

人文解读“四大未知疆域”(太空深海极地网络)系列讲座第一场

“墨子号”卫星的全球第一带来的中国式科技创新启示

王建宇：科学原创+中国合作领跑量子通信

嘉宾主讲

物理学在 20 世纪前期主导着科学的发展,其中有两大发现——1900 年普朗克发现量子论,1905 年爱因斯坦提出狭义相对论,从对人类文明的发展而言,量子力学的贡献要更大些。量子力学被誉为最难懂的学科,而“墨子号”卫星的科学原理源于量子力学的分支——量子信息学中,量子通信和量子计算是其主要应用。

1927 年 10 月,在布鲁塞尔召开了量子力学第五次国际会议。量子力学基本形成体系。有张合影(见图 2)被广集中了地球上三分之一智慧,里面除可看到爱因斯坦、居里夫人外,还有量子力学世界里的功勋科学家,如普朗克、海森堡、玻尔、薛定谔等等。这些科学家发现了量子世界中几个重要的原理,比如:阐释不同条件下分别显示波动或粒子性质的“波粒二象性”;粒子介于 0 和 1 之间的“量子叠加态”;也发现了量子的“测不准原理”和“不可克隆原理”。

“墨子号”成功带来的国际反响

“墨子号”是“十二五”期间中科院先导项目中首批启动的四颗卫星之一,其中第一颗“悟空”用来探索暗物质,第二颗是做空间科学实验,第三颗就是“墨子号”,即将发射的第四颗用于探索黑洞。

墨子号的使命:三大科学任务、五大工程任务

“墨子号”严格说来是量子科学实验卫星,而不是通信卫星。我们首先要证明三大科学目标:一是实现星地高速量子密钥分发,将卫星上产生的量子密钥,分发到光学地面上,它的可行性意味着可以彻底解决经典密钥分发体系的安全漏洞;第二要做量子纠缠分发实验,证明量子理论完备性;第三是量子隐形传态实验,这对物理学有着重要的科学意义。后两个目标属于验证量子力学原理的实验。

对于工程目标而言,要造一颗卫星;地面要做四个接收站、一个发射站,形成天地链路;然后发射上天并帮助科学家完成所有实验。

量子通信为何非要到天上去做?目前在地面上可以利用光纤网进行量子通信,但量子在光纤里会衰减,可靠传输距离只有 100 公里,中国科大建了超千公里的京沪量子通信干线,是靠一段段送过去,多一个中继点就会少一份安全。而且要做全球的量子密钥分发,在国外建中继点还是问题,通过卫星是一个最好的办法。空间量子网和地面量子网合起来,才能形成全球完整的量子通信网。由于量子密钥在分发过程具有绝对安全性,这个实验的意义不同一般。

量子纠缠和隐形传态实验的重大科学意义

量子纠缠是上个世纪量子力学中最悬乎的一件事情,爱因斯坦认为“这是遥远地点之间诡异的互动”,他觉得一定是量子力学的理论不完备,他提出相对论的确定性,认为一个粒子测量不可能对另外一个粒子产生作用,而量子力学的非定域性认为,一个粒子测量有可能瞬间改变另外一个粒子,谁对呢?做实验!上世纪 60 年代,玻尔提出一个可验证纠缠是否存在的不等式。1972 年起,不断有人做出实验了,但被人质疑实验距离太近,不属于类空间间隔。2011 年中国完成了 100 公里的实验,那么 1000 公里呢?这要通过卫星来验证。同样,如果量子纠缠是存在的,我们也希望在几百、上千公里范围里验证量子纠缠现象和隐形传态,如果成立,意味着多少年后有望改变人类生活。

所以,“墨子号”主要任务是完成一系列的量子科学实验。为节约国家经费,我们设计了一个小卫星,500 公里轨道,640 公斤重量,卫星上装备 4 个用于量子通信的设备(载荷):量子纠缠发射机、量子密钥通信机、专门产生纠缠光子对的量子纠缠源和量子实验控制与处理机。

我们建了五个地面站,北京兴隆、乌鲁木齐南山、青海及德令哈、云南丽江和西藏阿里,选址考虑到可以两两配对,都相距 1200 公里,便于增加纠缠分发实验的时间。纠缠分发就是一个对纠缠的光要发到两个相距 1200 公里地面站,由两个接收系统测量他们是否是纠缠的(如图 4);设两组也方便工程上备份。西藏阿里是发射站,做隐形传态。

为空间量子科学实验提供宏大平台,工程创国际一流

2017 年 1 月 18 日,卫星在发射四个月后正式交付,不仅确认了它可以满足空间量子科学实验的需求,而且已经完成了部分量子科学实验。

量子科学实验卫星是中国人第一次发射,给我们的科学家提供了一个国际一流的量子科学实验超大平台。

“墨子号”这个名字是潘建伟院士起的,墨子在 2400 多年前做了世界第一个小孔成像实验,描述了光是按照直线走的原理,这个名字既彰显又弘扬了中国文化。



3 月 18 日,中国科学院上海分院副院长、量子卫星总指挥王建宇做客文汇讲堂人文解读“四大未知疆域”(太空深海极地网络)系列讲座首场,主讲《“墨子号”的成功与中国式的科技创新》。中山大学天文与空间科学研究院院长、著名科普作家李森担任对话嘉宾。本次演讲音频登录文汇微电台(APP 喜马拉雅·听-搜文汇讲堂 2017)收听。

嘉宾对话

美国、欧共体某些项目的居前与丧失优势和科学决策机制有关

李森:刚才演讲中,多次提到了中国目前的科研决策中“国家行为”,它的优势非常有利于做像“墨子号”这样先锋式的探索 and 实验,这一点我感同身受。第一颗先导卫星“悟空号”同样受益,华裔科学家丁肇中先生在美国主导探测暗物质的 AMS02 实验,但在今天的美国很难发射这样一颗卫星。特朗普近日已宣布要削减科学和技术领域的经费。

在美国,通常由科学家提出计划,然后层层上通到国会和总统,或许还会遭遇政见不合的拉锯战,欧洲需要整个欧共体来集体决策,执行力就会大大下降。就我的研究领域,一年多前美国人宣布探测到了引力波,他们想去太空做实验的计划已经申报了 20 年,在欧共体也是两年后才刚刚通过。这说明中国在决策方面有优越性。

国家支持、开放政策、多元平台确保我们决策的先进

王建宇:十年前,不少人抱怨我们的科技比较浮躁,西方国家如何鼓励原创。通过“墨子号”工程,很多人都改变了认识。这几年,中国的科技发展确实特别快。新世纪后我每年参加的科学院院工作会上,近两年只有国际领先项目才能会上讨论。除了国家支持外,美国的审批制度中有时未必完全是科学性在起作用,夹杂着利益斗争,但在中国,至少从科学家到领导人,都是视该科研是否真正在国际前沿,能否真出结果为标准。

国内外反响:“重回巅峰”论、购买论、淘汰论

“墨子号”成功发射后,国内外反响很大。《科学美国人》评选的 2016 年度“改变世界的十大创新技术”中,“墨子号”作为唯一诞生于美国本土之外的创新技术入选;《自然》杂志 2016 年世界八大科学事件,“墨子号”名列中国航天榜首;《华尔街日报》详细报道了量子卫星发射成功的过程,标题为“沉寂了一千年,中国誓回发明创新之巅”,视其为中国创新能力提升的重要标志。

也有酸溜溜的,如“中国人的科学水平已经实现了量子技术的飞跃,如果我们不把欧盟变成合理有效的整体,我们眼看就会被中国超越。”反面声音,我认为,以中国的科学水平(相较于西方世界)不可能实现量子技术的飞跃,基本从未有过。真实情况是,中国由西方的伙伴(或者收购品)来实现的。”还有一些疑问,比如,美国科学这么发达,为什么造不出量子卫星?日英法都不做而中国做了,是否人家不想做?

有少量非正面声音也不足为奇,也不排除一些恶意见评论,实验结果会说明一切。去验证有争论的事情才有意义。

我认识潘院士半年不到,科学院就启动一个有史以来最大的项目来验证此事的可行性,一下子就组织一个各种人才的队伍,这种速度和方法在国外不太可能。

但国家现在毕竟还是资源少,因此,项目都是好中选优。比如量子通信和量子计算机是国家重大专项,先做科学实验卫星,下一步一定要从实用角度去努力,珍惜好国家对你的支持。

激光领域和半导体领域,中国曾经不落后到丧失商机

李森:中国科学和专家体量越来越大,要想引领国际,国家就必须选一些有可能突破的方向持续支持。前车可鉴,改变了生活及商业的激光领域,中国在美国人之后做出激光器,后来没有持续经费的支持,就丧失了科学和商业先机;半导体,我们本来也不落后多少,但是没有选择性跟上,现在芯片 60%是进口。量子计算和量子通信,现在尽管在实验室阶段,但如果持续支持,直到突破为民用,会给国家带来巨大的改变。

实验的时间有限,地球同步卫星是下一步目标

李森:我现在更多时间在做科普。请教王院长,“墨子号”要在太空里做量子通信的实验,实验时,每次通信可持续多长时间?所含比特量多大?

王建宇:现在用的是太阳同步轨道卫星,绕着地球转一圈大概 100 分钟。每天一个地方只过两次,白天一次,晚上一次。做通信实验有两个条件:卫星要看得见,背景不能太亮。因此,每个地面站一天最多做一次实验,最长 10 分钟左右,多则几百秒,少则几十秒,甚至十几秒。多少比特量?设计指标是要超过每秒种 1K,后来能达到每秒到十几 K,小规模密钥应用已经够了。如每年能产生 1G 的密钥,就能满足国家很多方面的需求了。

量子卫星,如何从跟跑到引领

从量子实验卫星的成功,可以找寻一下中国高科技如何从跟踪到引领之路。“国家 863 计划”全称是“高技术跟踪计划”,但现在中国的水平不可同日而语,这并非一夜爆发的成功。我分四个方面来说。

第一,中国航天技术和空间激光技术有长足进步,航天器发射数量全球第二。

1957 年 10 月 4 日,苏联成功发射了人类第一颗人造卫星,四个月后,美国发射“探险者 71 号,中国在 1970 年发射了“东方红 1 号”。

现在,我国通过载人航天证明了有天地往返、在轨对接控制和人类在外空的生存等能力;探月工程证明了对超远距离卫星有测控和控制能力,“嫦娥 4 号”即将要着陆到月球背面,探月要跨行 38 万公里,接下来探测火星要经过 6000 多万公里;美国卫星对地分辨率可达 0.1 米,但要把轨道降到 120 公里,我们目前在 500 公



①王建宇解读“墨子号”的成功
②第五次索尔维会议与会者合影(1927 年)
③致力于科学传播的李森为现场听众科普了量子传输和隐形传态的概念
④蓝图里可对量子卫星进行测控,进入另五个小圈,可进行量子通信实验,在白色和橙色,或橙色和黄色小圈之间的重叠部分才能做量子纠缠实验

本版摄影 袁婧 丁怡、张师楷参与本版整理

隐形传态投入民用将实现了不起的破坏和恢复

王建宇:能否举个例子,隐形传态如何真正进入应用?

李森:如果我想传输的系统是量子态的,比如量子态的我传输到另一个地方,必须在这个地方把我破坏掉,把破坏掉的信息通过我刚才说的三只鞋的故事分发到另外一个地方去,另外一个地方可以把我的态或者我的人完全恢复。这告诉我们两件事,量子态的我不能拷贝成两个李森;如果想把我传输到外地去,必须把本地李森毁灭掉,第三个地方恢复。如果可以实现的话非常了不起。

量子计算机可能在 50 年左右实现

王建宇:一位资深专家说,量子计算机可能是明天做出来,也可能是一千年以后做出来,怎么理解?

李森:算盘是经典计算机,计算机是体量、容量放大的算盘,电路里面每个逻辑门开和关就是算盘里面的算盘珠。算盘珠只有两个态,出现和不出现,而量子计算不是算盘珠了,它的不确定性原理决定了量子有无穷多个态,可出现也可不出现,概率就在 0 和 1 之间,累加后会有很多很多量子比特。如果把经典计算比喻成走迷宫的一条道,那迷宫只有一条道走出去,量子计算是同时走所有的道,像 1 可出现也可不出现,也可同时出现,但是概率不一样,你可同时走所有的可能性。以倒水为例,这杯水尝试了所有道,量子计算就是倒一杯水的过程,肯定有一条效率最高的通道。

到底何时可以实现,最近我比较乐观,要做量子计算要到微观层面上实现量子态,而且保留足够长的时间,把计算过程完成对科学家是最大的挑战,有可能计算尚未完成,量子态就会破坏掉,现在用离子阱可让量子态保留足够长时间。我预测 10 年实现不了,应该是 50 年之内。

如何突破?需要设计一个中高轨卫星,高度到 36000 公里叫地球同步轨道卫星,如灯高悬在顶随时可用。白天能否做?可以考虑用极窄光学滤波器或者隔离技术,把光滤波器的带宽做得极窄,就有可能。这两个技术有待今后几年突破。

四个基站三层目标的不断挑战,完全领跑于国际

李森:为什么要建四个基站?王建宇:这有一个过程,2007 年潘院士设的目标只是能做成世界第一个密钥分发;2011 年地面青海湖实验做得很成功,科学家要求就提高了:量子纠缠中“贝尔(Bell)不等式破缺”的验证是全世界瞩目的难点,我们能否放上去做?我说风险非常大,他说作为拓展项目;过段时间他看做得很好又说,能否把隐形传态也做进去?就叫额外任务。这样的结果是我们领先了很多年。

“三只鞋上月球”的比喻来理解隐形传态原理

李森:我提议给王院长鼓掌。我解释一下量子态隐形传输,原理说起来很高深。我把一个粒子比喻成鞋,我想把右脚皮鞋送到月亮上去,但量子不可克隆,我怎么送?隐形传输过了 20 多年,有了绝妙之法。我先找一对量子皮鞋,把其中一只送到月球上,我不知道左右,但量子纠缠告诉我们一定是一左一右,现在拿第三只皮鞋不管是一左一右,我想送到月球上,把第三只皮鞋跟我手里所剩一只比较,全是右显然月球的是左脚,就让月球的翻过来,一颗激光,我想送到月球上,把第三只皮鞋跟我手里所剩一只比较,全是右显然月球的是左脚,一看肯定是一左一右,这个好理解,因为第三只鞋和留在手里的配对了,而月球上的那只本来也和留在手里的鞋配对。说起来很简单,道理很深。

你们不理解的话,把我的故事反反复复想两遍。

里的轨道上也能达到 0.5 米分辨率。中国航天每年发射量居世界第二,2016 年是 22 次。结论是:我们是航天大国还不是航天强国,因为像探月、载人航天的创意并非来自我们。

除航天技术外,“墨子号”应用了大量激光技术。1960 年,美国发明了人类第一台激光器,中国第二年也造出第一台,但在产学研上落后于国际。

从 1994 年开始,各国将激光技术用在航天上,美国人研制了多种激光雷达,欧空局 2018 年将发射搭载着更先进的气溶胶/云探测激光雷达的卫星。中国也紧跟上来,2007 年“嫦娥 1 号”上搭载了技物所团队制作的激光高度计,填补了拍摄月球两极地形的国际空白。

激光通信技术也是热点,目前一秒钟可传完一张 5G 多的 DVD 光盘。1995 年日本成功实现星地万公里量级的激光通信,2005 年实现世界首次星间激光通信;2008 年德国实现了首次空间相干激光通信;2000 年美国发射的一颗激光通信卫星因为没能建立星地链路而失败,但在 2013 年他们完成了地球与月球之间的激光通信。我国这次也迎头赶上,在“天宫”飞船上搭载了 1.6G,“墨子号”

上面搭载了 5.1G。这一切说明中国近年来的积累为“墨子号”成功打下了基础。

第二,多年的开放为我国科学家的原创提供了条件,为墨子号注入了灵魂。

潘建伟院士是驰名国际的量子通信知名专家,他有关实现量子隐形传态的研究成果入选《科学》杂志“年度十大科技进展”,并被《自然》杂志选为“百年物理学 21 篇经典论文”,与伦琴发现 X 线、爱因斯坦建立相对论齐名。1970 年出生的他在维也纳大学获得博士学位,他回国后,得到国家上下下的全力支持,而他的导师、奥地利科学院院长席林格(Zeilinger)教授在欧盟却推不动这个项目。

量子密钥分发实验国际竞争非常激烈。2005 年,清华和加拿大的科学家同时提出地面量子密钥分发的原理;2007 年,潘建伟团队和国外团队又同时在实验中实现了光纤量子密钥分发超过 100 公里。接着我们渐渐领先于国外,2010 年中国做了 200 公里光纤量子密钥分发,2007 年奥地利完成了 144 公里自由空间量子密钥分发。

潘建伟另外的贡献是量子隐形传态实验,他的第一篇论文是在国外写的,回

国后先和国外并行,后来逐渐领先。2008 至 2011 年,中科大和技物所联合团队在青海湖边做了大量的实验,一方面是验证量子通信能否上天,另一方面也做理论研究,在一流国际刊物上发文。在量子密钥分发实验中,我们实现了以热气球为平台的运动下的密钥分发,固定平台最远达到 98 公里。后来我们又做了 100 公里的量子纠缠分发和隐形传态,在国际上也是首次。

所以说,公平竞争、科学开放的环境,给科学家提供了创新和领先世界的机会。

第三个多学科交叉融合,强强联合,量子卫星在光电技术上取得突破进步。

一般的卫星对地观测把照片拍完传输下来就完成任务了,而“墨子号”要天上地下光交互对接,还要在卫星上产生量子信号和纠缠光子对,它是量子理论、激光技术和航天工程完美结合,也是真正意义上的国际首次。

我们集中实现了七项关键技术的突破。其中有天地链路高精度跟踪和精确指向。通俗来讲,就是要抓得住、跟得牢、打得准,卫星高速飞行,一千公里以外一出现就得抓牢,并建立光的通信链路,发射的量子光还必须精确指向地面站。为了做纠缠分发,天上的卫星要同时对准两个地面站,并要同时达到同样的高精度,我们都一次获得成功。

有天地链路的单光子接收。在地面、天上要探测到脉冲的光子必须有合适的探测器,我们解决了商用高灵敏度单光子探测器在空间环境下不能长期使用的难题。

有高亮度量子纠缠源。量子源是激光通过非常特殊的晶体干涉出来一对对光子对,极有难度,我们不但做了全世界最亮的量子源,而且发射上天了。

同时突破了近衍射极限光子发射和多源同轴配准、偏振态保持与基矢跟踪测量、高精度时间同步技术等。

简单说来,其难度相当于坐着飞机从万米高空扔硬币,同时扔向地面两个旋转的储蓄罐,硬币不但要击中储蓄罐,而且还要准确地射入细长的投币狭缝里。探测一个光子,相当于地面 1 米口径的望远镜,要看 38 万公里外的月球上燃着的一根火柴。灵敏度如此高!

第四,中国科研组织和管理模式,为“墨子号”的成功发射提供了强有力的保障。

回顾一下,2003 年潘院士回国提出星地量子通信的概念,2008 年立项开展地面攻关,2011 年完成百公里量级的量子密钥分发,2011 年底量子卫星工程立项;2016 年发射。13 年间,凝聚了很多团队;中科大、技物所、上海小卫星工程中心、天文台、光电所、上海光机所、航天科技 8 院等等;主力队员全是 80 后。

以此来看墨子号的成功要素。首先,量子卫星好比如阿波罗登月、载人航天都是国家项目,不是个人、几个小团体可以做成;第二是高新技术的比拼;第三对科学的追求需要爱国精神来支撑;第四是探索未知的理想信念。

由此引发我对中国式科技创新的思考。第一,科学家原求是灵魂。第二,管理层快速决策是资源保障,这是中国特色的高执行力。第三,兵团式多团队联合,工程管理是技术也是艺术和科学。第四是科学团队和工程团队的互补,交叉融合,1+1 大于 2。量子卫星得益于天时地利人和,天时是国家对科学的重视,地利是在开放的全球竞争,人和是团队相互支持。

对今后的发展,我也提出四点,第一,要长期支持,国家要有选择性支持。第二,要有宽容失败的文化。第三,要有多元评价的体制,不能让工程师团队也去做 SCI 文章。第四,在破坏性创新中发展高科技,我们选题上一定要有高度,从跟踪到引领这个阶段,说到底,科学的创新思想还是成功之源。

量子技术,如何改变生活

量子信息学和实际生活密切相关。目前国际竞争激烈,欧洲、美国、日本都在花费大量财力研究,并非他们不做我们才去做。量子技术还有许多应用。

量子陀螺仪。过去没有 GPS,飞机导航便凭借陀螺仪。利用量子技术发展的原子陀螺仪,测量精度可比传统的高几个数量级。

量子雷达。目前我国已研制出来,利用纠缠的办法可以达到很高的灵敏度。量子成像也在发展,理论上可突破衍射极限。

在量子计算机这个层面,随着半导体器件的尺寸接近纳米级,电子的运动不再遵守经典物理学规律,一定会出现技术革命,量子现象就可能被运用;另一方面,大型计算机出现后,能耗与散热巨大,而量子力学中存在的可逆计算可将热量下降。

量子通信产业的特点:量子通信是对目前传统通信技术的一种重要的补充,而不是全面的替代;量子产业的门槛比较高;核心技术正在突破中,学术的争论至今没有结束,产业的技术风险和市场规模尚不明确;市场上有一大片冠以“量子”的产业不乏“鱼龙混杂”成分。

“墨子号”只是开始,中国科技正从跟踪向引领跨越,中华民族将对人类科技发展作出应有的贡献。