

第十届海峡两岸天文望远镜与观测前沿技术研讨会

# 弯曲时空中的量子效应探测 及其在天文光学干涉望远镜中的应用

报告人: 曹原

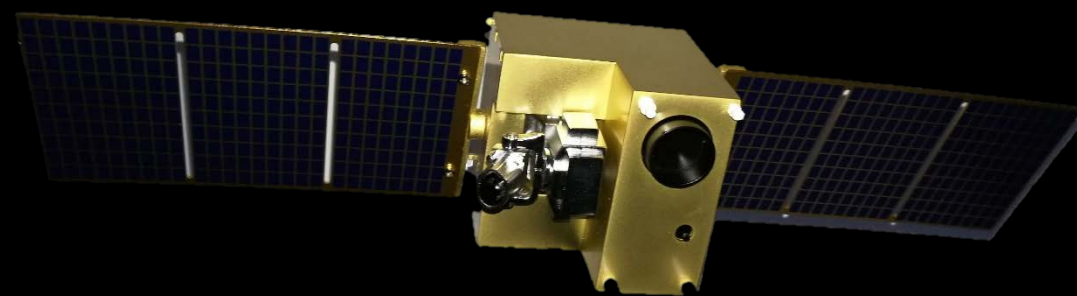
中国科学技术大学

中科院量子信息和量子科技创新研究院

2023年11月

# “墨子号” 量子科学实验卫星

在中科院战略性先导专项的支持下，国际上首颗量子科学实验卫星  
“墨子号”于2016年8月成功发射



- 重量: ~630kg
- 功耗: 560W
- 太阳同步轨道，高度~500km

# “墨子号”——引领空间量子科学发展

“墨子号”量子卫星在国际上率先开展了系列空间量子科学实验

## 广域量子通信：

- ▶ 千公里级星地量子密钥分发
- ▶ 千公里级地星量子隐形传态
- ▶ 天地一体化量子通信网络演示
- ▶ 洲际量子密钥分发

[Nature 549, 43 (2017)]  
[Nature 549, 70 (2017)]  
[Nature 589, 214 (2021)]  
[PRL 120, 030501 (2018)]

## 量子力学非定域性检验及应用：

- ▶ 千公里级量子力学非定域性检验
- ▶ 千公里级无中继量子密钥分发

[Science 356, 1140 (2017)]  
[Nature 582, 501 (2020)]

## 量子力学与广义相对论融合：

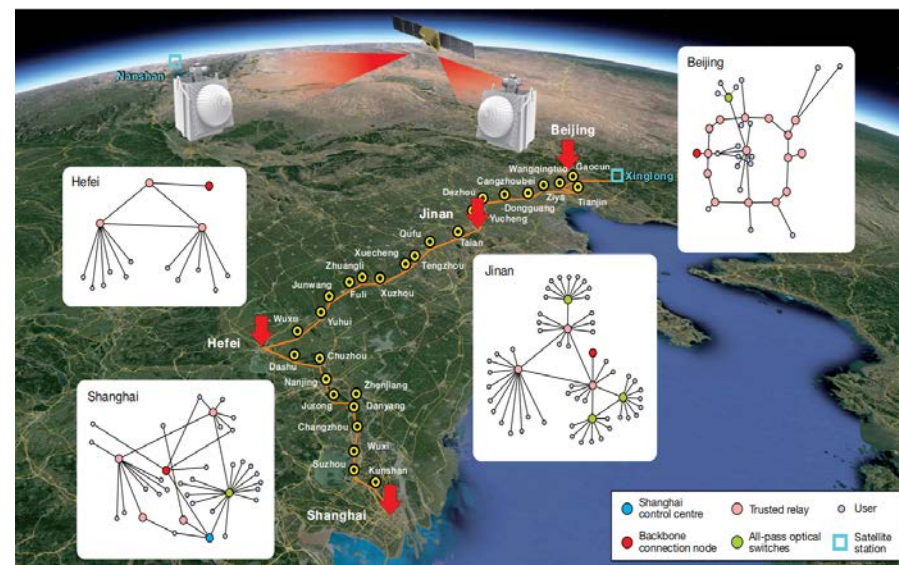
- ▶ 引力致纠缠退相干模型检验

[Science 366, 132 (2019)]

## 向量子精密测量拓展：

- ▶ 量子安全时间传递

[Nature Physics 16, 848 (2020)]



# “墨子号”——引领空间量子科学发展

## “墨子号”系列成果的学术影响

- ▶ Nature评选的2016、2017年度“**重大科学事件** ( the science events that shaped the year ) ” ，**21世纪10年代的科学大事件** ( Nature: the scientific events that shaped the decade)
- ▶ 美国物理学会，APS Physics评选的**2018年度“物理学重大事件** ( highlights of the year ) ”
- ▶ 两院院士评选的2016、2017年度“**中国十大科技进展新闻**”
- ▶ 美国科学促进会AAAS，**2018年度克利夫兰奖**



# 国内外现状和部署

受我国成功实施“墨子号”量子卫星的引领，欧美国家迅速加强了空间量子科学的

- ▶ 2017年11月，NASA发布空间基础量子物理白皮书，致力于在量子相干与量子纠缠、量子精密测量、量子物质等领域实现突破
- ▶ 2017年11月，ESA发布空间量子技术白皮书，目标是在量子通信、基于量子相干测量的时频传递与对地观测、基础量子物理实验等领域实现突破
- ▶ 国际上的低轨量子卫星计划

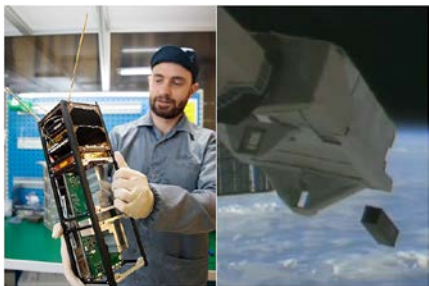
Future Opportunities for Fundamental Quantum Physics in Space

NASA Fundamental Physical Sciences Standing Review Board

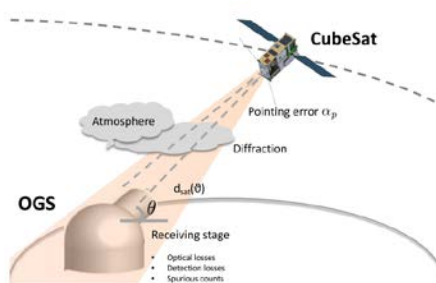
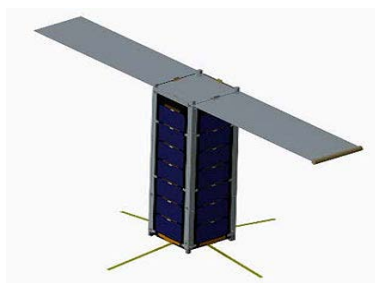
November 2017

Quantum Technologies in Space

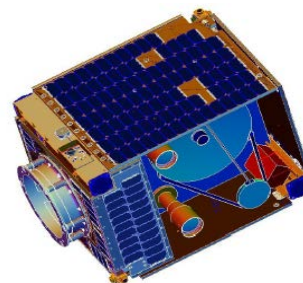
Intermediate Strategic Report for ESA and national space agencies  
November 2017



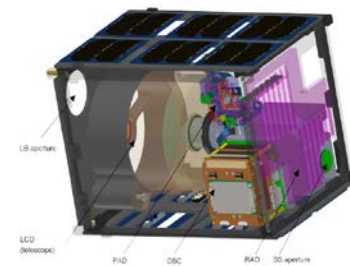
新加坡SpooQy-1 (2019年) 美国CAPsat (2021年)  
纠缠源Optica 7,734-737 (2020) 探测器



英国QUARC



加拿大QEYSSAT  
(2022年完成研制)



奥地利和法国NanoBob

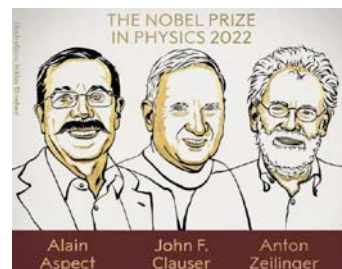
# “墨子号”——引领空间量子通信发展

“墨子号”的成功实施为推动该领域的发展进而得到国际学术界的广泛重视做出了突出贡献



2022年诺贝尔物理学奖：用纠缠光子进行实验，确立了贝尔不等式的违背，开创了量子信息科学

*“for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science”*



2016年Graz地面站测试



诺奖发布会上专门介绍“墨子号”洲际量子通信实验



2017年洲际QKD实验

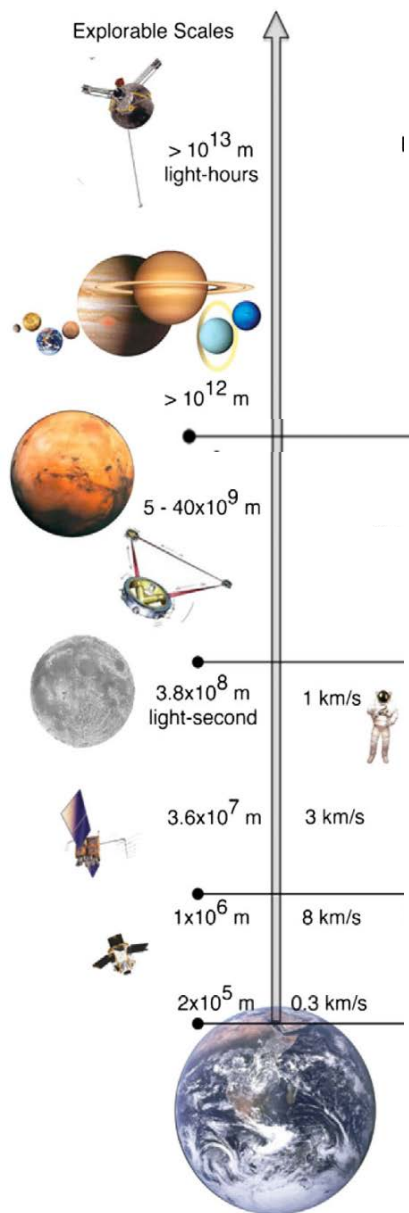
# “墨子号”——引领空间量子科学发展

受邀撰写空间量子科学综述文章，总结“墨子号”为代表的研究成果，对未来发展方向进行梳理和展望



Rev. Mod. Phys. 94, 035001 (2022)

空间  
量子  
科学  
发展  
趋势



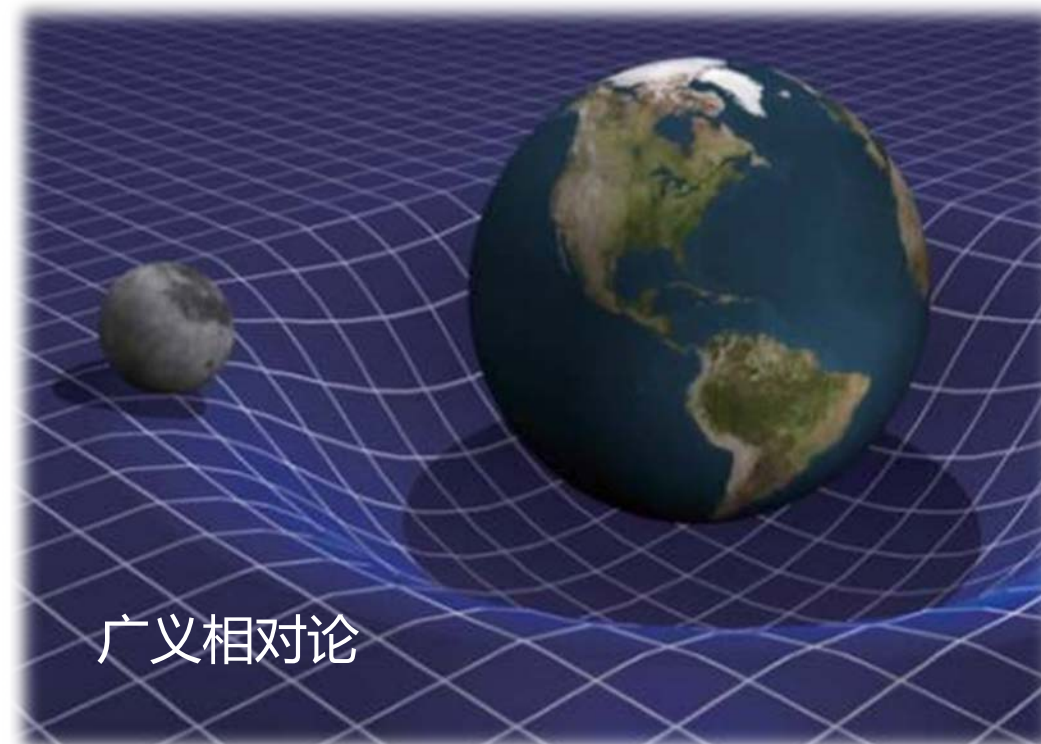
➤ **太阳轨道&深空**：空间引力波探测、暗物质探测、量子引力

➤ **地月轨道**：观测者参与的Bell test、基础物理检验

➤ **高轨平台**：量子通信、时频传递、高精度光钟、量子力学与广义相对论融合

➤ **低轨平台**：量子通信

# 引力场中的量子效应研究



量子力学	广义相对论
微观	宏观
量子化	连续性
非定域性	定域性

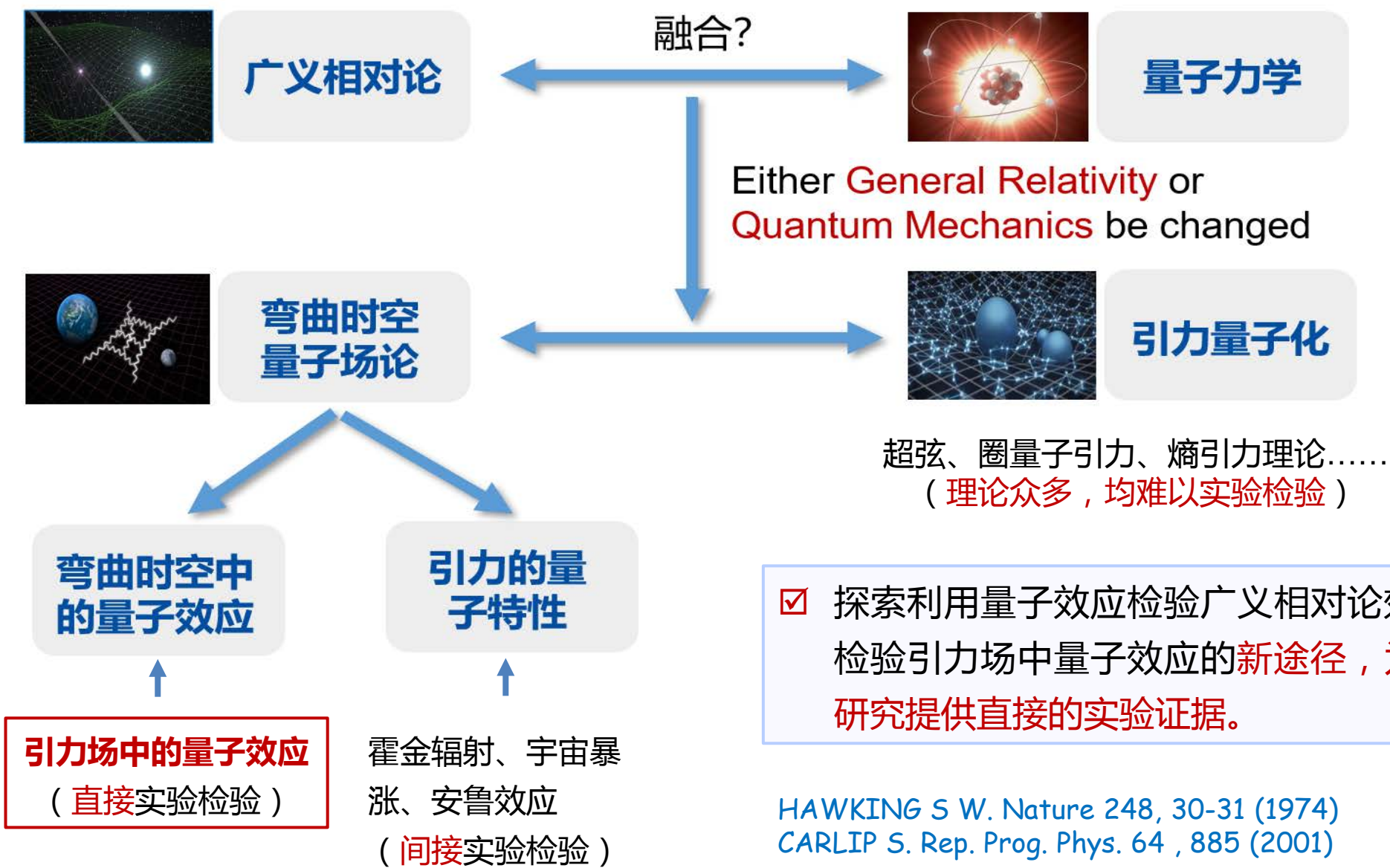
CARLIP S, Rep. Prog. Phys. 64 (8): 885 (2001)

理论局限：引力无法被量子化



实验上：如何探索两大理论间的交融调和？

# 引力场中的量子效应研究

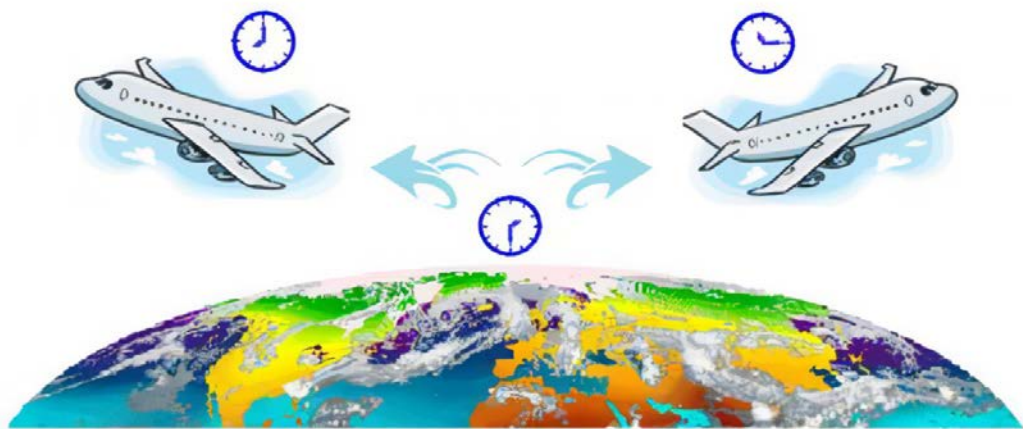


# 量子干涉测量时间膨胀效应

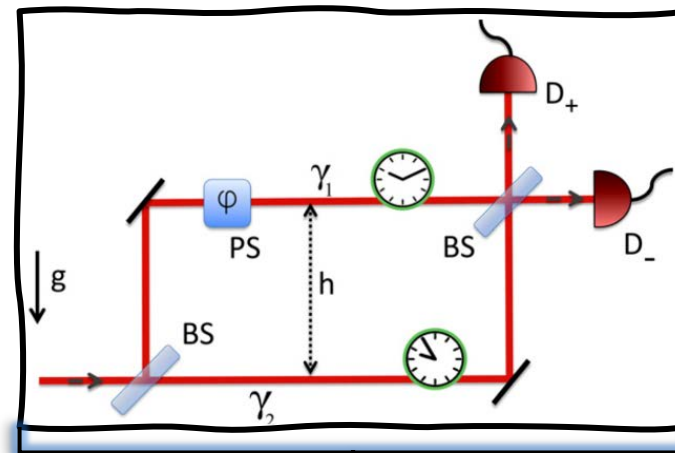
## 时间膨胀效应

- ☑ 引力导致的时空曲率越大，时间就过得越慢
- ☑ 目前已经已得到较好证实（经典体系）

Hafele and Keating Experiment



Hafele C., et al., Science, 177: 168-170 (1972)



引力场中粒子的本征时间作为探针测量时间膨胀效应

ZYCH M, et al, Nat. Commun. 2: 1-7 (2011)

引力场下的单光子干涉

粒子波函数的概率幅诠释

态叠加原理

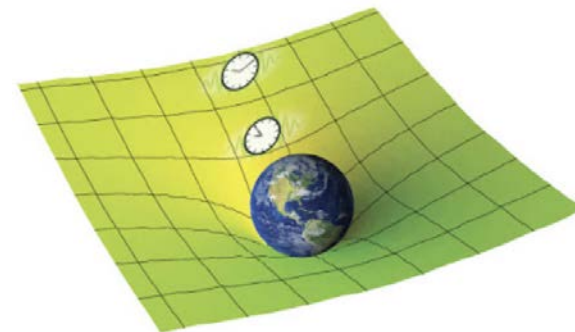
双光子/多光子干涉 (HOM干涉等)

双光子叠加态 (量子纠缠)

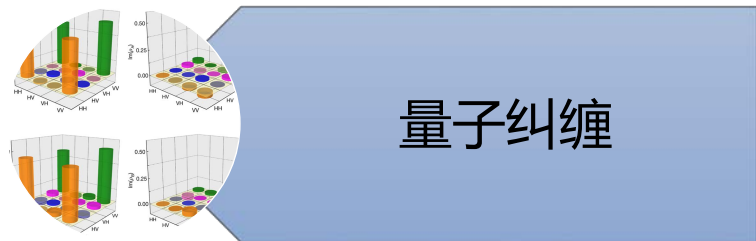


# 量子干涉测量时间膨胀效应

量子干涉测量弯曲时空  
中的时间膨胀效应



单光子概率幅度干涉，  
存在经典对应



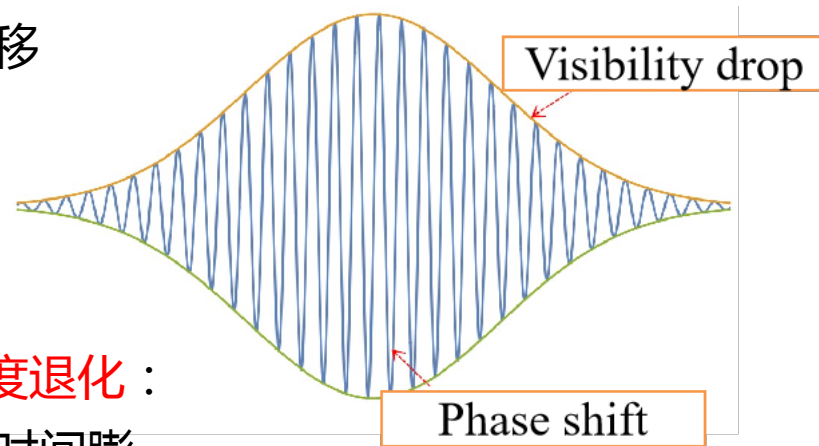
进一步排除局域隐变量  
模型影响，不存在经典  
对应



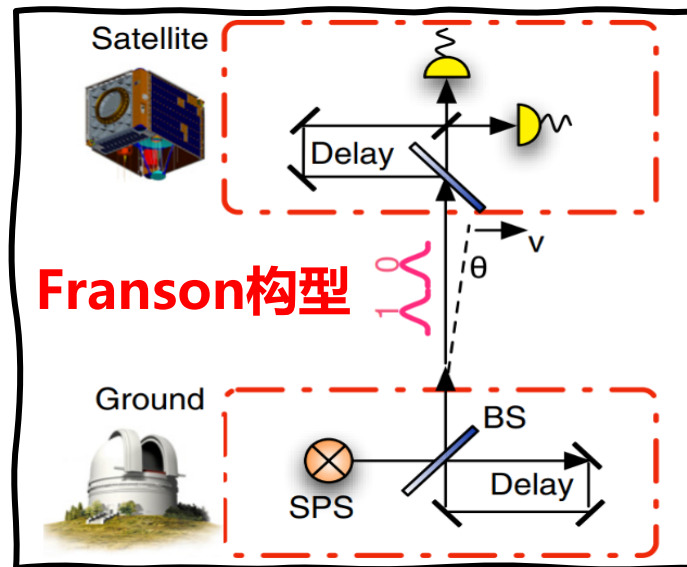
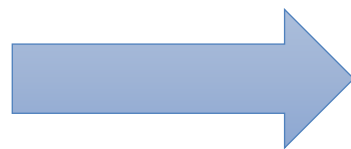
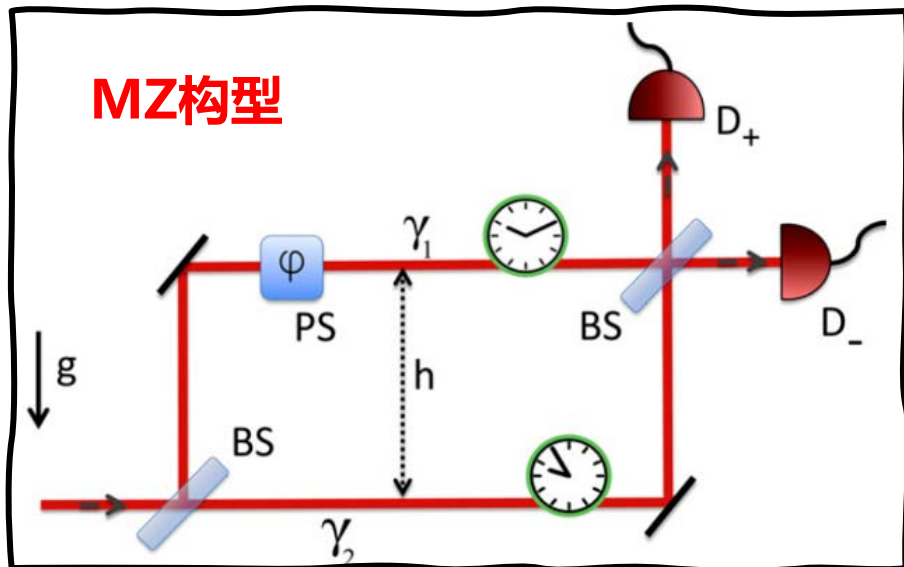
光子的聚束效应，不存  
在经典对应

测量相位变化：  
同时可解释为  
引力红移

测量可见度退化：  
仅能采用时间膨  
胀效应诠释



# 引力场中的单光子干涉



1. ZYCH M, et al, Nat. Commun. 2(1): 1-7 (2011).
2. ZYCH M, et al, Class. Quantum Grav. 29(22): 224010 (2012).
3. BRODUTCH A, et al, Phys. Rev. D 91(6): 064041 (2015).

1. RIDEOUT D, et al, Class. Quantum Grav. 29(22): 224011 (2012).
2. TERNO D R, et al, Phys. Rev. D 101(10): 104052 (2020).
3. MOHAGEG M, et al, arXiv:2111.15591 (2021).

时间膨胀效应导致相移：

$$\varphi_{td} = \frac{2\pi g \delta l R_e h}{\lambda c^2 (R_e + h)}$$

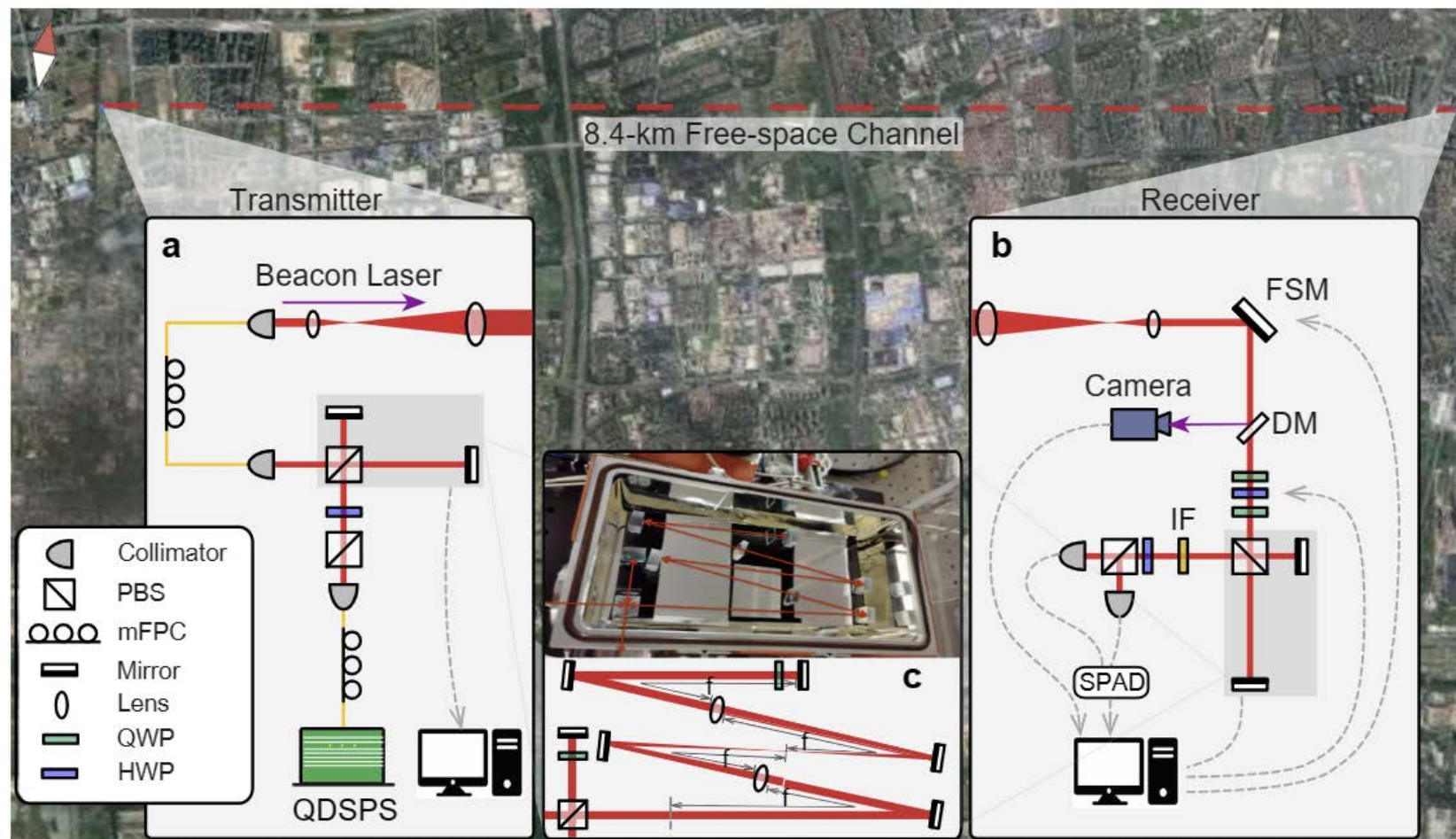
**广义相对论效应 (按10mrad引力相移) 对干涉仪尺寸需求：**

- ☒ 地面高度差20米，干涉仪基线长度~1000km，  
**Mission impossible**
- ☒ 低轨卫星 (500km) 干涉仪不等臂量~1km，  
**Mission impossible**
- ☑ 中高轨 (10000km) 干涉仪不等臂量~20 m，  
**Nothing is impossible: 更好的平台是我们做好科研的关键**

# 上海8.4km单光子干涉实验

## 对星地单光子干涉实验进行技术可行性验证

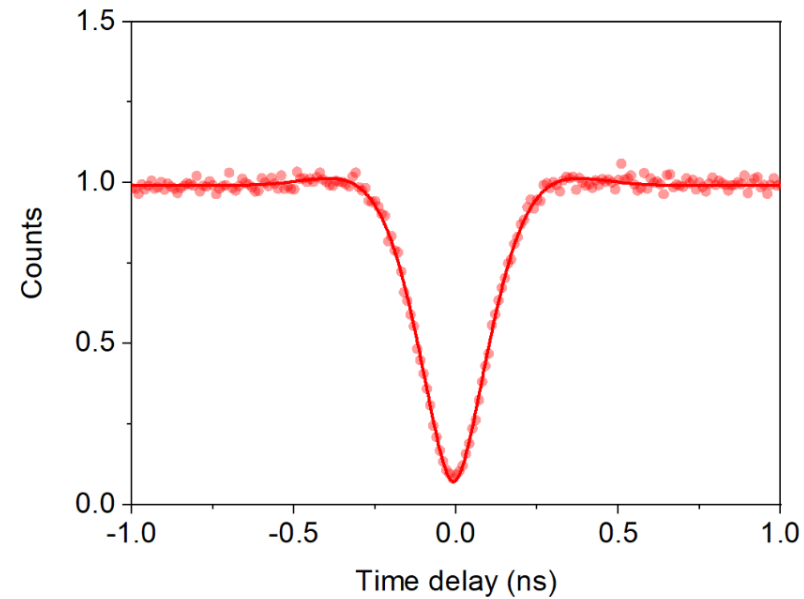
- ✓ 8.4km水平大气链路：垂直大气等效厚度8-10km，模拟大气链路下的Franson构型干涉仪
- ✓ 采用高品质单光子源：实现单光子的相位读出
- ✓ 制备独立的超稳光干涉仪：独立的噪声环境
- ✓ 识别并压制相位噪声：为未来星地实验识别主要噪声源



# 上海8.4km单光子干涉关键技术

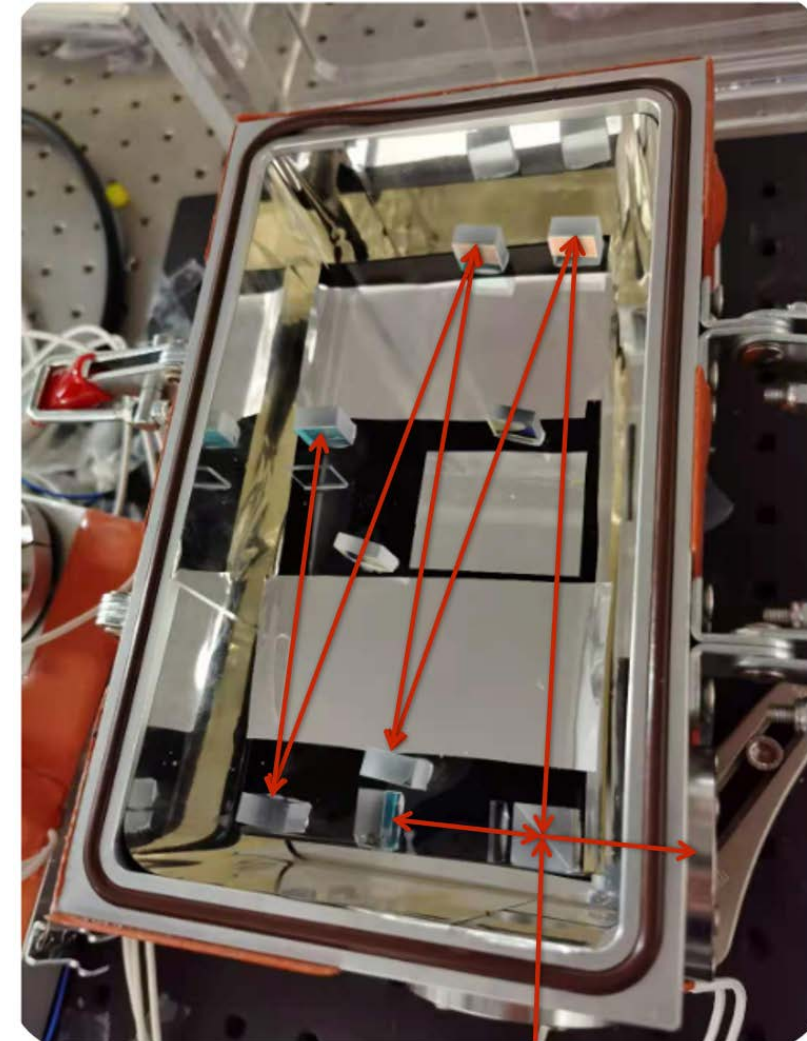
## 关键技术一：高亮度高品质量子点单光子源

- ☑ 单光子性  $g^2(0)=0.071\pm 0.005$
- ☑ 亮度 $\sim 0.4\text{GHz}$



## 关键技术二：全光粘干涉仪及噪声分析

热传递	• $0.137\text{mrad/s/K} \times \Delta T$
气压	• 发射端 $0.08\text{mrad}$ • 接收端 $0.1\text{mrad}$
大气湍流	• 横向 $0.3\text{mrad}$ • 轴向 $0.001\text{mrad}$
波长抖动	• $0.002\text{mrad/day}$
散粒噪声	• $4.3\text{mrad}$
单光子探测器	• $15.6\text{mrad}$



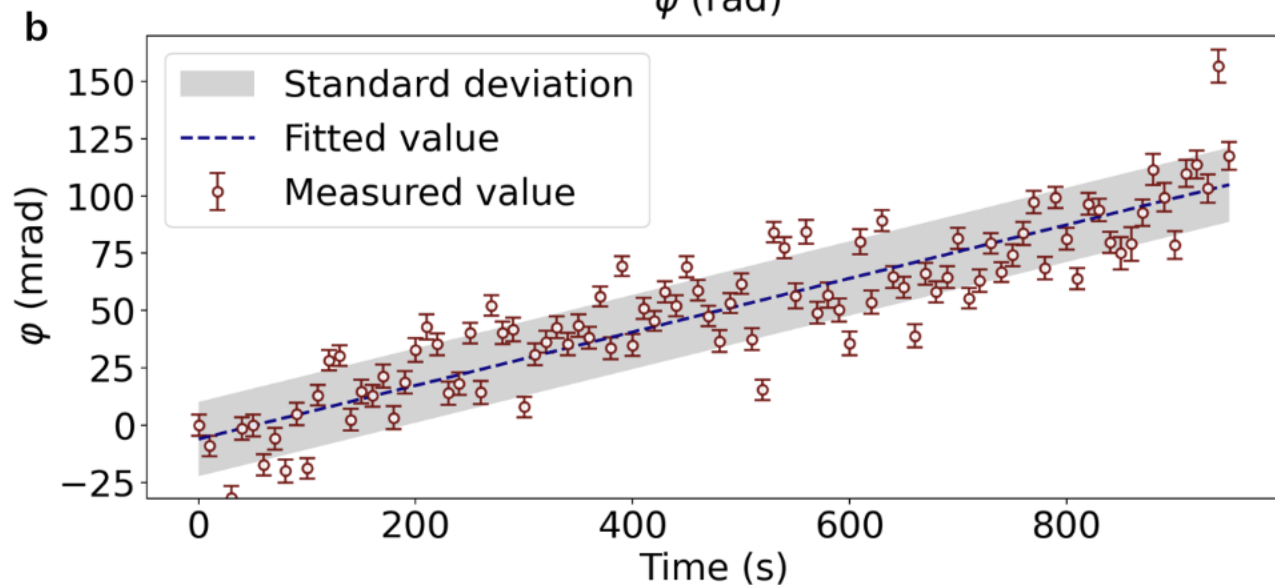
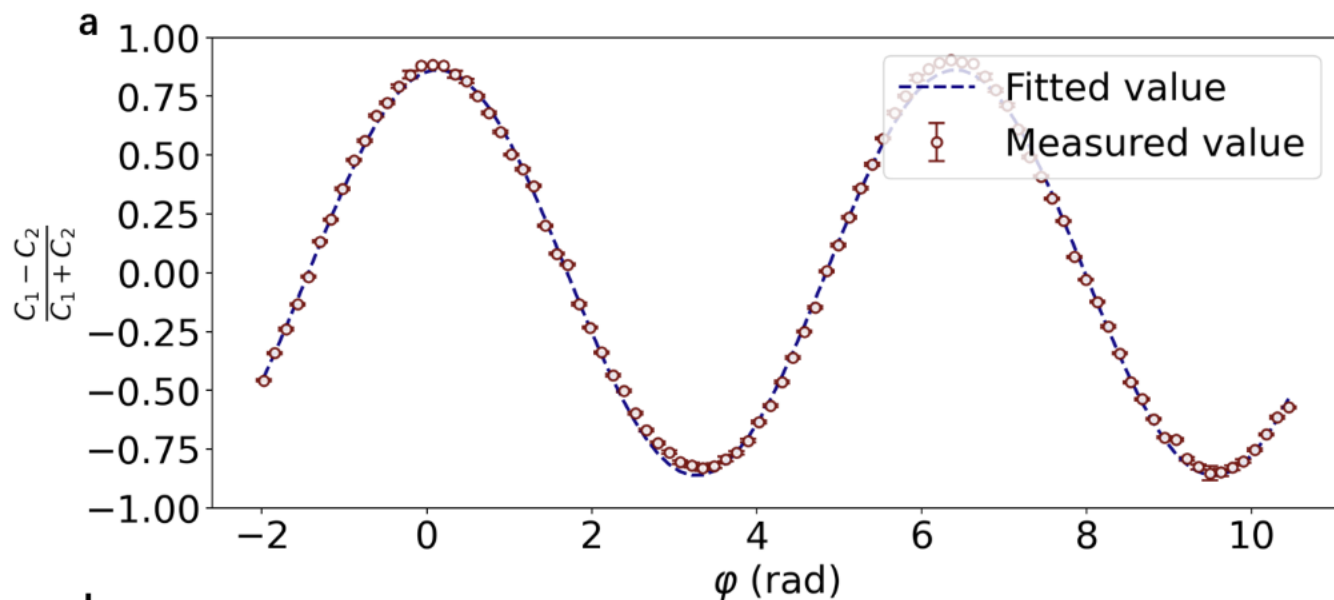
# 上海8.4km单光子干涉实验结果

- ☑ 外场多模干涉可见度  $0.863 \pm 0.004$
- ☑ 相位漂移速率（长期稳定性）：  
 $0.117 \pm 0.006 \text{ mrad/s}$
- ☑ 相位噪声（短期稳定性）：  
**16.2 mrad**

干涉仪温漂引起：目前  
预估  $0.137 \text{ mrad/s/K} \times \Delta T$   
( $\Delta T < 1 \text{ K}$ )，未来可采用  
更优温控及ULE基底  
优化

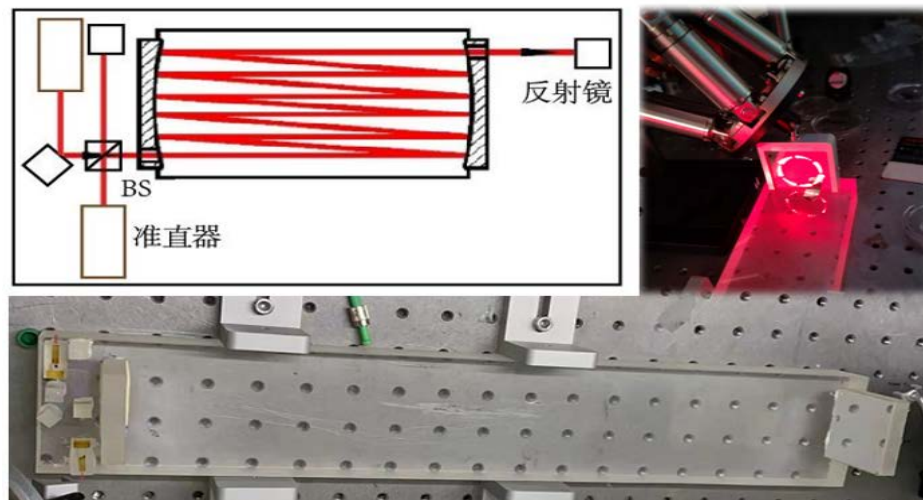
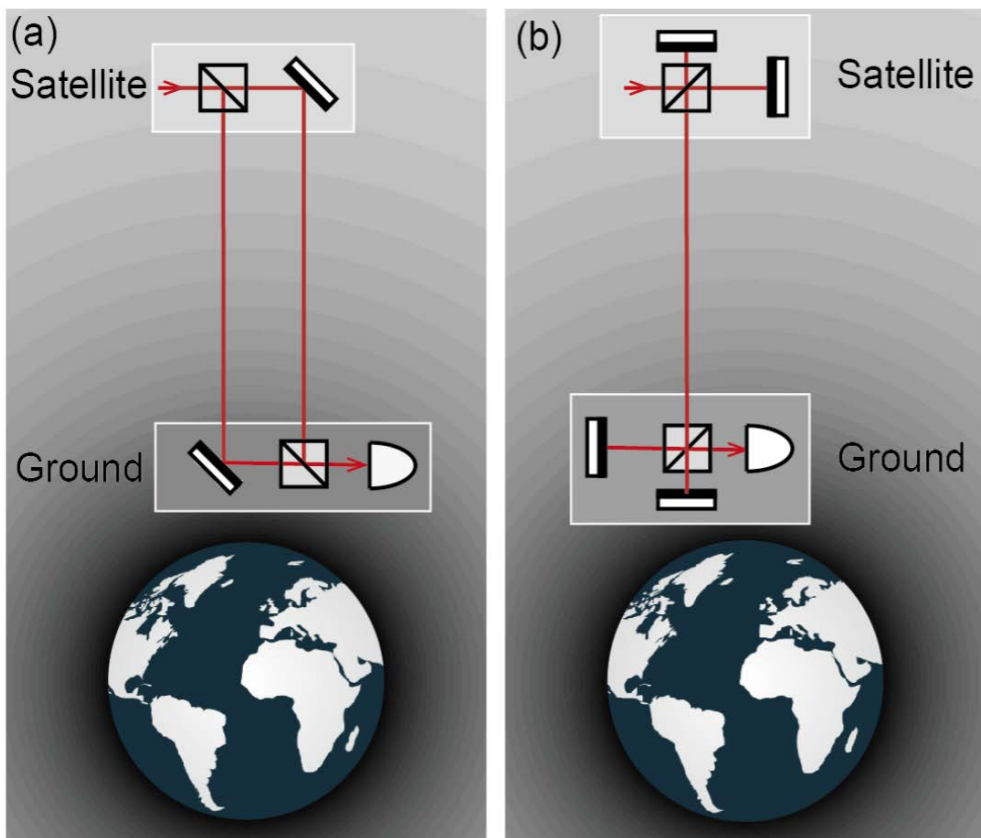
单光子探测器在大气变衰减  
环境下响应度不一致性引起，  
未来可采用时间复用的单探  
测器测量方案优化

实验验证了星地单光子干涉的技术可行性



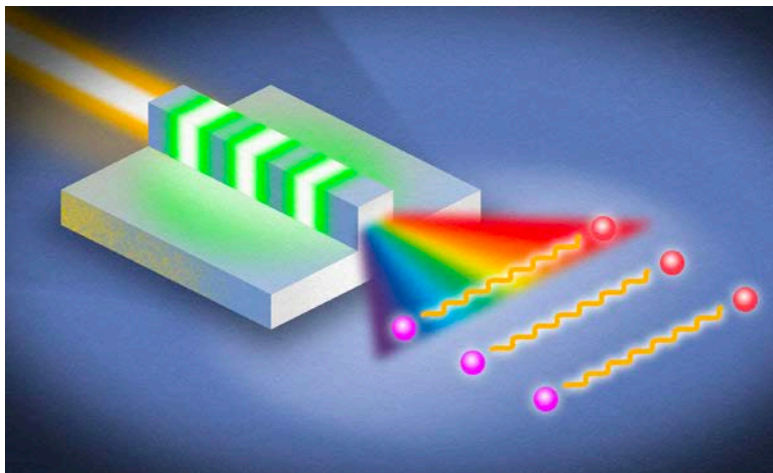
# 引力场中的单光子干涉

关键技术一：高稳定Optical bench，光线折叠技术



- ✓ 稳定性优于 2mrad
- ✓ 不等臂量 > 20m

关键技术二：高品质星载单光子源



- ✓ 产率  $\sim 10^{10}$  pairs/s
- ✓ 单光子性  $\sim g^2(0) < 0.1$

# 中高轨量子科学实验卫星

全天时量子密钥分发  
信道效率要求最高

单光子干涉实验  
轨道距离有大范围变化

星地时频比对  
万公里级信道下进行  
系统标校和技术验证

光钟自评估  
卫星平台保障超稳、  
超净实验环境

初始轨道：  
大椭圆轨道  
近地点约10000km

过渡轨道：圆轨道  
20000km

最终轨道：地球同步  
36000km

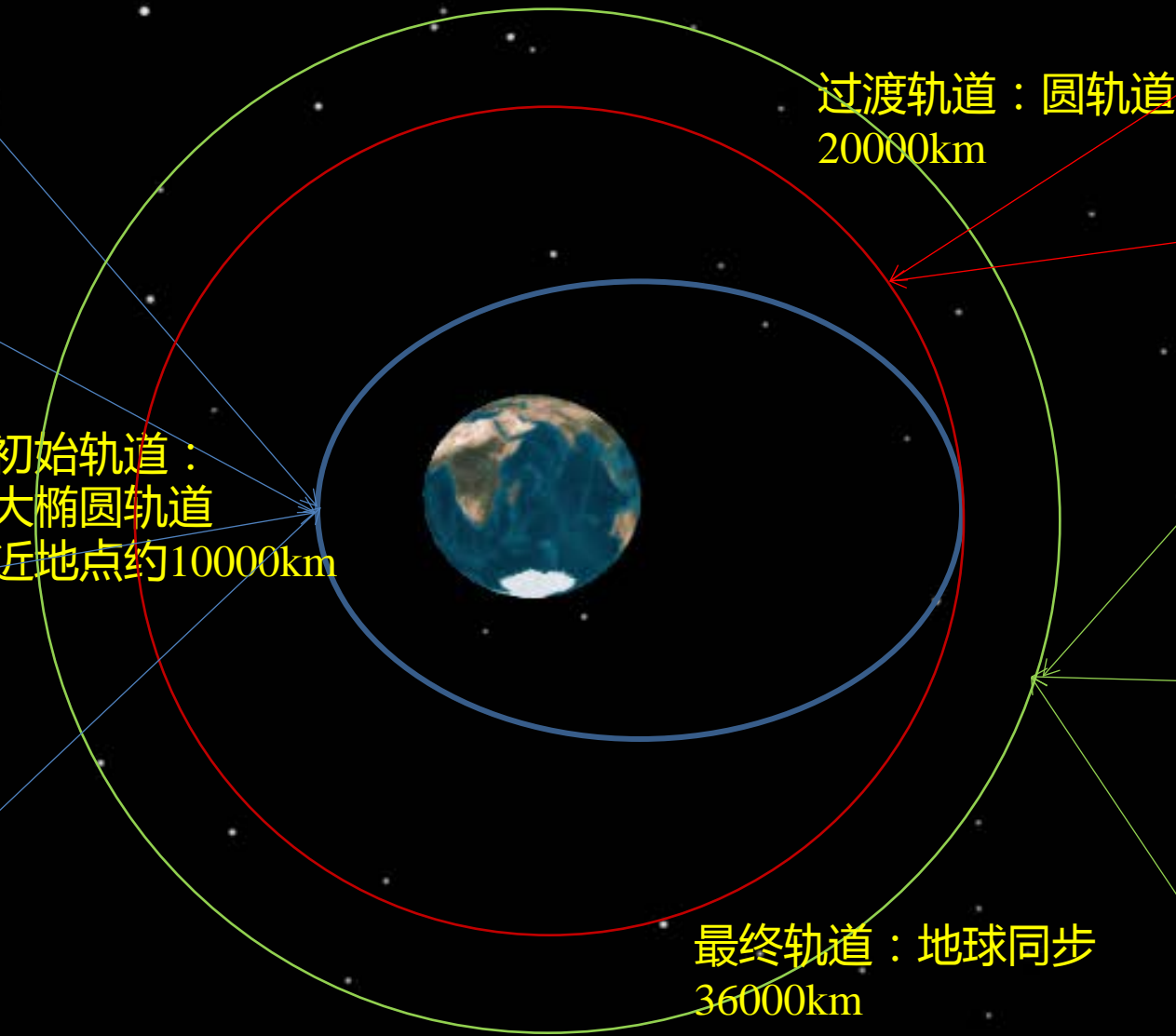
量子纠缠分发  
需要长时间数据积累  
万公里地面站共视

星地共视时频比对  
覆盖全球的时频比对

量子密钥分发  
广域长时间覆盖

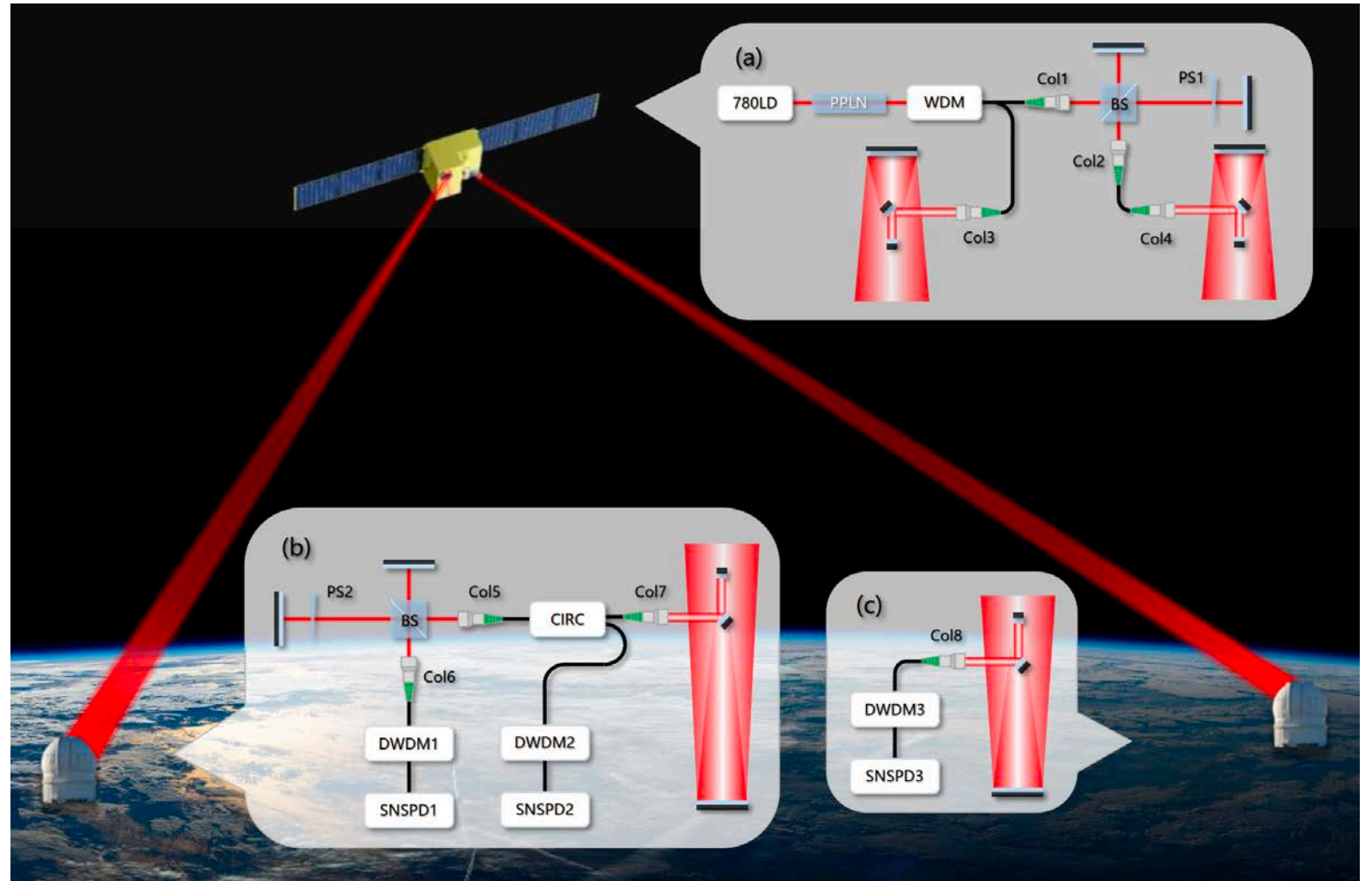
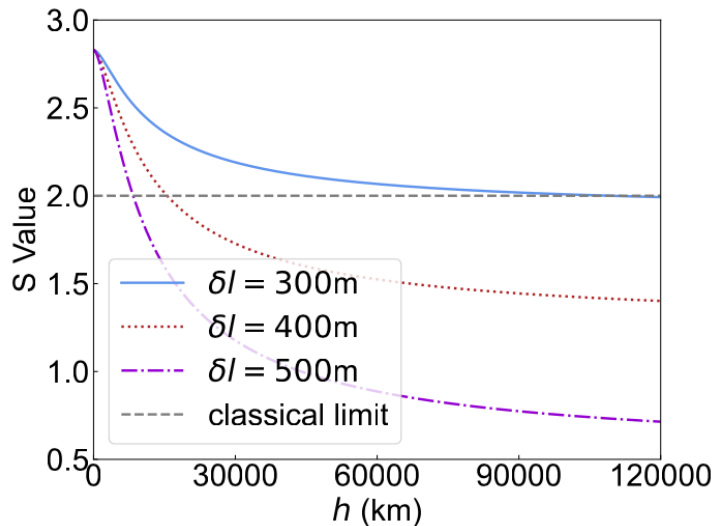
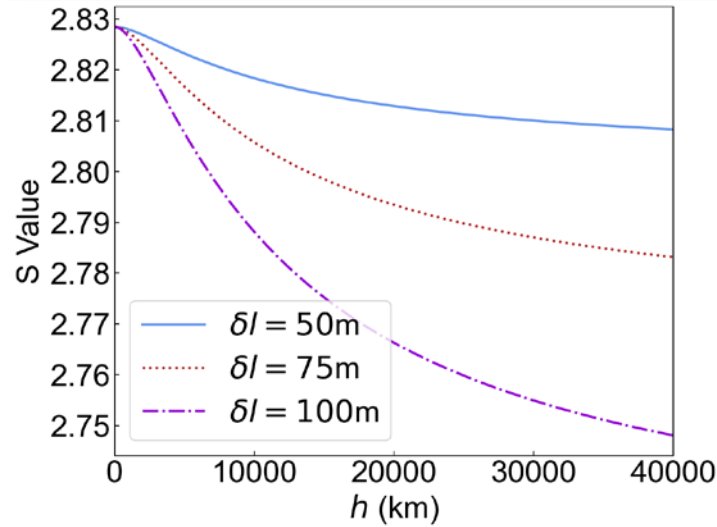
时频比对与光频标  
新一代时间频率基准的  
国际合作研究

拓展科学实验  
引力致纠缠退相干  
单光子干涉  
光子通信

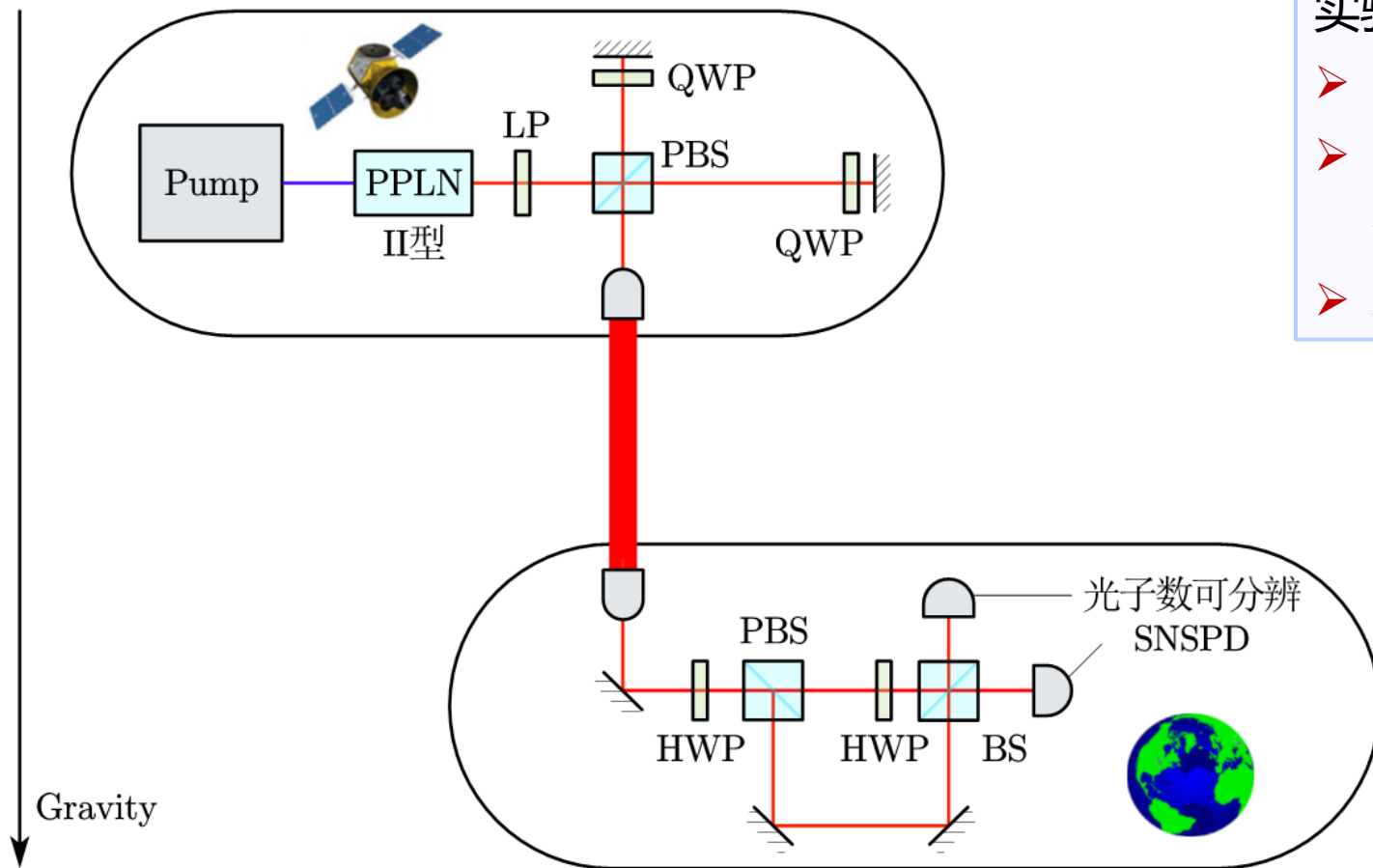


# 引力场中的纠缠退相干方案设计

- ☑ 参量光子分别经过星地干涉仪： $\frac{1}{\sqrt{2}} (e^{i(\varphi_1+\varphi_2+\varphi_{td})} |LL\rangle + |SS\rangle)$
- ☑ 卫星轨道高度变化引入相移，会使得CHSH不等式无法破缺

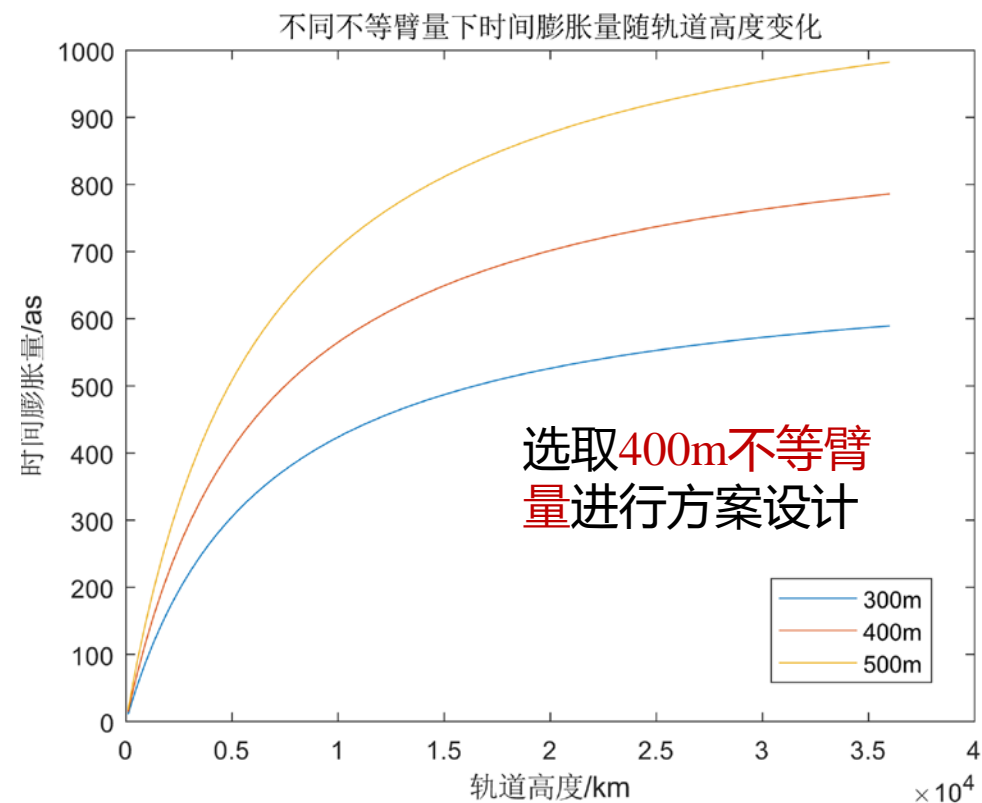


# 引力场中的双光子干涉实验方案



实验装置：

- II型PPLN晶体产生波长简并参量光子对
- 卫星及地面的不等臂MZ干涉仪和迈克尔逊干涉仪及星地链路构成Franson干涉仪
- 地面光子数可分辨探测

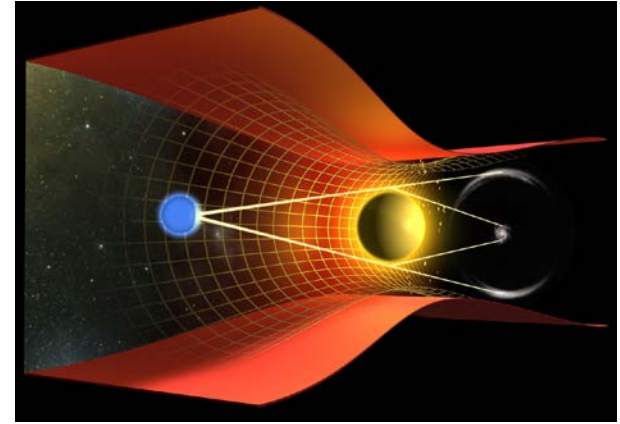


# 量子技术与天文观测的相遇

星光用单模光纤收集后直接干涉？

天文尺度：单光子干涉，是否会携带宇宙空间中不同引力场的信息？

量子纠缠能够辅助星光干涉？



引力透镜——Which-way 测量实验



星光干涉 + 量子辅助

# “墨子号”量子卫星地面站在其他领域的交叉应用情况

- ☑ 与中国科大天文系合作改造**德令哈**量子通信望远镜，开展**天文巡天**，映射测量活动星系核黑洞质量
- ☑ 与上海天文台、**紫金山天文台**合作改造**德令哈**量子通信望远镜，国际上首次实现了**碎片目标高精度观测**，大大拓展中国激光测距台站分布。
- ☑ 与**新疆天文台**合作改造**南山**量子通信望远镜，开展银河系恒星物理参数精确测量、致密天体动力学分析研究和近邻致密矮星系观测研究等，填补我国天文**光谱观测**在西部的空白



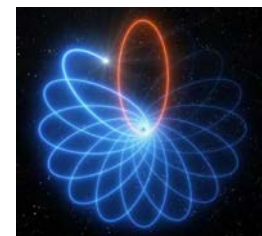
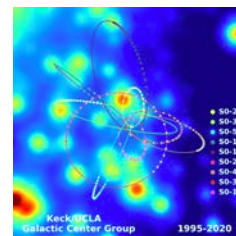
# 研究背景

VLT装置图



## 2020年诺奖：

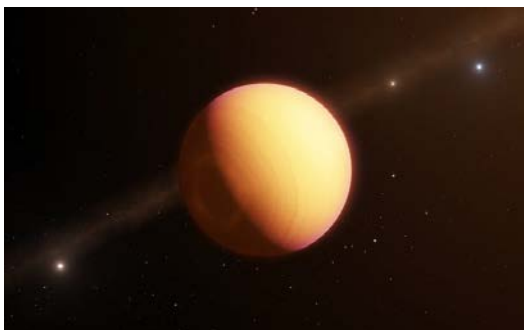
利用大口径望远镜的合成孔径干涉成像技术“发现银河系中心超大质量天体”



围绕银河系中心的史瓦西进动

Astronomy & Astrophysics, 2020, 636: L5.

## 2019年诺奖：“发现系外行星”



- 利用合成孔径干涉成像技术正在成为观测系外行星的重要技术手段。

Keck装置图



# 进一步发展需求

干涉基线的长度决定了角分辨率： $\lambda / B$

对干涉基线长度的进一步拓展是该领域重要的发展趋势之一

公里级光学阵列即可比拟地球尺度毫米波望远镜阵列（EHT）分辨率

$$\Delta\theta \sim \lambda / B \sim 10^{-10} \text{ rad}$$

➤ 毫米波  $\sim 10^{-3} \text{ m}$

➤ 地球尺度基线  $\sim 10^7 \text{ m}$



➤ 可见光  $\sim 10^{-7} \text{ m}$

➤ 公里级基线  $\sim 10^3 \text{ m}$

将推动在黑洞天体物理与引力波研究、暗能量与宇宙膨胀历史和暗物质空间分布以及深空定位等重大基础性前沿问题方面取得突破性成果。

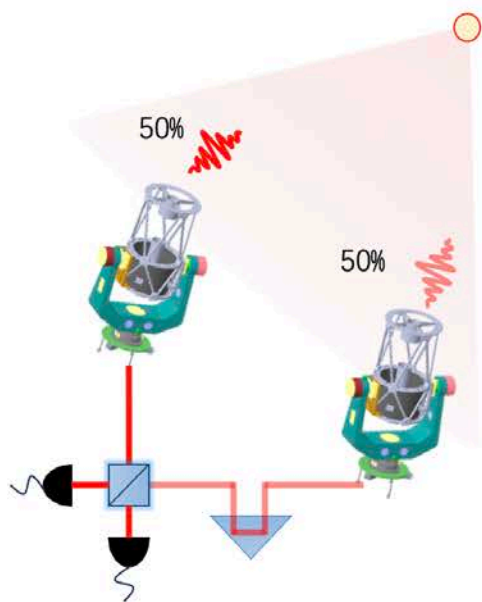
## 现有技术路线已接近极限：

- 光学波段受散粒噪声的影响，无法通过外差干涉的方法摆脱干涉信道衰减的制约
- 真空管干涉信道难以大幅度延伸距离

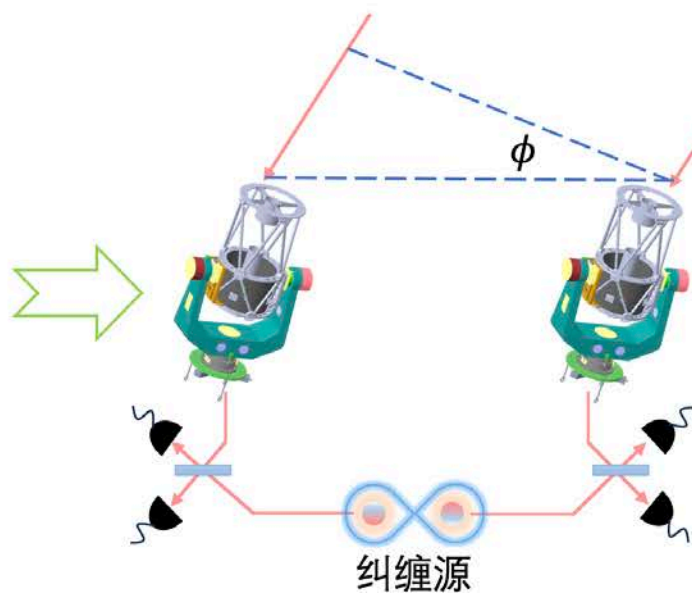
如何大幅度突破光学合成孔径望远镜的基线距离？

# 研究思路

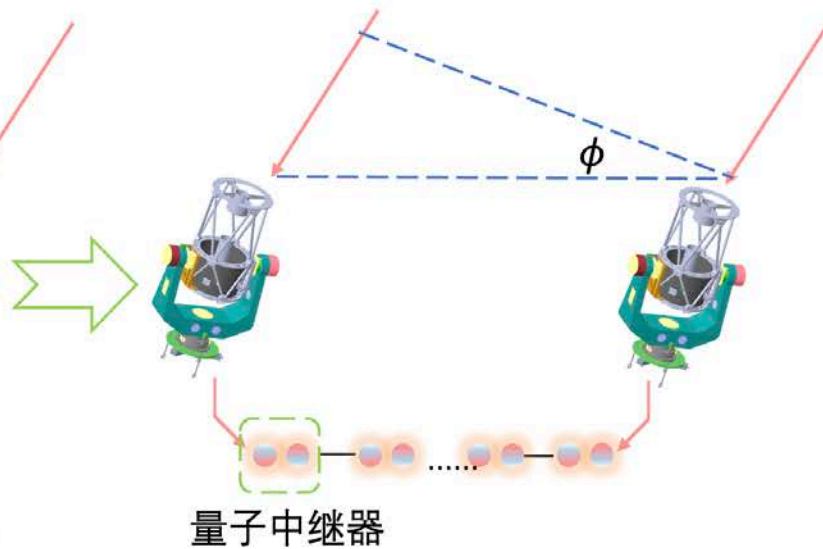
## 摆脱干涉信道衰减的制约



单光子直接干涉



基于量子纠缠的星光干涉



基于量子中继辅助的星光干涉

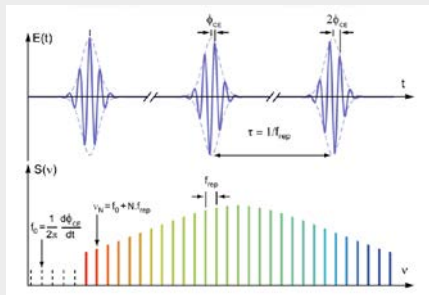
在**纠缠分发**的帮助下，**量子隐形传态**可以不直接传光量子本身，从而不再受到信道的制约。要实现远距离的纠缠分发，需要借助**量子中继**。

# 研究思路

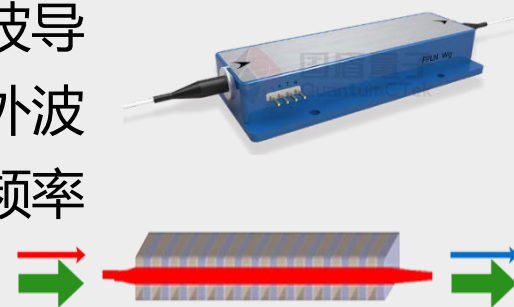
## 有效拓展信道距离

- **光纤信道**方便铺设，适应天文台址需求，便于拓展基线长度。
- 在量子通信和**时频传递**中发展的光纤稳相技术可以很好的解决光纤信道的相位噪声问题。
- 量子通信中发展的**频率转换**技术可以突破光纤信道的频率窗口限制，满足天文观测需求。

- 利用光学频率梳的线性光学采样干涉技术，可有效消除链路中的噪声



- 基于周期极化铌酸锂波导实现对近红外及中红外波段单光子进行高效率频率转换



## REVIEWS OF MODERN PHYSICS

Recent Accepted Authors Referees Search Press About Editorial Team

Access by

### Micius quantum experiments in space

Chao-Yang Lu, Yuan Cao, Cheng-Zhi Peng, and Jian-Wei Pan  
Rev. Mod. Phys. **94**, 035001 – Published 6 July 2022

在对全球量子网络及其在空间科学、深空探测、地球尺度光学望远镜阵列等方面的应用进行梳理的基础上，提出了解决思路

### **解决思路：Quantum-enhanced Telescope Array (QUANTA)**

- 在远距离双场量子密钥分发（量子干涉）中发展起来的**长光纤锁相技术**为基于光纤的长基线干涉提供了可能（km~10km级）；
- 利用量子中继(量子辅助干涉)解决**弱光传输损耗**和**光学延迟线**问题（> 10km，~千公里）。

# 发展趋势

研讨会结论：量子信息技术和天文光学干涉结合有望成为下一代天文观测的重要手段



第一次研讨会 @ 合肥 2022.08



第二次研讨会 @ 济南 2023.05



第三次研讨会 @ 南京 2023.10



美国光学学会量子年度会议  
Quantum 2.0 (2023.6.18)

## Quantum-Enhanced Telescoping Workshop @USA

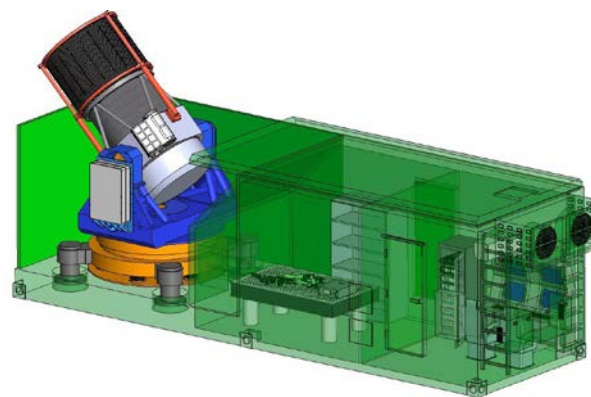
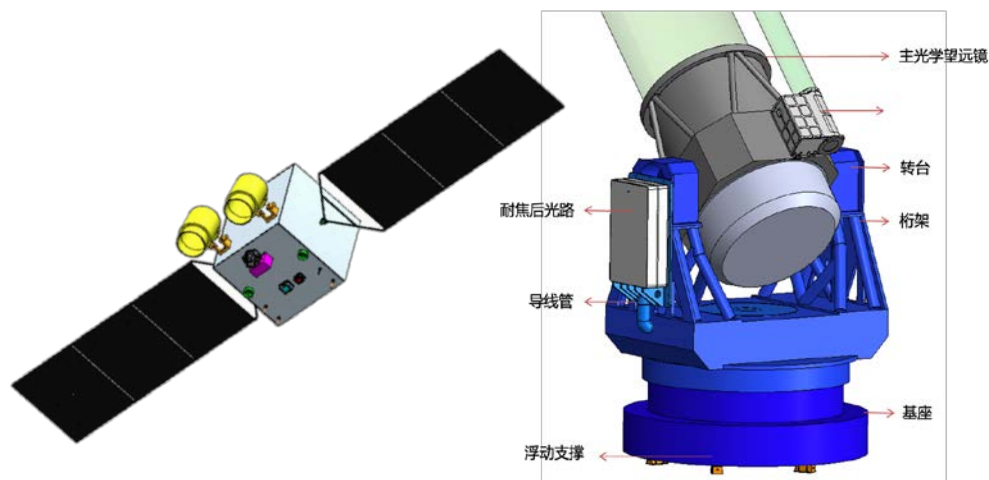
Sunday, 18 June 09:00 – 17:30  
Centennial FG

The angular resolution of conventional very long-baseline interferometry (VLBI) in the optical (visible and near-infrared) spectrum is currently limited by the need to combine coherent optical fields collected by separated telescopes. This becomes impractical over more than a few hundred meters. Recent proposals that utilize quantum resources, such as quantum memories and entanglement, have shown promise to obviate the need to directly combine the signals from separated telescopes and thus enable significantly longer baselines, leading to greatly increased resolution.

The workshop aims to bring together astronomers and quantum information scientists to discuss the emerging role of quantum technologies for improved astronomical observations. It will highlight current experimental and theoretical progress as well as future areas of research.

# 团队

☑ 依托“中高轨量子卫星”相关工程技术团队，未来计划建设2m以上（固定）、1.2m移动望远镜



☐ 推动“天文光学与量子技术联合实验室”建设

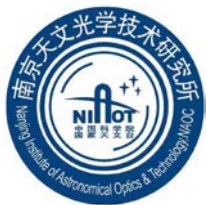
## ☐ 主要合作单位



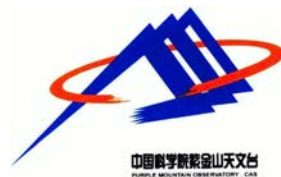
中国科学  
技术大学



中科院  
国家天文台



中科院天光所



中科院紫台



中科院高能所

.....

谢谢!



57 | THE WORLD UNIVERSITY RANKINGS

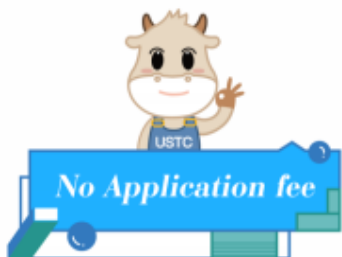
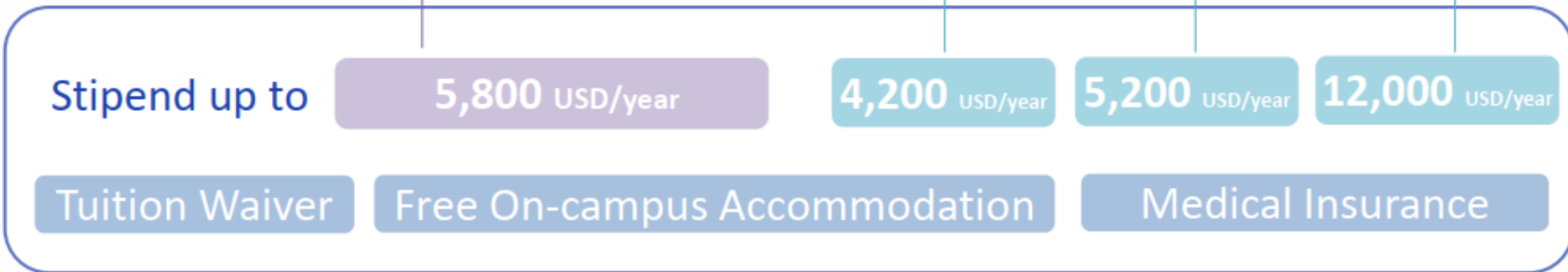
94 | QS WORLD UNIVERSITY RANKINGS

102 | U.S. News & World Report

### Non-degree Programs



### Degree Programs



All you need to do is

1. Check your eligibility
2. Submit the online application

Application website: <https://ic.ustc.edu.cn>  
Email Address: [isa@ustc.edu.cn](mailto:isa@ustc.edu.cn)



@STUDY AT USTC  
Follow us to know more about USTC.



Learn more