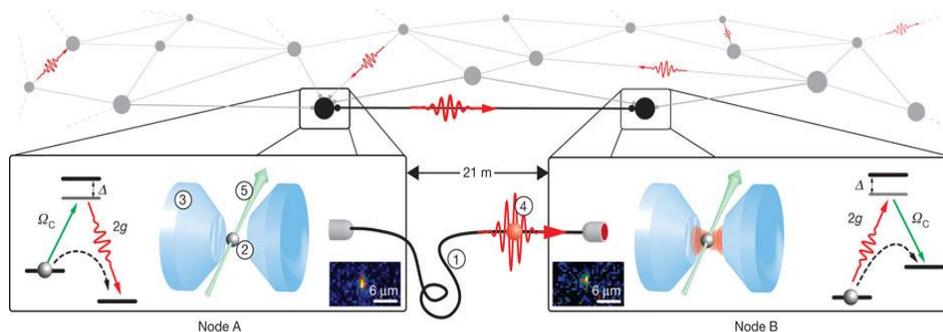
K.S. Choi, H. Deng, J. Laurat, H. J. Kimble, Nature 452, 67 (2008)

H. P. Specht, et al., Nature 473, 190 (2011)

量子纠缠网络

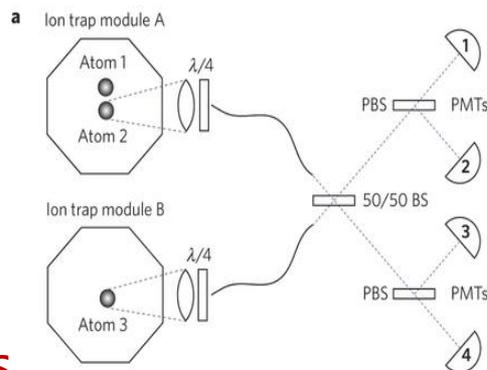
2. 连接多个节点：量子界面

- ◆ 单一系统组成的量子网络，光子的波长和线宽相匹配，连接比较容易



单原子

Atom 1 操作比特
Atom 2&3 通信比特



离子阱

- 距离：5m
- 纠缠产生率：4.5/s
- 首次存储相干时间大于纠缠制备时间

Rempe group, Nature 484, 195 (2012)

Monroe group, Nature Physics 11, 37 (2015)

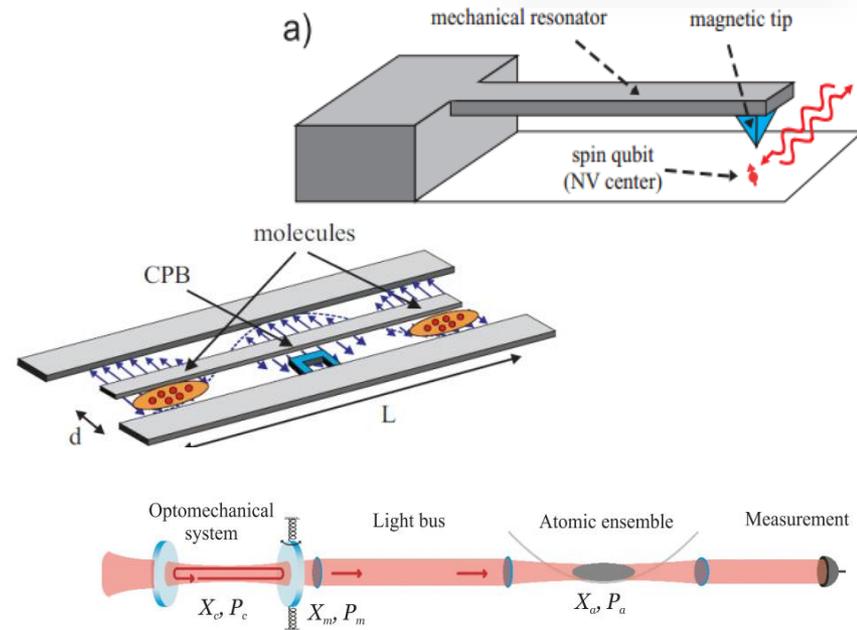
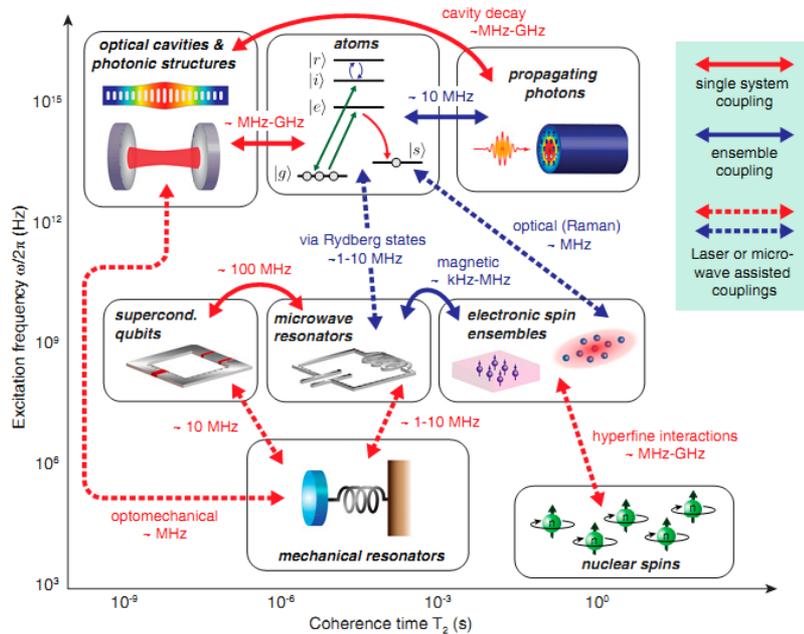
量子纠缠网络

2. 连接多个节点：量子界面

- ◆ 混合量子系统：结合不同物理体系的优点，提供全方位的量子调控手段。

原子、分子和光系统：系统与外界隔绝较好，易操控

固态系统：受益于微加工技术，具有优异可扩展性

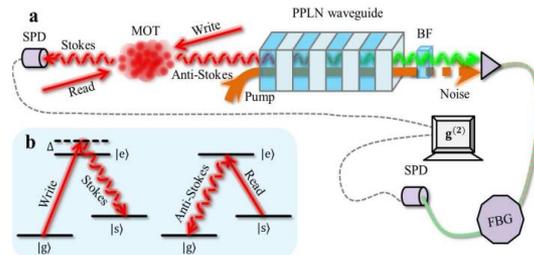


量子纠缠网络

2. 连接多个节点：量子界面

频率相干转换

B Albrecht, *et al*, Nature Comm. 4376 (2014)



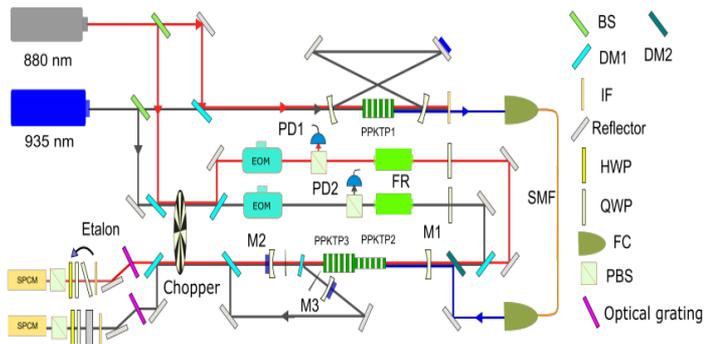
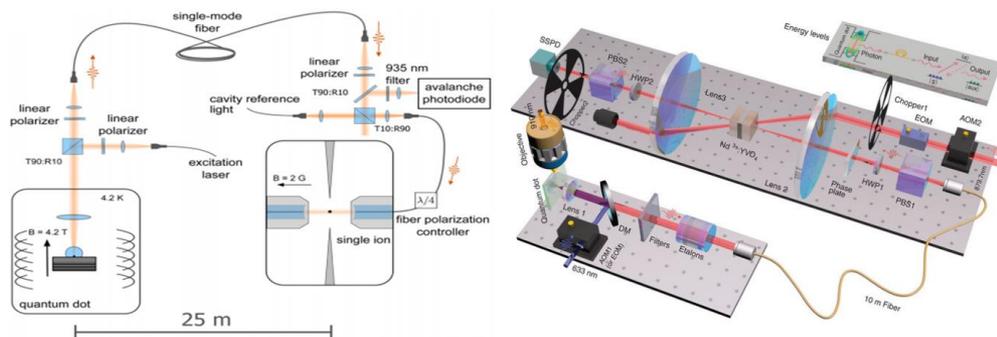
调谐一个系统的工作波长去匹配另一个系统

H. M. Meyer *et al*, PRL114.123001 (2015)

J-S Tang *et al*, Nat. Comm. 6, 8652 (2015)

制备非简并窄带纠缠光源

J. Wang, *et al*. submitted.



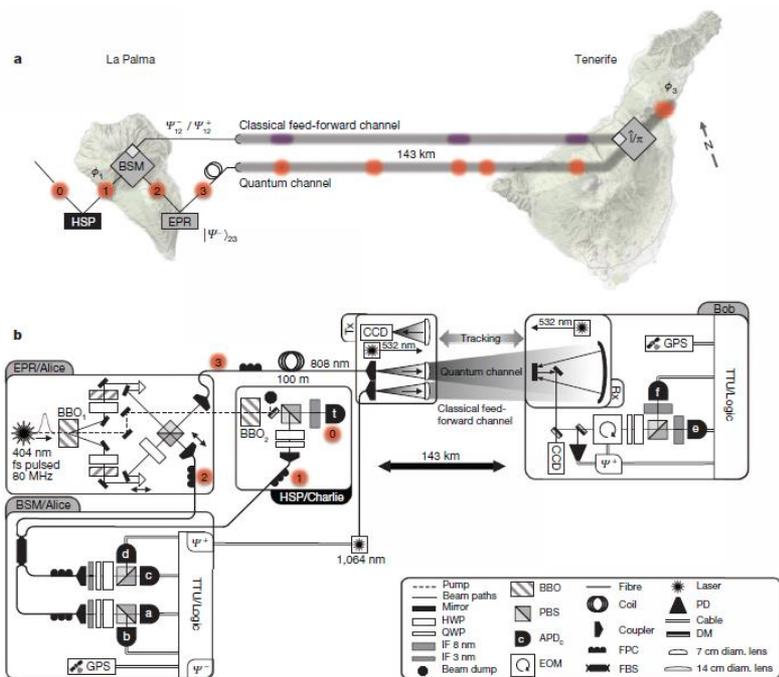
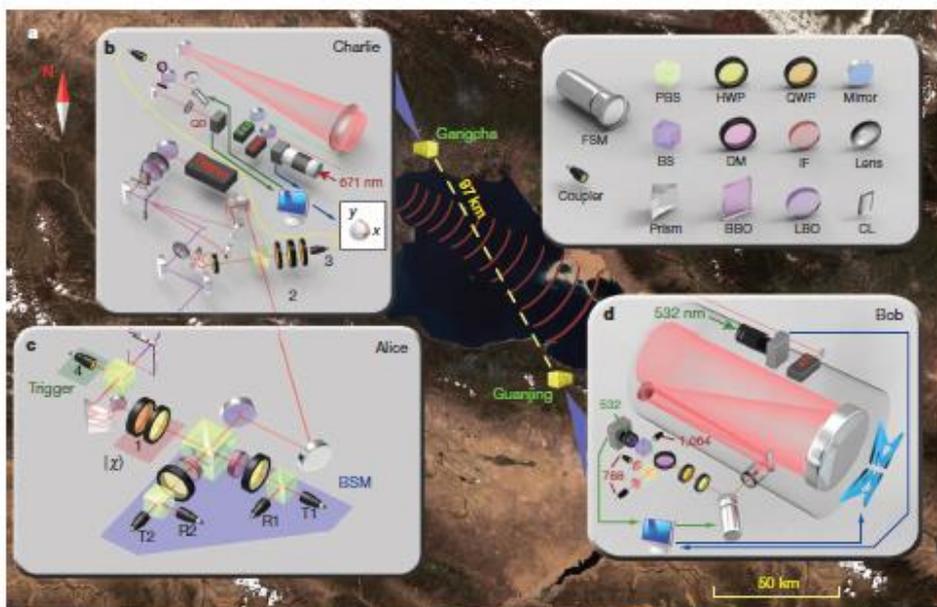
$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|H_i\rangle|V_s\rangle + |V_i\rangle|H_s\rangle)$$

双光子分别为：880nm (9.5 MHz)和 935nm (9 MHz)，可连接固态量子存储和离子阱节点

量子纠缠网络

3. 构建长程网络：长程纠缠分发

目前的纠缠分发可以到百公里



J. Yin, et al. Nature 488, 185 (2012)

X.-S. Ma, et al. Nature 489, 269 (2012)

量子纠缠网络

3. 构建长程网络：长程纠缠分发

要想传的更远呢？

- 不能直接传输

例如：光纤损耗0.2dB/km

10GHz \longrightarrow 9.5Ghz \longrightarrow 1Hz \longrightarrow 10^{-10} Hz
1km 500km 1000km



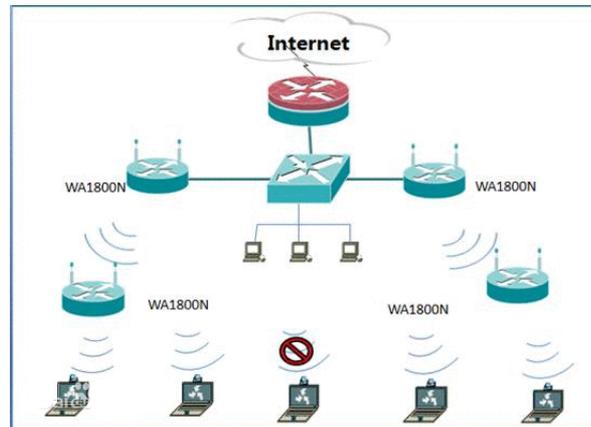
300年接收一个光子！

量子纠缠网络

3. 构建长程网络：长程纠缠分发

- 不能进行信号放大

经典通讯：信号可以用中继站放大



量子通讯：信号不能进行放大

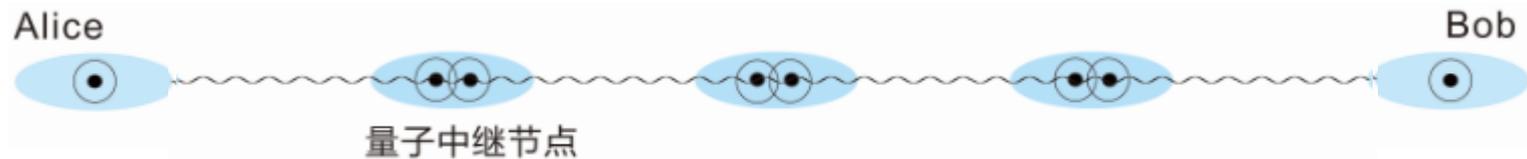
the non-cloning theorem

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \not\rightarrow (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)$$

量子纠缠网络

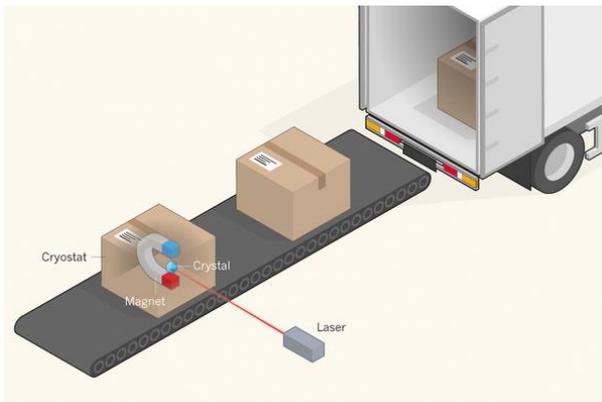
- 解决方案：基于量子存储器的远程量子纠缠分发

- 1. 量子中继: 短程纠缠的存储器+纠缠交换 → 远程量子纠缠



Rev. Mod. Phys. 83.33 (2011)

- 2. 量子U盘: 把量子信息存到超长寿命的量子存储器，然后进行经典运输，革命性的量子通信方案

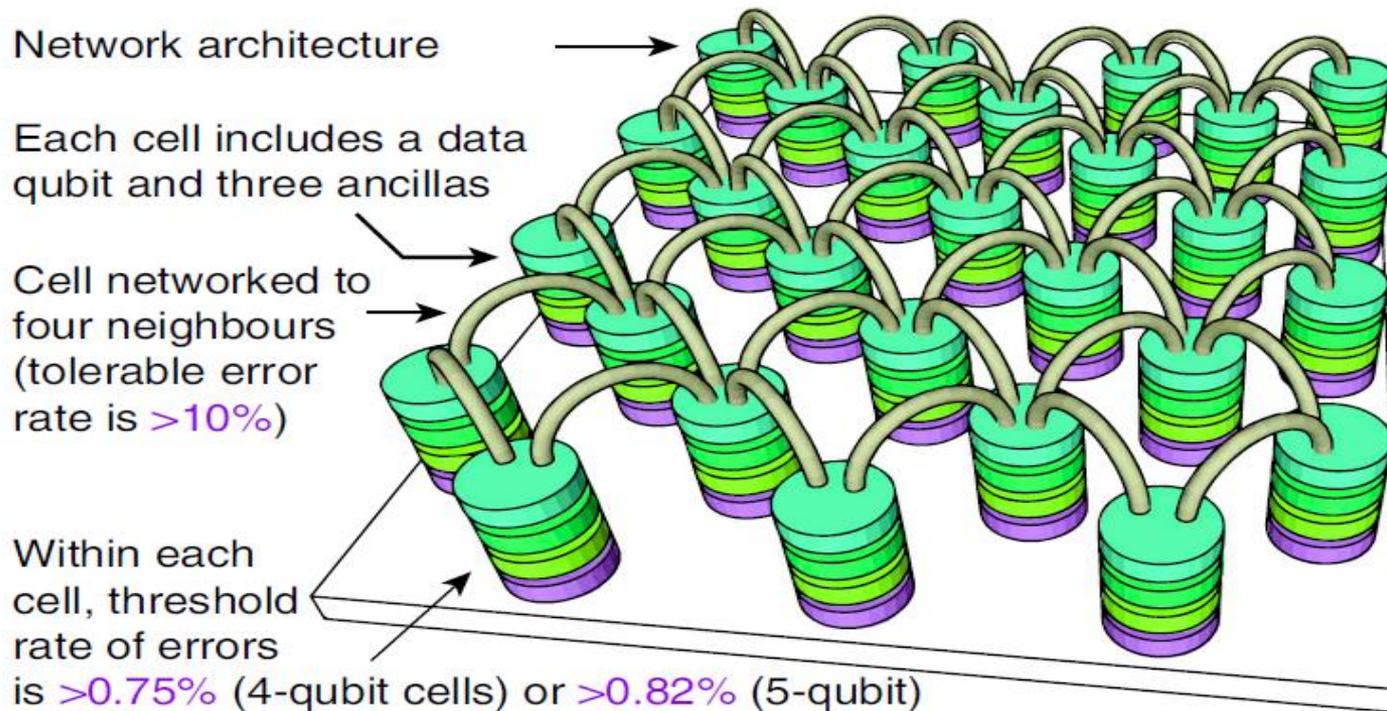


M. Sellers group, Nature 517, 153 (2015)

量子纠缠网络

构建量子网络的阈值

Eg. 2D toric code topologic quantum computing



N. H. Nickerson, et al., Nature Comm. 4, 1756 (2013)

我们构建的量子纠缠网络

量子纠缠网络

不同体系间的结合

多光子纠缠源

自发参量下转换 (SPDC)

参量光系统

确定性量子光源

光致激发 (PL, PLE)

量子点

量子存储节点

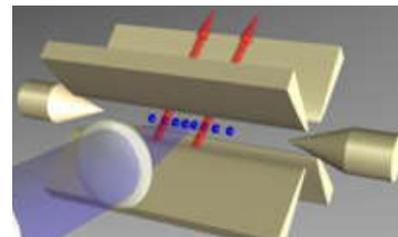
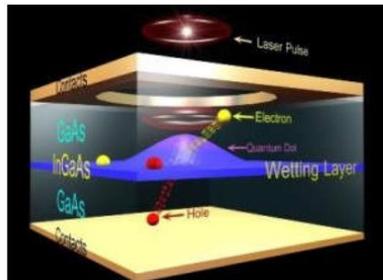
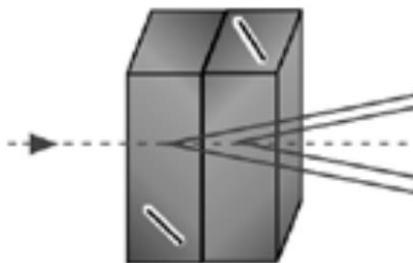
原子频率梳 (AFC)

稀土掺杂晶体

量子操作节点

光纤腔耦合

离子阱



量子纠缠网络组研究人员

李传锋：杰青，长江，教授



李传锋



黄运锋



许金时

黄运锋：杰青，百篇优博，教授

许金时：杰青，百篇优博，教授

项国勇：优青，教授

韩永建：教授

柳必恒：副教授

唐建顺：副研究员

陈耕，周宗权，崔金明，孙凯：副研究员

许小冶：博后，博新计划

孙永南，张超，侯志博：博后



项国勇



韩永建



柳必恒

研究内容: 1) 构建有特色的量子纠缠网络

2) 利用量子信息技术探索量子物理

报告提纲

- 一、量子纠缠网络
- 二、固态量子存储器
- 三、总结

量子纠缠网络

不同体系间的结合

多光子纠缠源

确定性量子光源

量子存储节点

量子操作节点

自发参量下转换 (SPDC)

光致激发 (PL, PLE)

原子频率梳 (AFC)

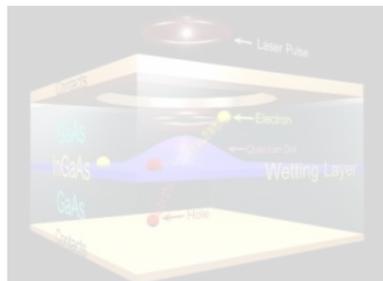
光纤腔耦合

参量光系统

量子点

稀土掺杂晶体

离子阱



量子存储器

Quantum Memories

A Review based on the European Integrated Project “Qubit Applications (QAP)”

Christoph Simon^{1,9}, Mikael Afzelius¹, Jürgen Appel², Antoine Boyer de la Giroday⁶, Samuel J. Dewhurst⁶, Nicolas Gisin¹, Chengyong Hu⁷, Fedor Jelezko³, Stefan Kröll⁴, Jörg Helge Müller², Joshua Nunn⁵, Eugene Polzik², John Rarity⁷, Hugues de Riedmatten¹, Wenjamin Rosenfeld⁸, Andrew J. Shields⁶, Niklas Sköld⁶, R. Mark Stevenson⁶, Robert Thew¹, Ian Walmsley⁵, Markus Weber⁸, Harald Weinfurter⁸, Jörg Wrachtrup³, and Robert J. Young⁶

量子存储的应用：

1. 量子中继，量子网络
 2. 确定性的单光子源
 3. 无漏洞Bell不等式探测
 4. 通讯复杂度实验
 5. 精密测量
- + 量子优盘

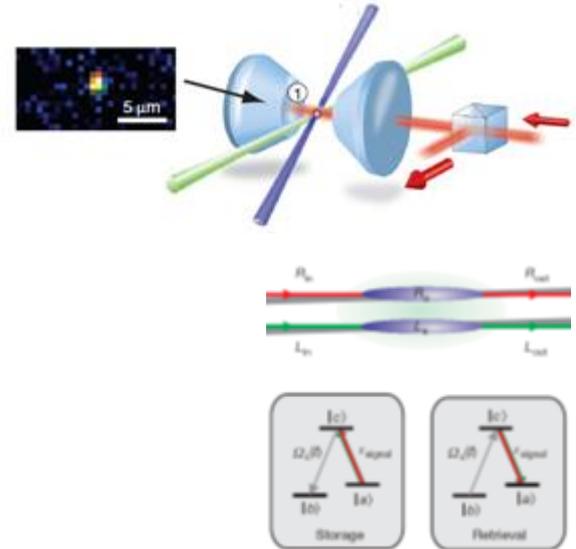
| Approach | Potential Applications | Efficiency | Measurement | Fidelity | Entanglement with light | Band width | Storage Time | MM capacity | Dim. |
|-------------------------|------------------------|--------------------------|-------------|--------------|-------------------------|-----------------|------------------|--------------------|----------|
| RE AFC | SPS, QRep, LOC4 | 0.34 / ~1 | retrieval | 0.97 cond. | not yet / Yes with PDC | 100MHz / 1GHz | 15µs / 30s | 64 / high | high |
| NV | QRep, SPS | not yet / ~1 with cavity | direct | 0.85 | done | not yet / 10MHz | >100 µs / >10 ms | moderate | moderate |
| QD | SPS, QRep | ~0.04 / ~1 | retrieval | 0.94 | done | >GHz | 2ns / 100 µs | high | low |
| Single atoms Free space | LHF, QRep | low / ~1 with cavity | direct | 0.94 cond. | done | 6MHz | 150µs / >ms | moderate | moderate |
| Room-temp. gas | LOC4, Prec.msmt. | 1 | direct | 0.7 uncond. | done | kHz / 100kHz | 4ms / 200ms | low | high |
| Cold gas | Prec.msmt., LOC4, QRep | 1 | direct | 0.75 uncond. | not yet / yes | 1MHz / 0.5GHz | not yet / 100ms | moderate (spatial) | high |
| Raman gas | SPS, QRep | 0.15 / ~1 | retrieval | 0.85 cond. | not yet / yes | 1GHz / GHz | 2µs / >100µs | moderate | high |

8个组研究了7种量子存储器

量子存储器

量子存储的指标:

1. 保真度
2. 存储效率
3. 存储时间
4. 存储带宽
5. 多模式和高维存储的能力
6. 操作波长



实现量子存储的物理系统：冷原子、热原子、单原子、稀土掺杂晶体.....

固态量子存储器

- 原子频率梳(AFC)固态量子存储
Gisin's group, Nature 456, 773 (2008).
- 线宽 $> 100\text{MHz}$, 可见度0.86, 存储效率5%@200ns
I. Usmani, et al., Nature Commun. 1, 12 (2010).
- Er:YSO晶体中1.5 μm 波段的量子存储
B. Lauritzen, et al., Phys. Rev. Lett. 104, 080502 (2010).
- 0.69存储效率
M.P. Hedges, et al., Nature 465, 1052 (2010).

稀土掺杂晶体, $\sim 3\text{K}$ 的低温环境, $\sim 0.1\text{T}$ 磁场。

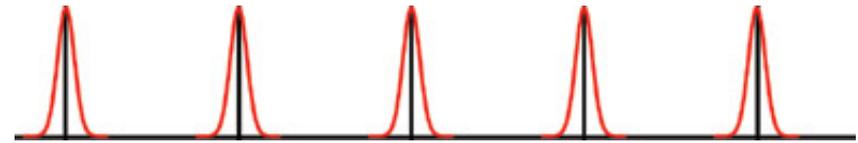
稀土离子: Nd, Er, Pr, Eu.....

晶体: YSO, YAG, YVO₄.....

固态量子存储器

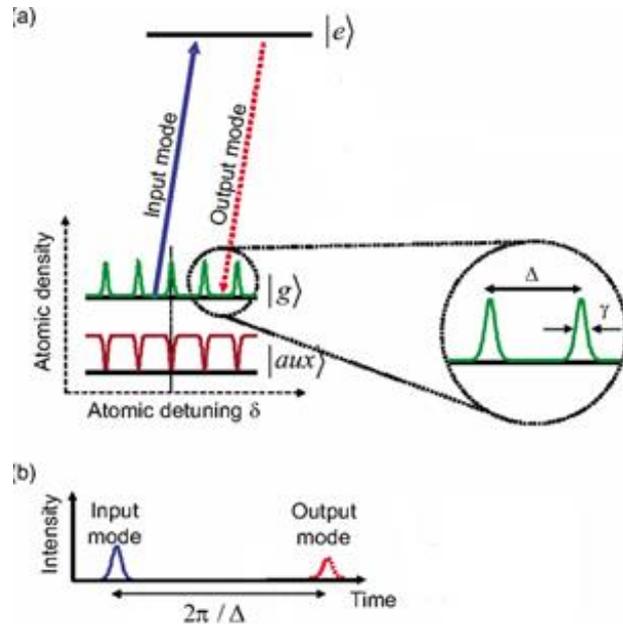
工作原理图

● 光学频率梳



时间域脉冲

● 原子频率梳

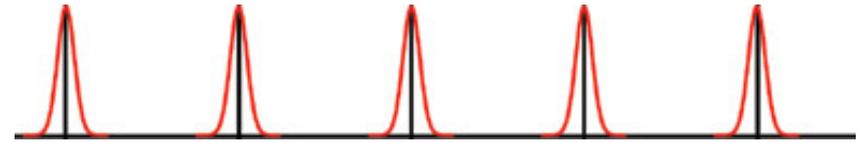


H. de Reidmetten, et al., Nature 456, 773 (2008).

固态量子存储器

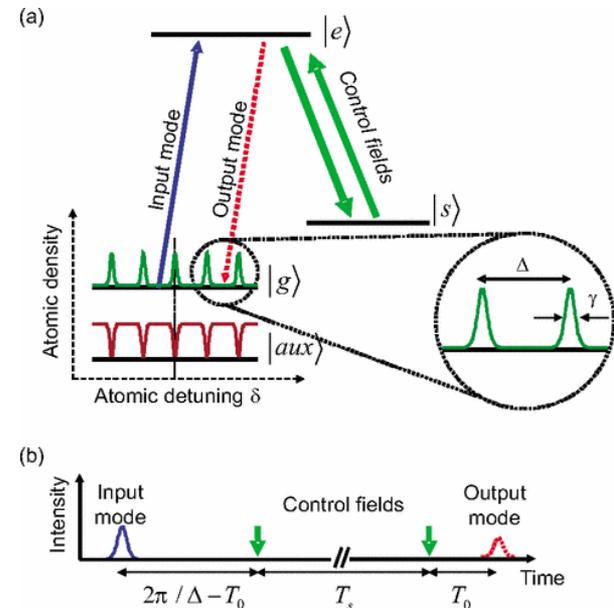
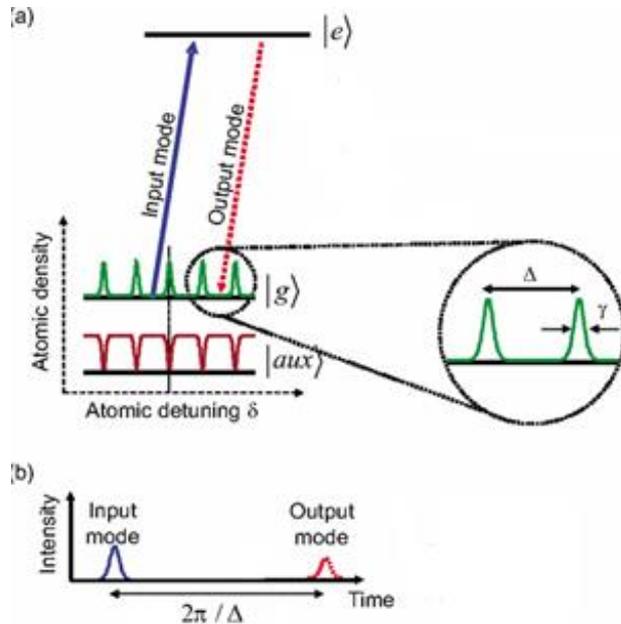
工作原理图

● 光学频率梳



时间域脉冲

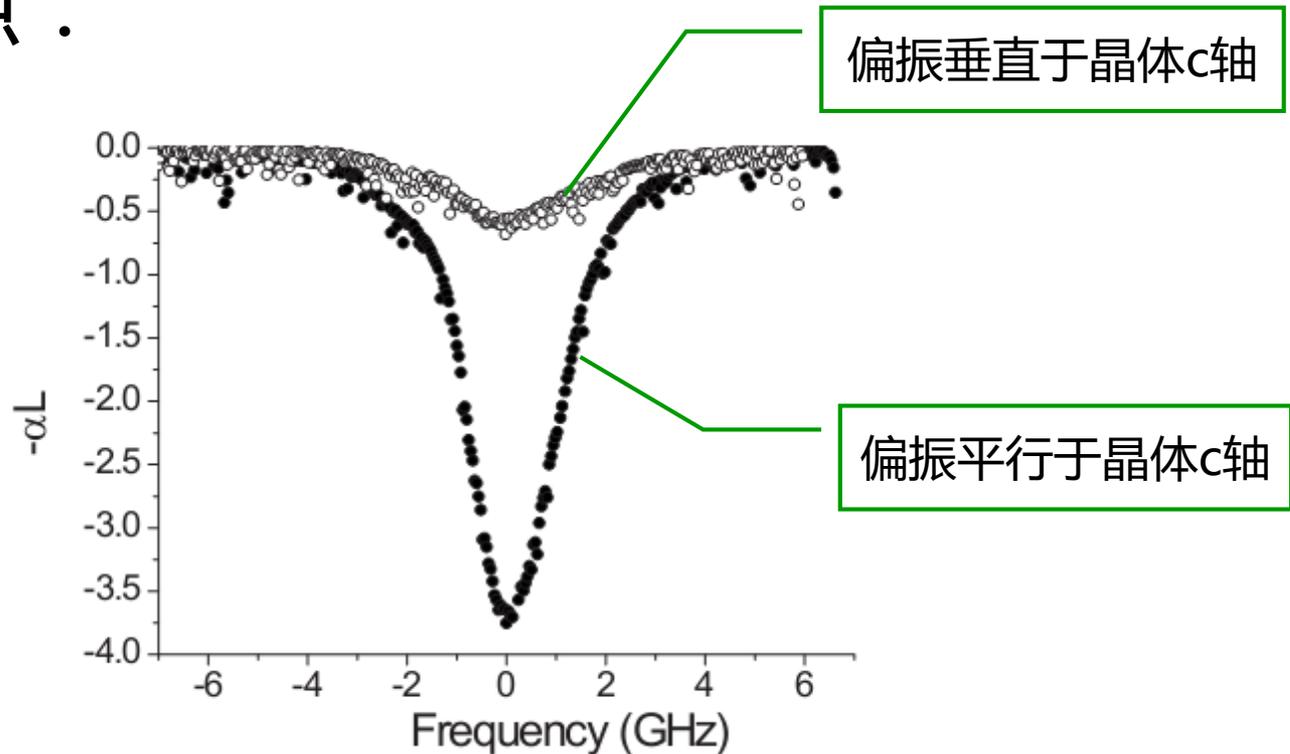
● 原子频率梳



H. de Reidmetten, et al., Nature 456, 773 (2008).

固态量子存储器-光子偏振态的存储

◆研究难点：



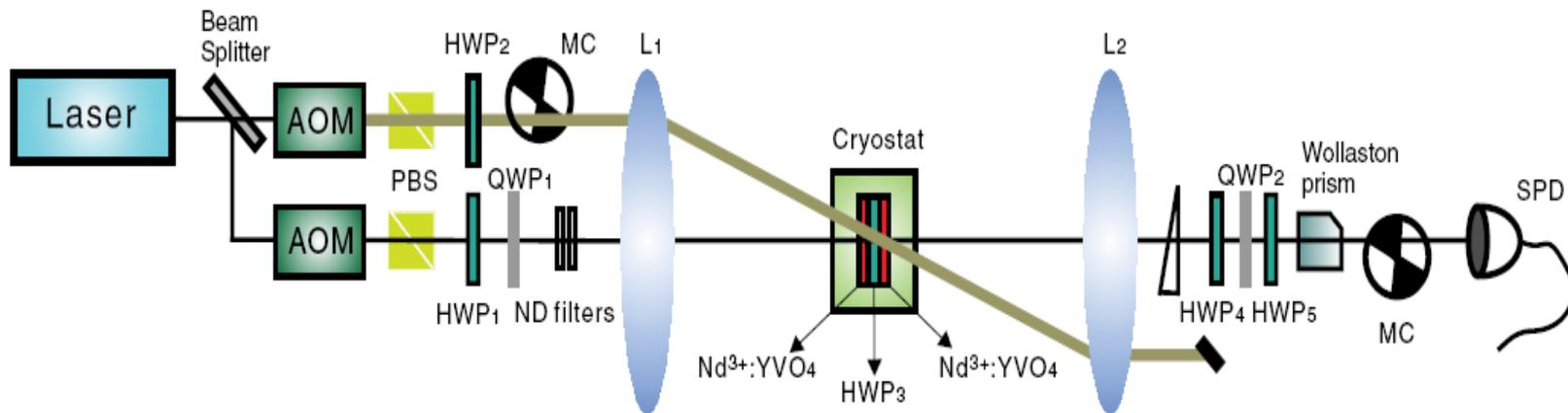
稀土掺杂晶体（如Nd:YVO₄）的吸收具有很强的不对称性，所以**只能存储特定偏振态的光**（平行于晶体c轴）。

固态量子存储器-光子偏振态的存储

- 设计出“三明治”型固体量子存储器，实现偏振态的固态量子存储；
- 99.9%的存储保真度创造世界最高水平。



两片Nd:YVO₄,
10x10x1.4mm,
中间为半波片;
1.5K, 0.3T



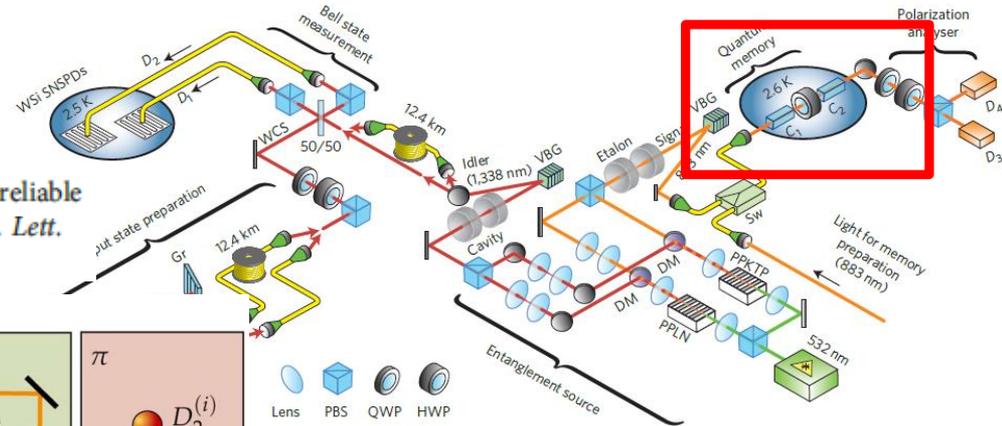
Z.Q. Zhou, W.B. Lin, M. Yang, C.F. Li, G.C. Guo, **PRL** 108, 190505 (2012)
Highlighted by [Physics Synopsis \(APS\)](#) and [Physicsworld \(IOP\)](#)

固态量子存储器-光子偏振态的存储

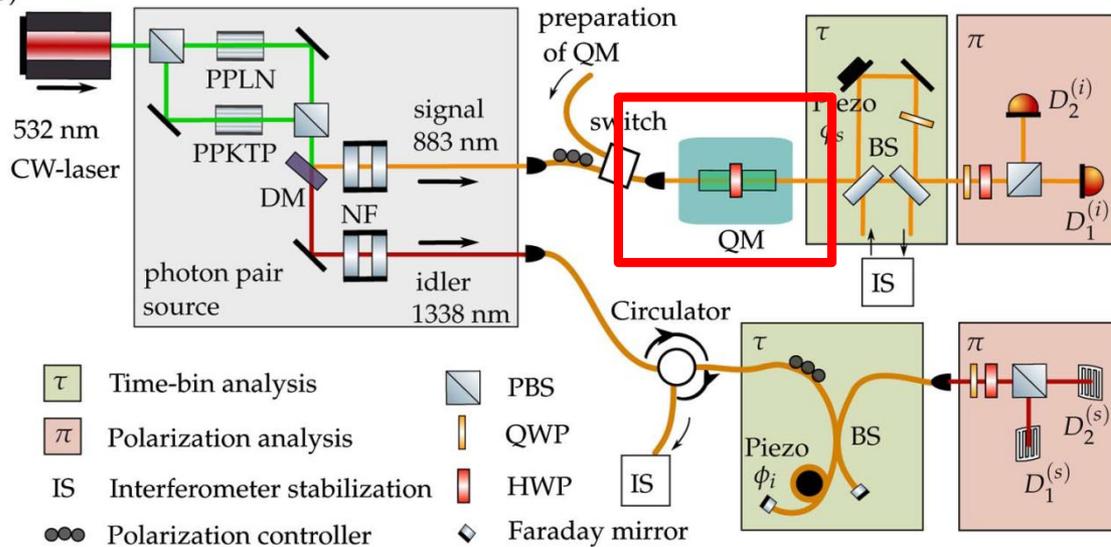
三明治型固态量子存储器设计已被瑞士Gisin组采用

Nature Photonics 8.775 (2014)

25. Zhou, Z.-Q., Lin, W.-B., Yang, M., Li, C.-F. & Guo, G.-C. Realization of reliable solid-state quantum memory for photonic polarization qubit. *Phys. Rev. Lett.* **108**, 190505 (2012).



(b)



Optica 2.279 (2015)

32. Z.-Q. Zhou, W.-B. Lin, M. Yang, C.-F. Li, and G.-C. Guo, "Realization of reliable solid-state quantum memory for photonic polarization qubit," *Phys. Rev. Lett.* **108**, 190505 (2012).

固态量子存储器-光子偏振态的存储

在综述和介绍量子存储器的文章中，本成果被作为最高保真度指标引用文章

REVIEW ARTICLE

PUBLISHED ONLINE: 25 APRIL 2014 | DOI: 10.1038/NPHOTON.2014.53

nature
photonics

Journal of Modern Optics

Volume 60, Issue 18, 2013

Quantum information transfer using photons

cantly speed up long-distance entanglement rates¹⁰⁴. Storage of photonic polarization quantum bits has recently been demonstrated with both high efficiency and fidelity, paving the way for interactions with polarization-based quantum-information processors¹⁰⁵⁻¹⁰⁷.

107. Zhou, Z.-Q., Lin, W.-B., Yang, M., Li, C.-F. & Guo, G.-C. Realization of reliable solid-state quantum memory for photonic polarization qubit. *Phys. Rev. Lett.* **108**, 190505 (2012).

New Journal of Physics **16** (2014) 065019

cooled rare-earth ion doped crystals has already shown great promise as a quantum memory for quantum information processing applications. Examples include high retrieval fidelity [19], high efficiency [20], large bandwidth [14, 15], large temporal and spectral multimode storage

- [19] Zhou Z Q, Lin W B, Yang M, Li C F and Guo G C 2012 Realization of reliable solid-state quantum memory for photonic polarization qubit *Phys. Rev. Lett.* **108** 190505

Prospective applications of optical quantum memories

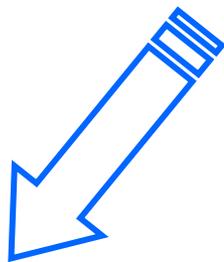
In part triggered by the improved understanding of necessary properties, and in part causing it, impressive progress in the storage and recall of quantum states in atomic ensembles and individual absorbers has been achieved over the last few years. This includes storage efficiencies of up to 87% [35,36], storage over 5 GHz bandwidth [34], simultaneous storage of several temporal modes [37,38], readout fidelities exceeding 99% [39], the combination of high efficiency (73%) and long storage time (3 ms) [40], and storage and

- [39] Zhou, Z.Q.; Lin, W.B.; Yang, M.; Li, C.F.; Guo, G.-C. *Phys. Rev. Lett.* **2012**, *108*, 190505.

固态量子存储器：高维、多模式、确定性单光子存储

◆ 研究动机

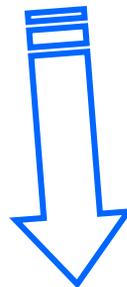
一个高效的量子中继器应当具有如下特征



1) 高维编码

NJP 8, 75 (2006)

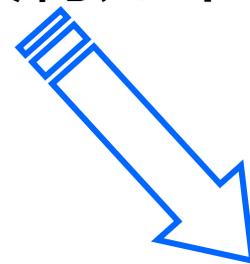
Nat. Phys. 4, 282 (2008)



2) 多模式量子存储

PRL 98, 190503 (2007)

RMP 83, 33 (2011)



3) 确定性量子光源

PRA 76, 050301(R) (2007)

PRL 113, 053603 (2014)

量子纠缠网络

不同体系
间的结合

多光子纠缠源

自发参量下
转换 (SPDC)

参量光系统

确定性量子光源

光致激发
(PL, PLE)

量子点

量子存储节点

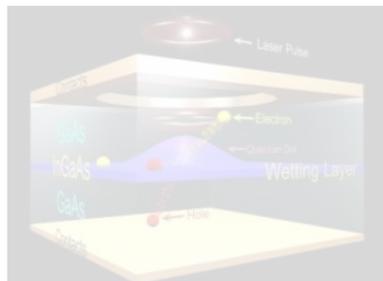
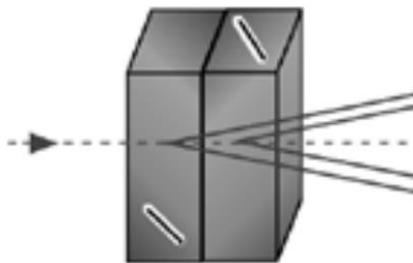
原子频率
梳 (AFC)

稀土掺杂晶体

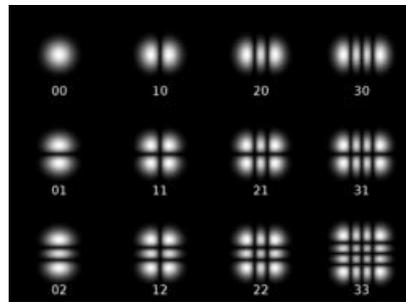
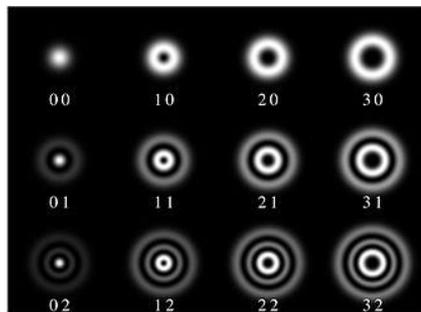
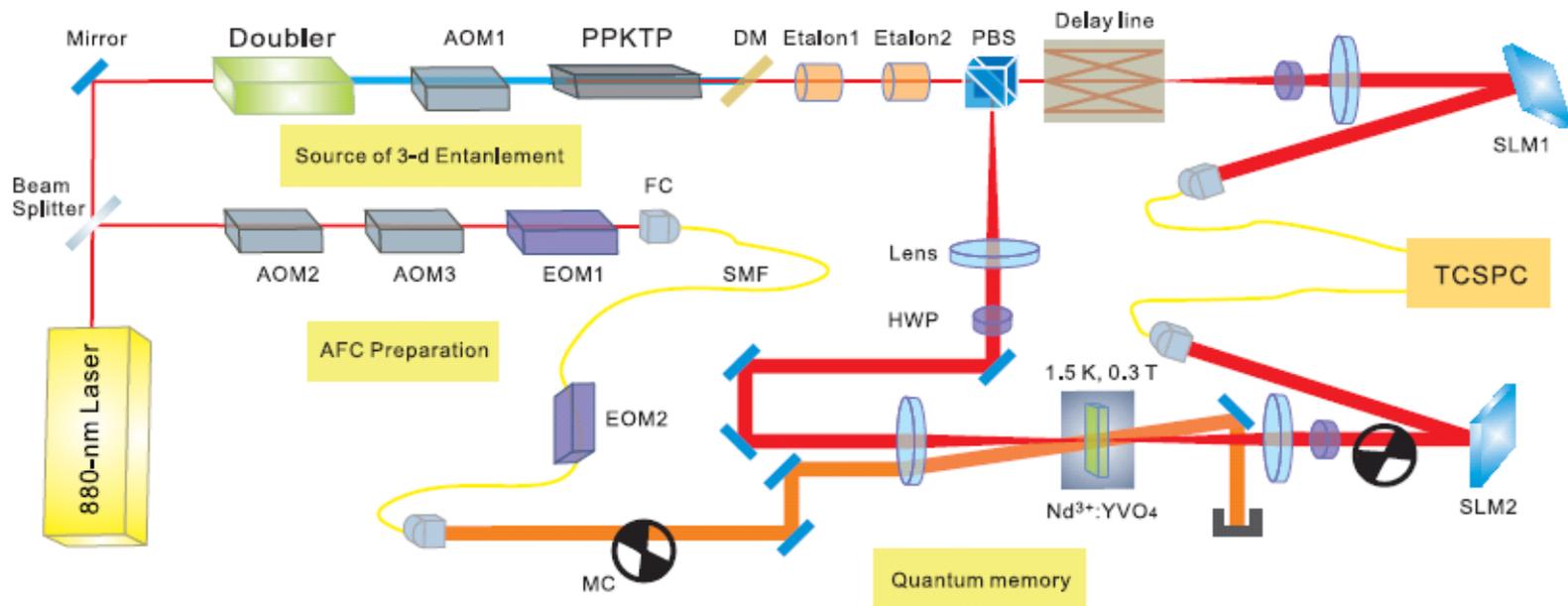
量子操作节点

光纤腔
耦合

离子阱



高维纠缠态的固态量子存储



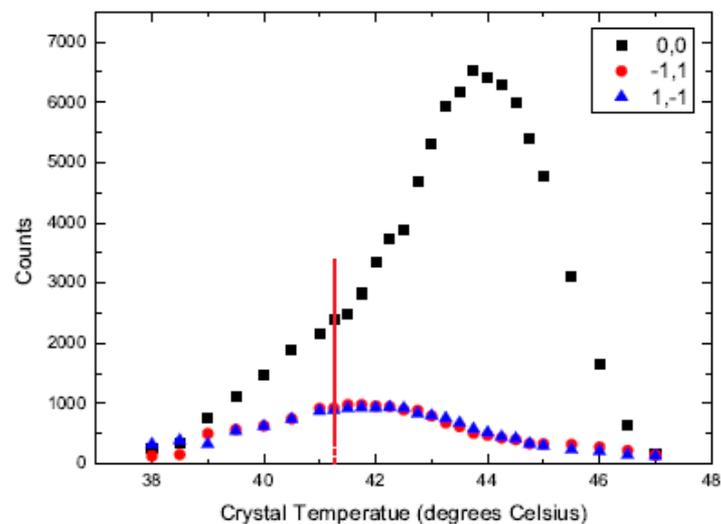
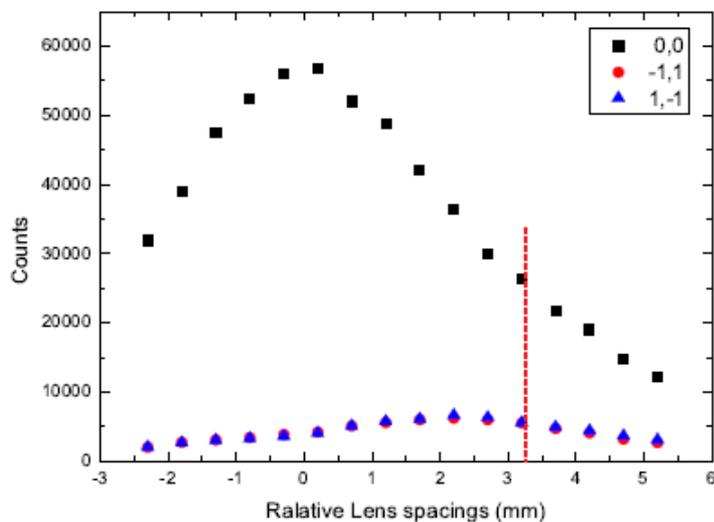
1992年开始发现光的轨道角动量是好量子数。我们把高维纠缠光子对中的一个进行固态量子存储。

Z.-Q. Zhou, Y.-L. Hua, X. Liu, G. Chen, J.-S. Xu, Y.-J. Han, C.-F. Li, G.-C. Guo, **Physical Review Letters** 115, 070502 (2015).

高维纠缠态的固态量子存储

实验结果1：利用SPDC制备出窄带高维纠缠源（轨道角动量）

$$|\Psi\rangle = c_{-1}|-1\rangle|1\rangle + c_0|0\rangle|0\rangle + c_1|1\rangle|-1\rangle + \dots,$$



Step 1: 优化透镜系统，纠缠度达到0.542

Step 2: PPKTP温度调到42度，纠缠度达到0.666

Step 3: PPKTP温度优化到41.25度，纠缠度达到0.73

高维纠缠态的固态量子存储

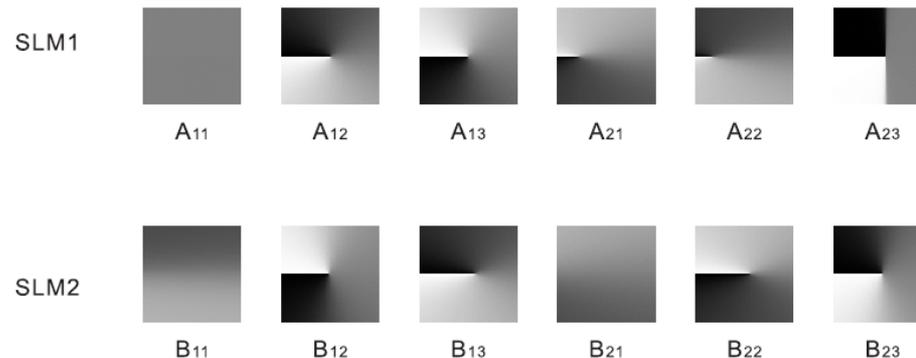
实验结果2：实现3x3维量子纠缠的高保真度固态量子存储。并验证存储前后Bell不等式的违背。

$$|\Psi\rangle = c_{-1}|-1\rangle|1\rangle + c_0|0\rangle|0\rangle + c_1|1\rangle|-1\rangle + \dots,$$

Table 1. Entanglement measures.

| | Negativity | Fidelity with MES | Input/output fidelity | Measured S |
|-------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| 输入 ρ_1 | 0.643 ± 0.005 | 0.730 ± 0.006 | / | 2.150 ± 0.030 |
| 输出 ρ_2 | 0.656 ± 0.010 | 0.742 ± 0.011 | 0.991 ± 0.003 | 2.152 ± 0.033 |

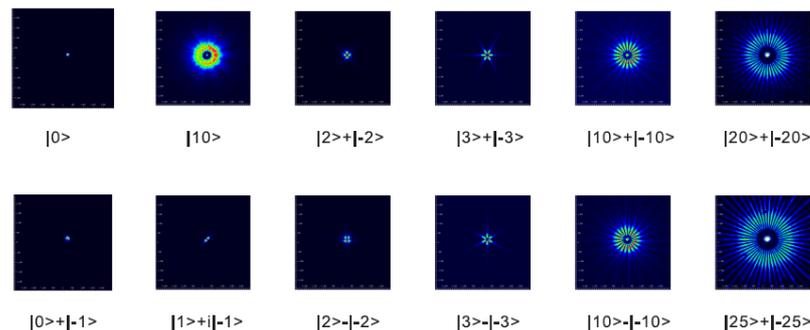
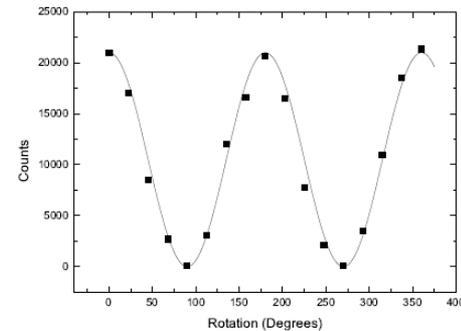
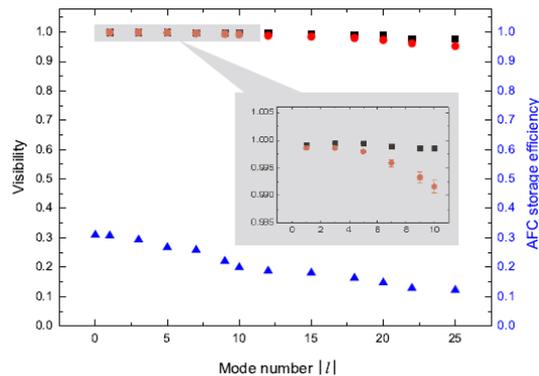
存储保真度99.3%.



Slm graphics for measurements of Bell inequality.

高维纠缠态的固态量子存储

实验结果3：实验验证固态量子存储器中超过51维的有效量子存储。



Measured intensity profile of different states at the sample position.

Z.-Q. Zhou, Y.-L. Hua, X. Liu, G. Chen, J.-S. Xu, Y.-J. Han, C.-F. Li, G.-C. Guo, **Physical Review Letters** 115, 070502 (2015).

量子纠缠网络

不同体系
间的结合

多光子纠缠源

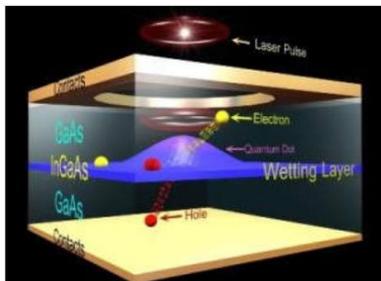
自发参量下
转换 (SPDC)

参量光系统

确定性量子光源

光致激发
(PL, PLE)

量子点



量子存储节点

原子频率
梳 (AFC)

稀土掺杂晶体



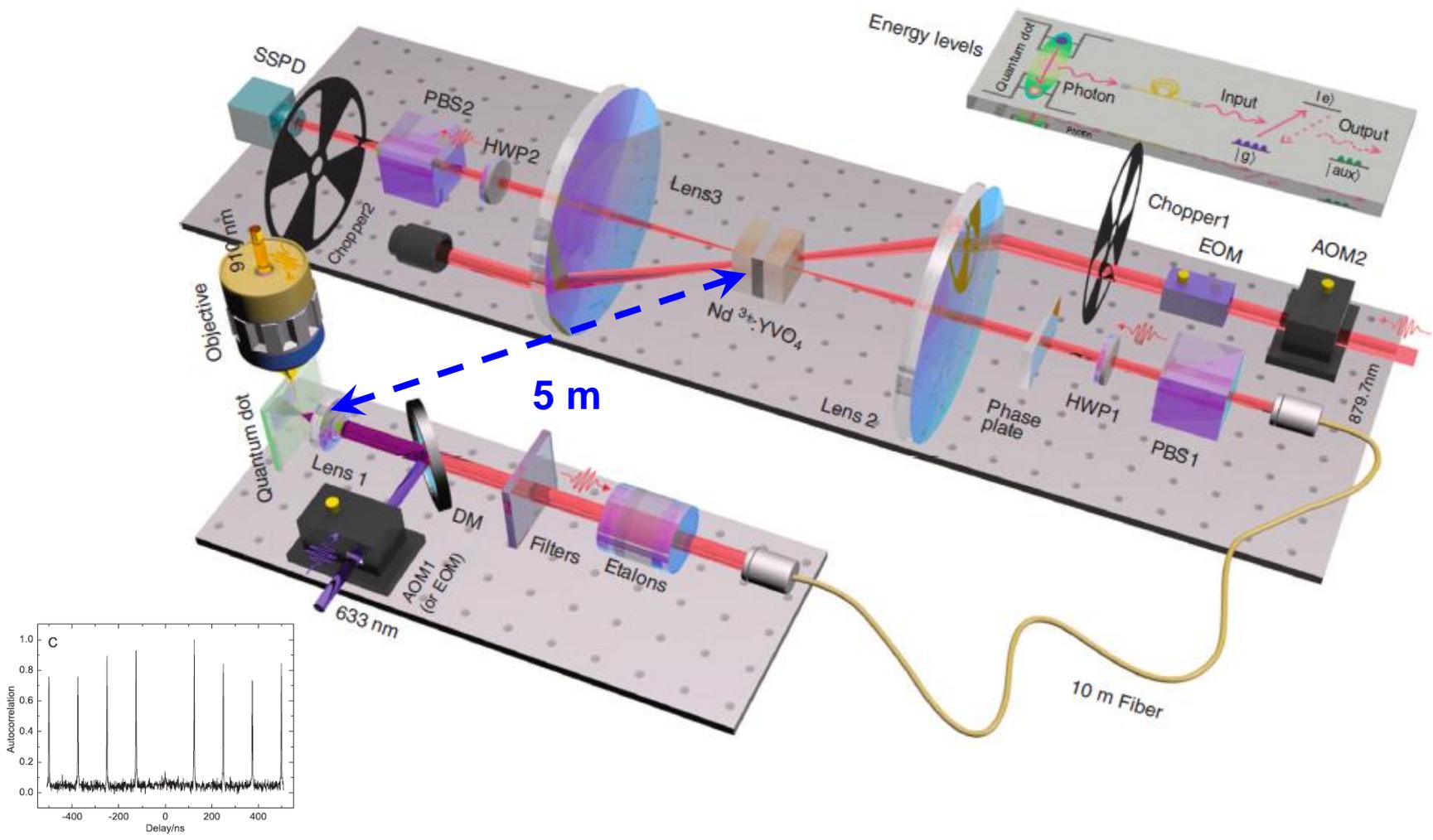
量子操作节点

光纤腔
耦合

离子阱

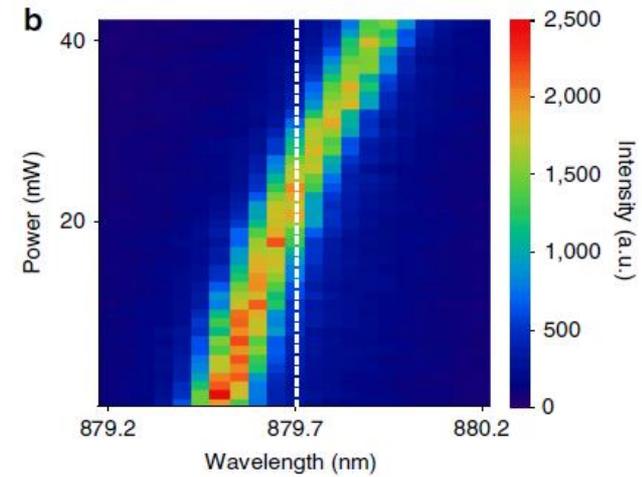
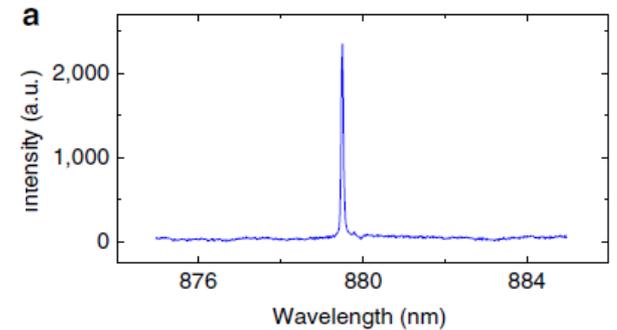
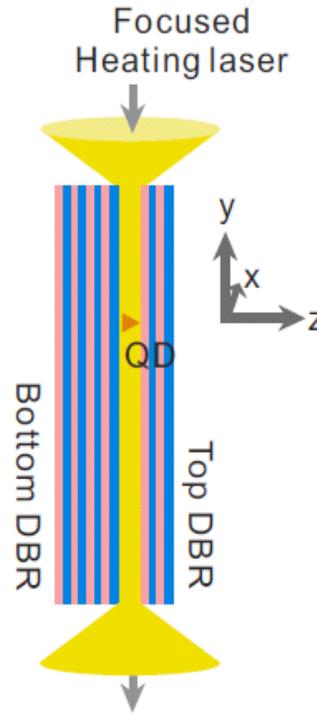
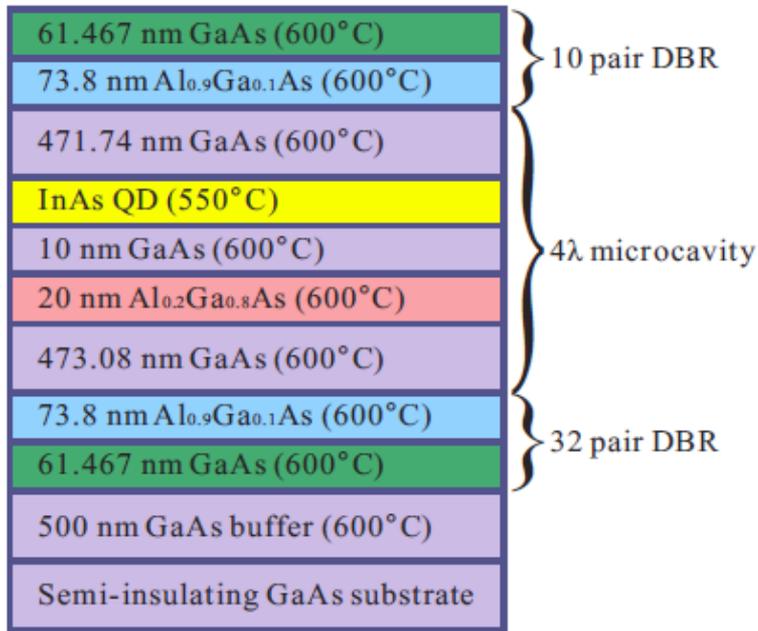


确定性单光子的多模式固态量子存储



确定性单光子的多模式固态量子存储

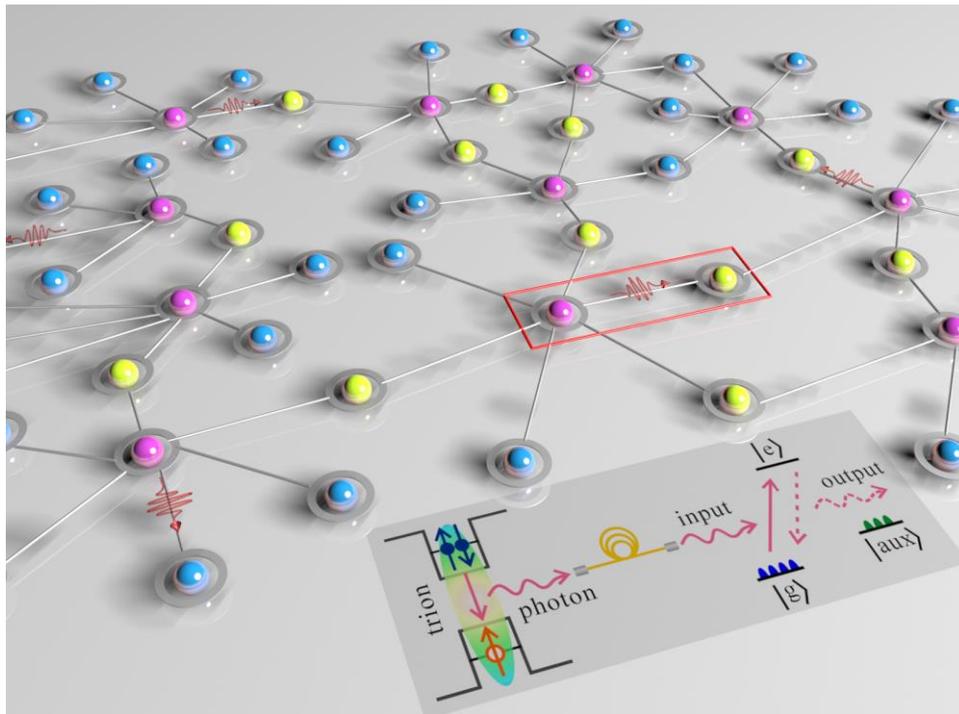
- 实验难点：波长匹配
- 解决办法：局部加热技术



确定性单光子的多模式固态量子存储

实验结果一

首次实现两个固态体系之间的对接，即量子点确定性单光子的固态量子存储，演示了最基本的量子网络。



存储后的单光子的偏振特性也被检验，偏振保真度达到 0.913 ± 0.026

各种光的量子存储器性能的比较

| | 保真度 | 效率 | 带宽 | 时间 | 多模式存储 模式数 | 高维存储 维数 |
|--------|---------|--------|----------|------------|--------------|------------|
| 稀土掺杂晶体 | 0.999/1 | 0.70/1 | 8GHz/THz | 0.5ms/6h | 100 / 1000 | 3/51 |
| 冷原子 | 0.95/1 | 0.84/1 | 100MHz | 0.2s/15s | 2/225 | 3/7 |
| 单原子 | 0.93/1 | 0.20/1 | 6MHz | 150us/>ms | NA | NA |
| 热原子 | 0.98/1 | 0.87/1 | 1GHz/GHz | 10us/100us | NA | NA |

- 以上数据表明稀土掺杂晶体在大多数指标上处于领先地位，其中保真度、多模式数目、高维存储维数的记录为本研究组的工作；
- 研究组下一步研究重点是存储时间达到小时量级，实现量子优盘。

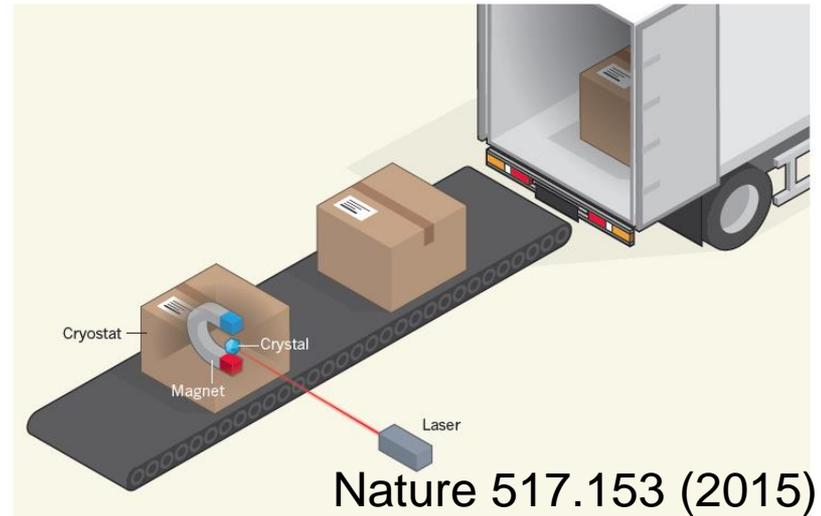
固态量子存储：量子U盘

- 应对经典大数据(EB)快速数据迁移难题，Amazon推出snowmobile



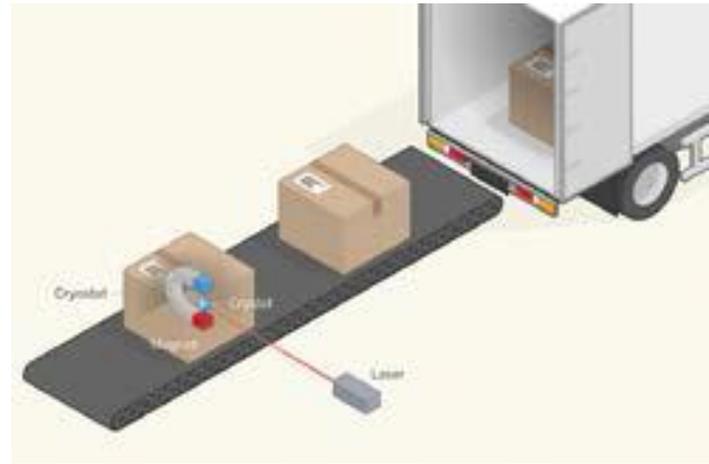
- 应对量子数据传输的指数级损耗：

量子U盘



固态量子存储：量子U盘

- 需求：相干寿命10小时量级的量子存储器+传统交通工具
- 特点：便利、低成本的点对点通信方案，容易适应特殊地理环境，是对光纤网络的重要补充，有望成为一种新型量子信道和量子物理基本问题测试平台
- 相干寿命的提升等效于低损耗光纤的研究



Sellars' group in ANU, Nature 517, 177 (2015)

固态量子存储：量子U盘

● 相干寿命的极限

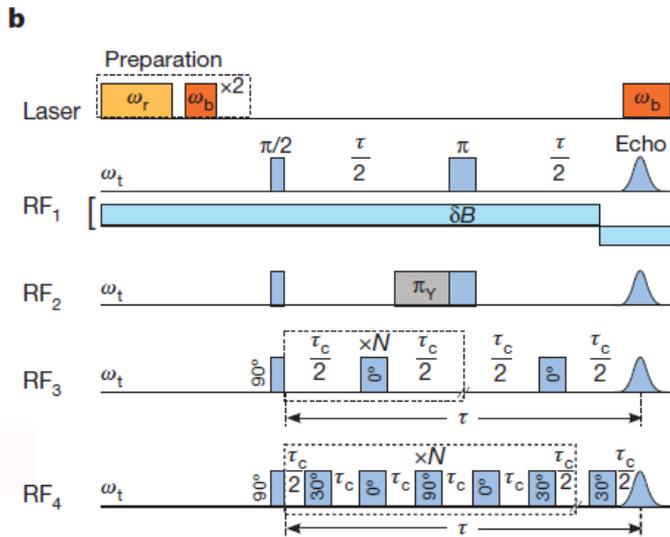
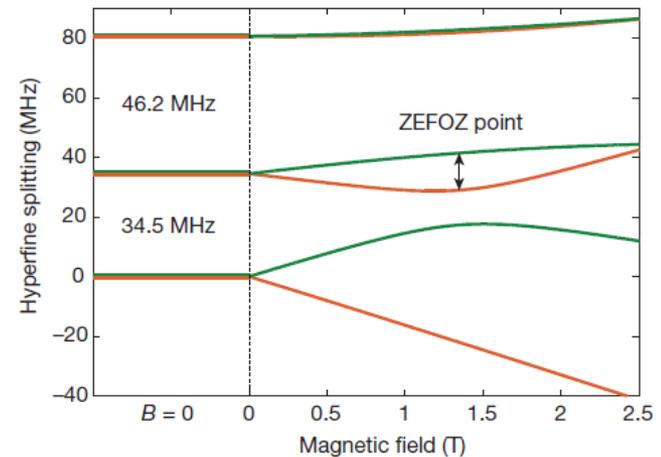
- $T_2 < 2T_1$ ，系统布居数寿命必须足够长
- 稀土离子的4f电子被外层6s电子等屏蔽，故稀土离子在晶体中一般具有较长的布居数寿命及相干寿命
- Non-Kramers离子（Pr/Eu）无未配对电子，仅有核自旋，与周围环境相互作用更弱
- Non-Kramers离子退相干机制：（以Pr/Eu:YSO晶体为例）宿主YSO晶体中Y的核自旋flip-flop引起**磁场涨落**，该涨落导致目标稀土离子的自旋跃迁频率发生变化

$$\frac{1}{\pi T_2} = S_1 \cdot \Delta B + \Delta B \cdot S_2 \cdot \Delta B$$

PRB 74, 195101 (2006)
Nature 517.177 (2015)

固态量子存储：量子U盘

- 工作原理：超长 T_1 系统+ZEFOZ跃迁+动力学解耦合
- Eu:YSO: 自旋 T_1 长达22天
- ZEFOZ跃迁：Zero First Order Zeeman $S1 \sim 0$
- Frozen core: ΔB 在高场下被进一步抑制
- 动力学解耦合



$$H = \mathbf{B} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{I} + \mathbf{I} \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{I}$$

PRB 74, 195101 (2006)

Nature 517.177 (2015)

固态量子存储：量子U盘

- 如何准确测定稀土自旋哈密顿量？

- 扫场核磁共振（NMR）分析哈密顿量是获得S1，S2信息的基础

- 挑战：

- 1. 晶体中稀土4f电子与晶格贡献符号相反，商业NMR系统无法检出信号 [Spectroscopic properties of rare earth in optical materials, Springer (2005)]
- 2. 低振动、低温、光学矢量磁场系统无商业化产品

- 解决方案：自建光学拉曼外差探测核磁共振谱仪

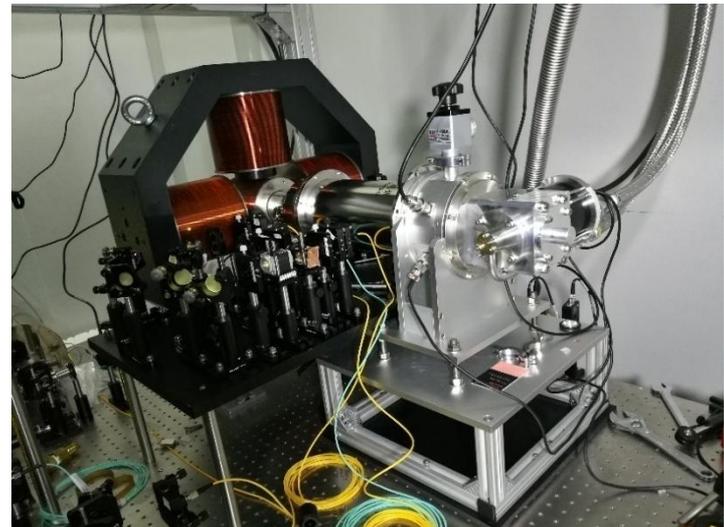
- 国际上目前仅澳洲国立大学Sellars教授研究组完全掌握该技术

固态量子存储：量子U盘

- ❑ 研制出针对Kramers离子的超低温电子顺磁谱仪、针对Non-Kramers离子的光学拉曼外差探测核磁共振谱仪；可实现任意稀土离子的哈密顿量测定。



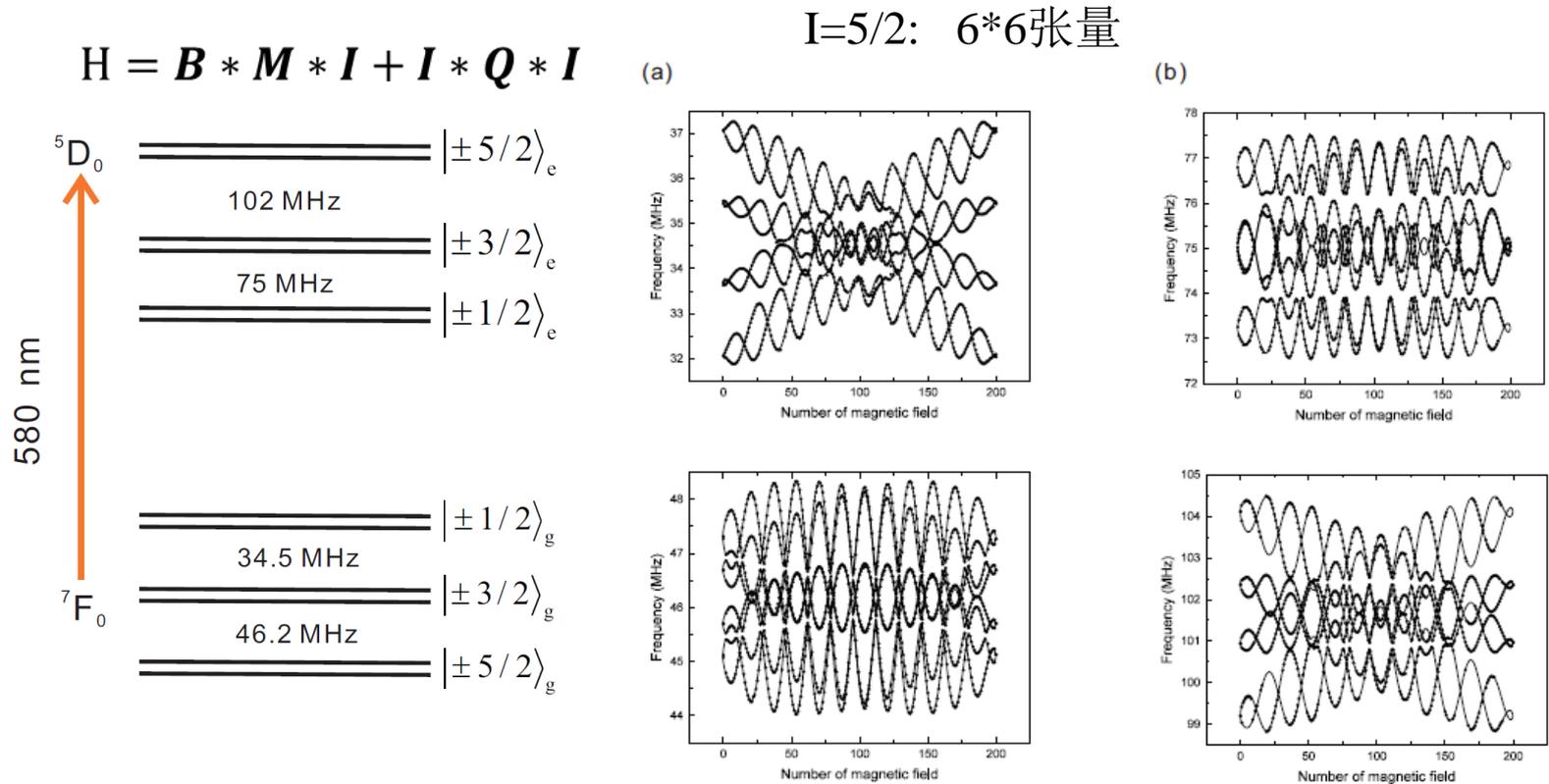
工作温度150mK.



对稀土离子探测的信噪比，
比普通NMR提高10万倍。

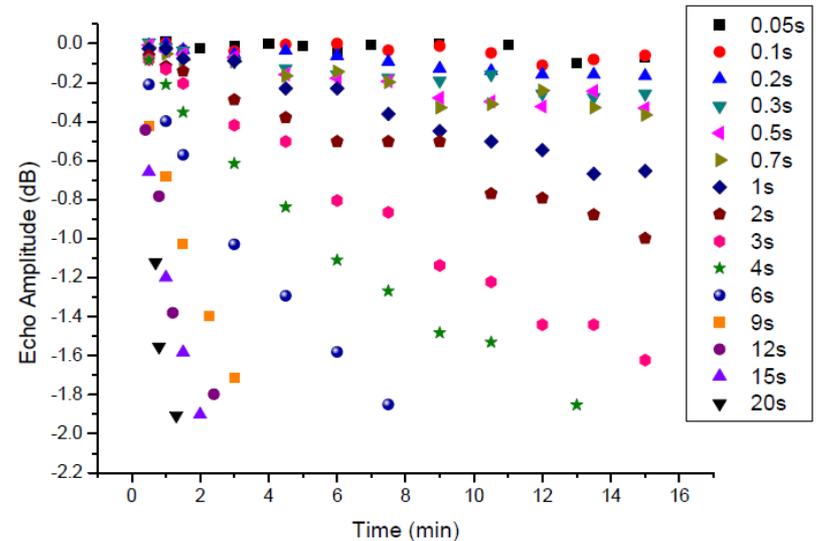
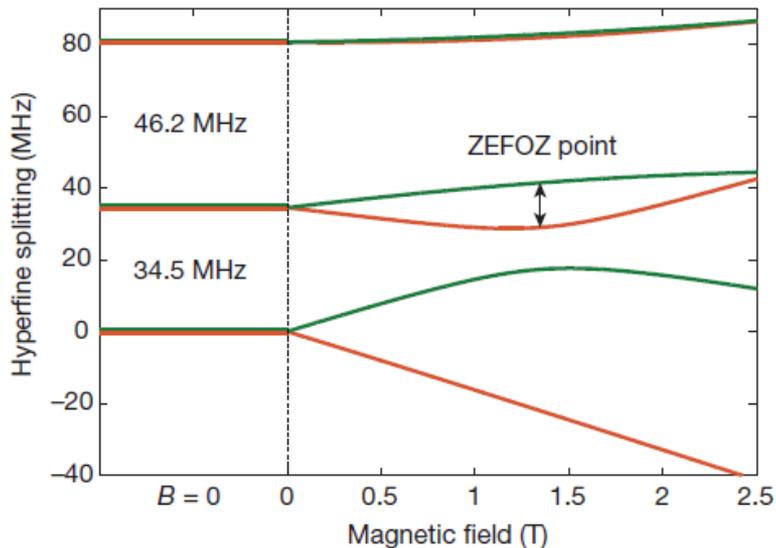
固态量子存储：量子U盘

- 为了实现光泵浦方案和存储方案的设计，我们实验测定了光学上能级的哈密顿量参量，并预测出ZEFOZ工作磁场下的完整能级结构



固态量子存储：量子U盘

实验结果：Eu-151:YSO自旋跃迁相干寿命近5个小时



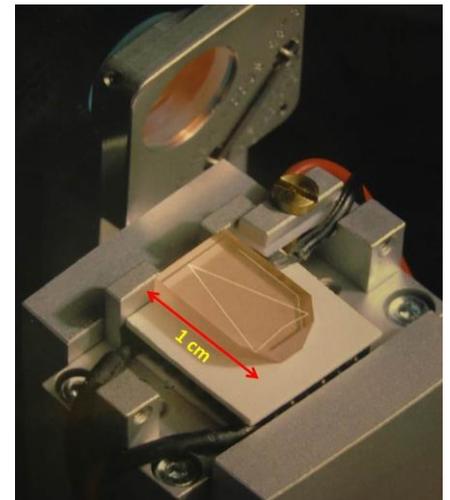
M Sellars研究组在此发现6小时 T_2
Nature 517.177 (2015)

目前我们在相同工作点获得约5小时 T_2
理论上已搜索到更长寿命的点

长寿命固态量子存储应用：量子传感

- 稀土离子激光器[E Snitzer, Phys. Rev. Lett. 1961]
- 稀土激光稳频 [RL Cone, Optics Letters 1999]
- 离子阱 [Yb⁺, Monroe' s group]
- 稀土量子计算 [S Kroll, Optics Communications 2002]
- 单光子固态量子存储 [N Gisin, Nature 2008]
- 稀土量子传感 [our work 2017]

LIGO's Nd:YLF Laser:
200W @ 1064nm



长寿命固态量子存储应用：量子传感

● 利用量子叠加态对环境扰动的极度敏感性

TABLE I. Experimental implementations of quantum sensors.

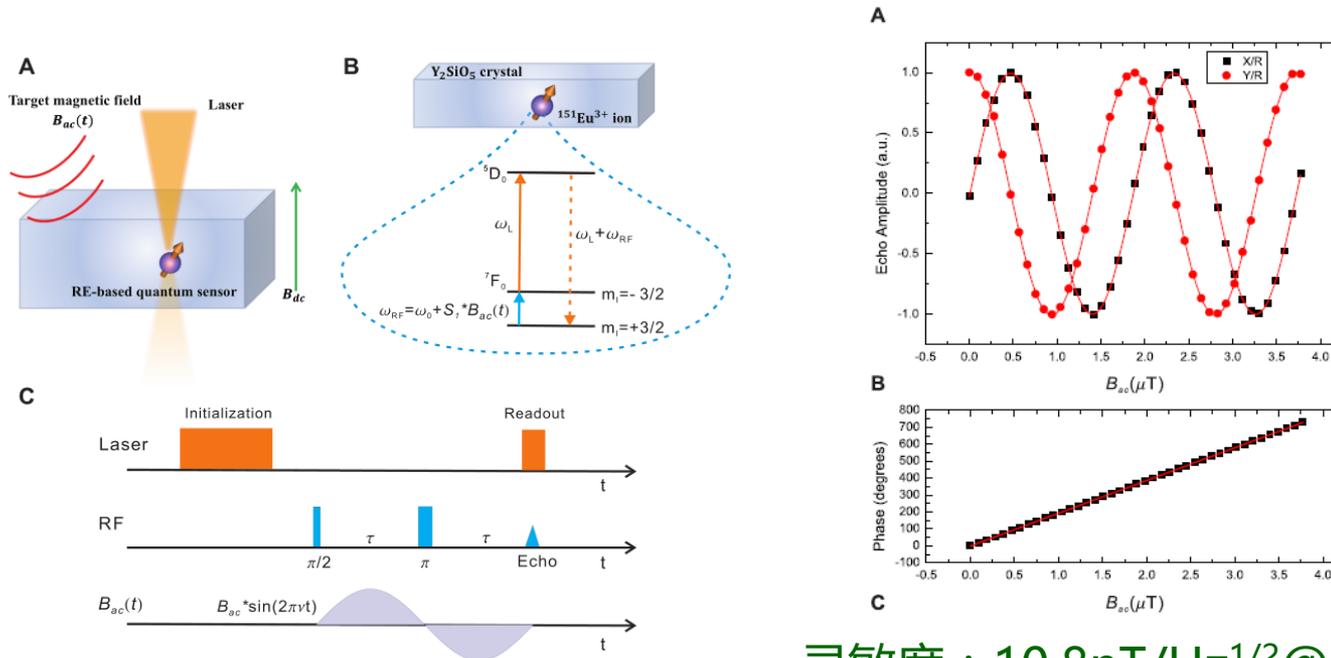
| Implementation | Qubit(s) | Measured quantity(ies) | Typical frequency | Initialization | Readout |
|----------------------------------|-----------------------------|---|-------------------|---------------------|---------------------|
| Neutral atoms | | | | | |
| Atomic vapor | Atomic spin | Magnetic field, rotation, time/frequency | dc-GHz | Optical | Optical |
| Cold clouds | Atomic spin | Magnetic field, acceleration, time/frequency | dc-GHz | Optical | Optical |
| Trapped ion(s) | | | | | |
| | Long-lived electronic state | Time/frequency | THz | Optical | Optical |
| | Vibrational mode | Rotation | MHz | Optical | Optical |
| | | Electric field, force | | Optical | Optical |
| Rydberg atoms | | | | | |
| | Rydberg states | Electric field | dc, GHz | Optical | Optical |
| Solid-state spins (ensembles) | | | | | |
| NMR sensors | Nuclear spins | Magnetic field | dc | Thermal | Pick-up coil |
| NV ^b center ensembles | Electron spins | Magnetic field, electric field, temperature, pressure, rotation | dc-GHz | Optical | Optical |
| Solid-state spins (single spins) | | | | | |
| P donor in Si | Electron spin | Magnetic field | dc-GHz | Thermal | Electrical |
| Semiconductor quantum dots | Electron spin | Magnetic field, electric field | dc-GHz | Electrical, optical | Electrical, optical |
| Single NV ^b center | Electron spin | Magnetic field, electric field, temperature, pressure, rotation | dc-GHz | Optical | Optical |
| Superconducting circuits | | | | | |
| SQUID ^c | Supercurrent | Magnetic field | dc-GHz | Thermal | Electrical |
| Flux qubit | Circulating currents | Magnetic field | dc-GHz | Thermal | Electrical |
| Charge qubit | Charge eigenstates | Electric field | dc-GHz | Thermal | Electrical |
| Elementary particles | | | | | |
| Muon | Muonic spin | Magnetic field | dc | Radioactive decay | Radioactive decay |
| Neutron | Nuclear spin | Magnetic field, phonon density, gravity | dc | Bragg scattering | Bragg scattering |
| Other sensors | | | | | |
| SET ^d | Charge eigenstates | Electric field | dc-MHz | Thermal | Electrical |
| Optomechanics | Phonons | Force, acceleration, mass, magnetic field, voltage | kHz-GHz | Thermal | Optical |
| Interferometer | Photons, (atoms, molecules) | Displacement, refractive index | ... | | |

$$\text{sensitivity} \propto \frac{1}{\gamma \sqrt{T_\chi}},$$

↑
探针相干时间

长寿命固态量子存储应用：量子传感

- 首次提出并实验实现基于稀土离子掺杂固体的量子传感器
 - 最低频率磁场的量子传感（低至0.016Hz）
 - 最长相干寿命的量子传感（长至4.3小时）

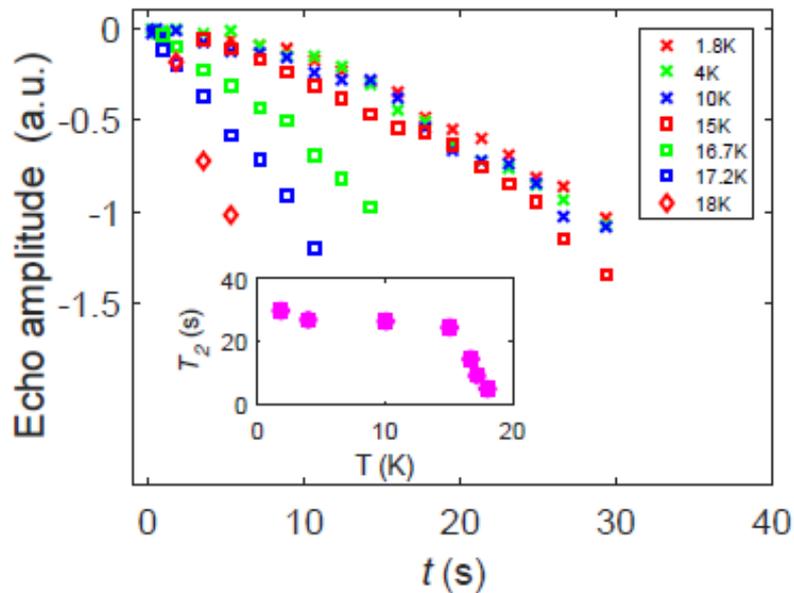
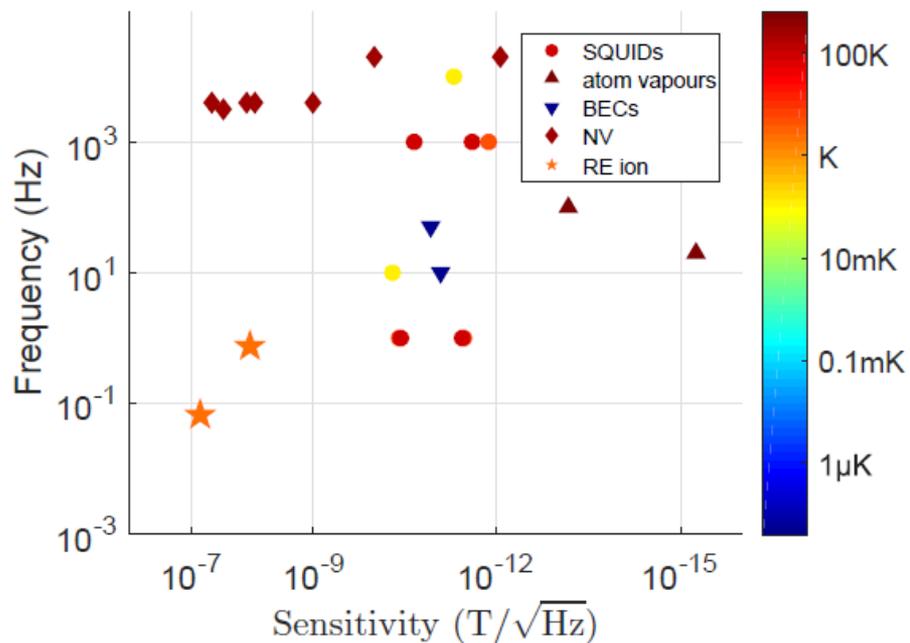


灵敏度：10.8nT/Hz^{1/2}@0.75Hz

已申请国际发明专利：周宗权等 PCT/CN2017/110863

ZQ Zhou, et al., submitted

长寿命固态量子存储应用：量子传感



最低频率磁场的量子传感

工作温度到15K

报告提纲

- 一、量子纠缠网络
- 二、固态量子存储器
- 三、总结

总结

- 1、综述量子纠缠网络的构建：量子界面，长程纠缠分发；目前已展示点到点的连接。
- 2、固态量子存储器的保真度、多模式数目、高维存储维数等多项指标创造世界最高水平。
- 3、近期集中于量子U盘，量子传感的研究。

谢谢！