

发射“引力探测器 B”验证广义相对论

奇 云

只有不断向既有学说发起挑战,才是不断带来革命性发现的科学探索精神。美国东部时间 2004 年 4 月 20 日 13 时,美国宇航局“引力探测器 B”卫星成功升空,它的使命就是对世界著名科学家爱因斯坦 1916 年提出的广义相对论进行进一步验证。

一个命运多舛的探测卫星

20 世纪 30 年代,英国著名剧作家肖伯纳曾说过一段名言:古希腊天文学家托勒密创立地心宇宙学说,其统治地位延续了 2000 年;英国物理学家牛顿提出万有引力学说,200 年后受到质疑;爱因斯坦发表相对论学说,究竟能维持多久则不得而知。美国东部时间 2004 年 4 月 20 日 13 时(北京时间 21 日凌晨 1 时),美国宇航局(NASA)的“引力探测器 B”(Gravity Probe B,简称 GP-B)卫星从加利福尼亚州范登堡(Vandenberg)空军基地火箭发射场成功升空(图 1),其使命就是对爱因斯坦 1916 年提出的广义相对论进行进一步验证。

引力探测器 B 原定于 2004 年 4 月 19 日由波

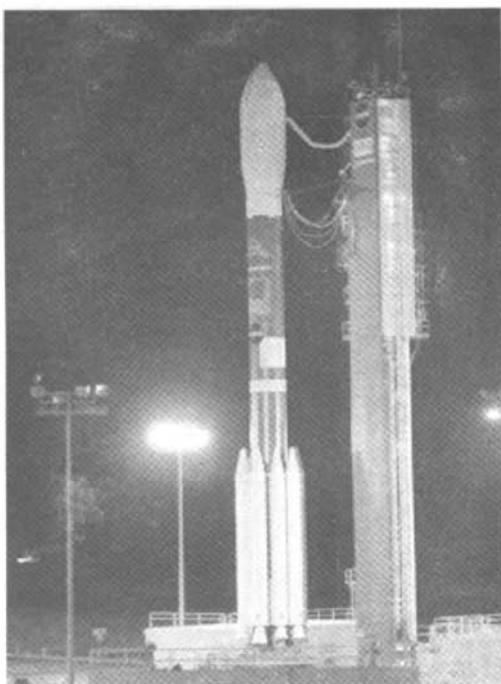


图 1 发射

音德尔塔 2 号(Delta 2)火箭发射升空。但由于地面控制人员不能证实搭载引力探测器 B 发射的火箭是否装备了所有正确的飞行软件,发射总监在最后一秒钟终止了火箭的发射。

引力探测器 B 由美国宇航局出资,斯坦福大学负责设计,洛克希德-马丁公司负责制造。

引力探测器 B 的历史可以追溯到将近半个世纪前。1959 年,斯坦福大学的物理系主任莱昂纳德·席夫(Leonard Schiff)和国防部的普(George Pugh)各自提出了用陀螺仪检验广义相对论的方案。1963 年,美国宇航局第一次为这个项目拨款。

然而,当时的条件根本不足以实施这项计划。整个六七十年代,斯坦福的研究组都在进行 GP-A 的前期研究工作。

在这期间,1976 年,美国宇航局发射了引力探测 A 卫星(GP-A)。探测器携带了一只原子钟。这个只持续了 1 小时 55 分的实验检验了广义相对论所预言的引力红移效应——引力场的强度会影响时钟

成熟;第三,要防止窃听者假扮合法通信者来非法获取通信信息,必须结合一些经典技术如保密加强纠错及认证技术等,这在一定程度上也减弱了量子密码术在技术上的优势;第四,量子密码系统即使没有窃听者窃听的情况下,由于系统自身的不稳定性也会造成一定的长期误码率,使通信的质量受到影响;最后,阻碍量子密码术走向实用很重要的非技术问题则是经济问题,因为量子通信技术必须与传统的通信技术来竞争以获得市场,而这些传统方法在长距离上以及成本费用上更低,从而使量子密码通信技术处于不利地位。但是从总的发展趋势看,经典保密通信的成本是逐年提高,而量子密码通信正随量子密码技术的发展其成本在降低。

虽然现在量子密码技术的理论和实验条件还不成熟,但从理论设想到现在已实现在常规光缆线路上传输达几十千米的量子密码通信系统只用了短短几年的时间,发展如此之迅速,这足以证明量子密码通信技术的强大生命力,它的前途是不可限量的。期望在不久的将来,随着单光子探测等技术的不断发展,量子密码通信技术在全光网络和卫星通信等领域的应用潜力会不断挖掘并成为现实。量子密码已是密码学领域的一个新的成员,可能成为光通信网络中数据保护的有力工具。而且在将来,要对付拥有量子计算能力的密码破译者,量子密码可能是唯一的选择。

(郑州信息工程大学理学院数理系 450001)

现代物理知识

的快慢。这个实验获得了成功,但是它的后继者引力探测器 B 就没有那么幸运了。GP-A 实验的第二年,美国宇航局的拨款到期了。

上世纪 80 年代初,美国宇航局在评审了引力探测器 B 的前期研究工作之后,决定继续这个项目。起初的计划是在 1989 年用航天飞机把引力探测器 B 送入太空,进行为期一周的实验。但是 1986 年挑战者号航天飞机的爆炸导致了一系列实验的推迟或取消。范登堡空军基地的发射设施被取消了。而只有在这里,航天飞机和引力探测器 B 才能一起进入极地轨道。于是,引力探测器 B 项目转向了使用德尔塔 II 型火箭作为运载工具。在接下来的岁月中,引力探测器 B 的进度比想像的更缓慢。它曾经数次面临被国会终止的危险,但是每一次,科学家都成功地说服了议员们把这个项目保留下来——那时候已经有上亿美元花在引力探测器 B 身上了。

最后一次“生死抉择”发生在 2003 年。当引力探测器 B 组装完毕,在进行热真空实验后,出现了一些故障。美国宇航局险些要终止掉这个漫长的项目,但是考虑到热真空实验出现的问题只是一些次要的技术问题,引力探测器 B 幸存了下来。但是并非每个参与引力探测器 B 的科学家都有幸看到它飞向太空。这个计划的创立者席夫于 1971 年逝世。现任首席科学家、斯坦福大学教授弗朗西斯·艾弗里特(Francis Everitt)于 1962 年加入这个计划,现在已经 69 岁了。这个耗资超过 7 亿美元的“跨世纪”计划培养了 94 名博士,15 名工程硕士,还提供了超过 300 个研究机会。所有这些努力,都是为了一个目的:检验广义相对论预言的现象。引力探测器 B 计划的科学主管布奇曼说(Sasha Buchman),实验的结果并非简单地给广义相对论打勾或者打叉,而是帮助科学家发现被爱因斯坦的理论所预言的那些更微弱的效应是否被探测到。“它会帮助我们更好地理解相对论”。

两个有待验证的科学预言

是什么让工程师和物理学家们在如此曲折的历程后依然要把这样一个试验付诸现实呢?话还要从 19 世纪说起。

生于 1838 年的奥地利著名物理学家和哲学家恩斯特·马赫(Ernst Mach)曾指出,所有的运动都是相对的。他因此推测,宇宙中任何物体的惯性,都在某种程度上受到它与宇宙中其他对象相对关系的左右。

爱因斯坦深受“马赫原理”的启发,并在此基础

上发展出了著名的广义相对论。根据广义相对论的描述,时空犹如一张大床垫,而物质和能量就像是睡在床垫上的大胖子,他们会导致床垫向下凹陷,而行星、坠落的苹果和光束都会沿着这个弯曲的路径而非直线运动。

不过,根据马赫原理,旋转的物质不仅可以让空间下陷,还会使其旋转。就好像用汤匙搅动杯子里的冰激凌,也会让杯子随之一同转动一样。根据奥地利物理学家约瑟夫·兰斯(Josef Lense)和汉斯·塞林(Thirring)1918 年的计算,大的旋转物体会缓慢地拖曳其周围的时空,这就意味着,如果你围绕地球轨道运转,你不会感觉到力的存在,但你却会发现,相对于遥远的恒星,你实际上是在缓慢的旋转。

这种现象在物理学上被称为结构拖曳(Frame Dragging)。在地球的周围,结构拖曳非常不显著,数十年来,物理学家们想尽办法都无法证实它的存在。一年中,变化可能仅有一百万分之一度,要观测到它,无异于在 1/4 英里外看到一根头发。

在 1959 年,当时在斯坦福的席夫想到,位于太空中的陀螺仪或许可以帮助物理学家观测到结构拖曳的存在。这之后不久,席夫找到了威廉·法本克和精于陀螺仪原理的航空学教授罗伯特·加农(Robert Cannon),3 个人组成了最早的研究小组。1962 年,年轻的艾维特也加入其中。

1964 年,NASA 向这个研究小组提供了第一笔经费,来把这一设想付诸实际。斯坦福的研究小组负责制造陀螺仪,洛克希德马丁公司负责制造将其携带升空的飞行器。然而,开始时的顺利却没能继续下去。1976 年,美国宇航局的重力探测 A 计划,把一个原子钟送入离地 1 万千米的太空中,证实了爱因斯坦提出的重力会使时间慢下来的推测。但最重要的、关系着爱因斯坦对宇宙膨胀和黑洞存在的预测是否正确的“引力探测器 B”,却迟迟未能现身。

美国宇航局新闻发言人称,引力探测器 B 将对爱因斯坦广义相对论的两项重要预测进行验证。具体说,就是时间和空间不仅会因地球等大质量物体的存在而弯曲,大质量物体的旋转还会拖动周围时空结构发生扭曲。这两项预测分别被称为“短程线效应”和“惯性系拖曳效应”。按照参与该项目的科学家们的通俗比喻,如果把时空结构想像为一张平坦的床单,把地球等大质量物体看成是一个保龄球,那么床单会因保龄球的放入而凹陷下去,所谓“短程线效

应”可以如此简单理解。而所谓“惯性系拖曳效应”，则有点像把一个橡皮球放入盛满糖浆的大碗，橡皮球或者说大质量物体的转动，会带动糖浆或者说时空结构跟着一起运动。引力探测 B 的工作原理并不复杂，根据牛顿力学原理，一个陀螺仪和一个参考星座方向对齐后，如果没有外力干扰，就会始终保持对齐。但是根据爱因斯坦理论，由于地球自转和重力场引起的时空扭曲会造成陀螺仪和参考星座的相对方向发生改变。理论上说，可以通过监视绕地球运行的一个陀螺仪的转轴位置来验证时空扭曲的发生。在确定了参考星座后，如果发生时空扭曲，那么陀螺仪的转轴和参考星座的方向关系就会发生改变。

四个超高精度的陀螺仪器

引力探测 B 卫星重达 3 吨，长 6.43 米，直径 2.64 米。如果拆掉太阳能电池板，它看起来颇有点像一台水泥搅拌机（图 2）。这个“搅拌机”其实是一个



图 2 引力探测器 B 在地球极地轨道展开后的形态

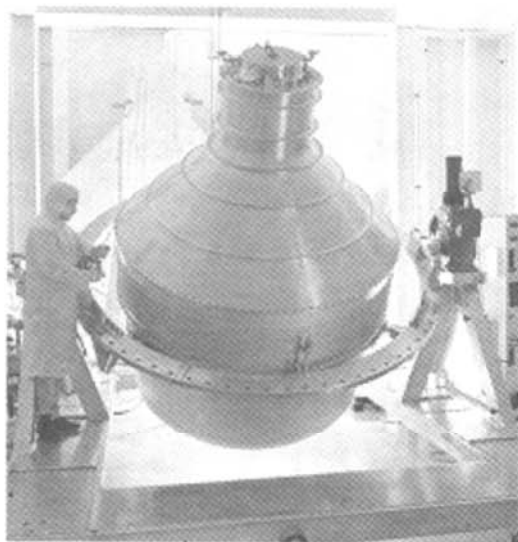


图 2 引力探测器 B 在地球极地轨道展开后的形态

巨大的隔热容器，内部装有液氦——接近绝对零度的液体。它的内部装有 4 个超高精度的小型陀螺仪又称为回转仪，通常用来给飞行器定位、使之保持稳定。陀螺仪用一个长 2.74 米、形状像香烟的结构封装。在这个结构里面，是比外层空间还要“空”10 倍、接近绝对真空的真空。再外层，是一个装有 2441 升液氦的罐子（图 3）。这些液氦的温度只比绝对零度高出 1.8 度，用于冷却陀螺仪、避免热量影响实验结果。如此的低温足以使石英球表面的金属铌进入超导状态，而石英球的自转轴方向，就由这个超导体的磁场决定。

卫星主要在距离地球约 640 千米的极地轨道上运转，其探测预计将持续一年半左右。在探测开始时，4 个陀螺仪自转轴和卫星上的一台望远镜方向同时对准一颗遥远恒星。期间，传感器会记录下有关陀螺仪轴心偏离的证据，从而对爱因斯坦的理论进行验证。

科学家们说，由“惯性系拖曳效应”导致的陀螺仪自转轴偏转，其角度之小，就好比是从 400 米远之外去看人的一根头发丝。为了测出这种微小的效应，引力探测器 B 采用了很多最尖端的技术。以陀螺仪上 4 个乒乓球大小的



图 4 陀螺仪，背景是爱因斯坦像；每个陀螺仪的转子是一个乒乓球大小的石英球，它是人类迄今制造过的最接近完美球体的物体

球体（图 4）为例，它们由石英制成，直径只有 3.8 厘米，经过了精心打造，号称目前人类制造出的最完美、最圆的球体。如果把一个石英球放大到地球那么大，那么它表面上最高山峰顶点与最深海沟底部之间的高度差还不足 5 米。石英是一种非常稳定的矿物，基本不受温度变化的影响。在石英球的表面镀了一层非常薄的金属铌。当石英球被液氦冷却的时候，它的表面就变成了超导状态。据斯坦福大学的科学家弗朗西丝·艾福利特说，每个陀螺仪的精度都是目前同类航天设备的 100 万倍以上。这些陀螺仪表面如此光滑，以致于 CD 光盘和它们相比表面粗糙得就像一张砂纸。为了提供一个近乎理想的时空参照系，这些陀螺仪以电悬浮方式保持在真空状态下旋转，每分钟转速可达 1 万次。安置陀螺仪的容器被置

自由电子激光

李文胜

激光现在已得到了极为广泛的应用。它是利用工作物质的原子、分子或离子的特定能级之间的辐射跃迁,将激励的能量转换成相干辐射的能量而形成的。因此激光的波长、功率和空间分辨本领都要受限于激光器的工作物质。不利用原子、分子或离子的能级,而又能产生大量的相干光子,是科学家们长期孜孜以求的目标。上世纪 80 年代初,马迪(John Madey)在他的博士论文中首次提出了自由电子激光的概念,并在 1976 年和他的同事们在斯坦福大学首次实现了远红外自由电子激光,观察到了 $10.6\mu\text{m}$ 波长的光放大。从那时起人们对自由电子激光的理论和实验的研究进入了一个新的阶段,并取得了丰硕的成果。

自由电子激光的物理原理是利用通过周期性摆

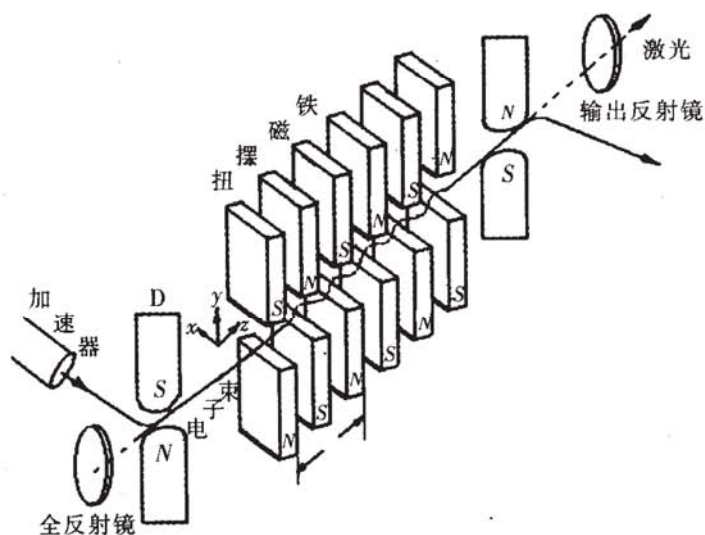


图 1 自由电子激光原理图

动磁场的高速电子束和光辐射场之间的相互作用,使电子的动能传递给光辐射而使其辐射强度增大。利用这一基本思想而设计的激光器称为自由电子激光器(简称 FEL)。如图 1 所示,一组扭摆磁铁可以沿 z 轴方向产生周期性变化的磁场,磁场的方向沿 y 轴。由加速器提供的高速电子束经偏转磁铁 D 导入摆动磁场。

由于磁场的作用,电子的轨迹将发生偏转而沿着正弦曲线运动,其运动周期与摆动磁场的相同。这些电子在 xoz 面内摇摆前进,沿 x 方向有一加速度,

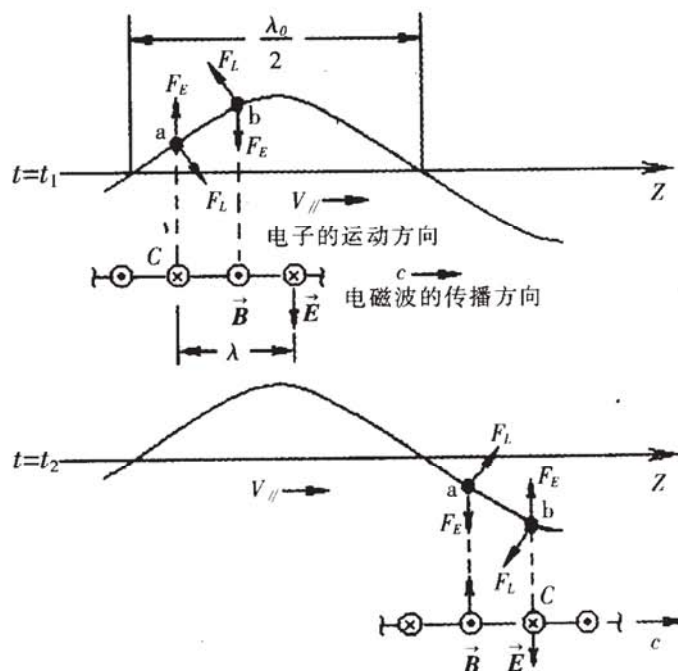


图 1 FEL 中电子束与发射的电磁波的位相关系

于接近绝对零度的环境下,外面还有 4 层铅保护层。这些陀螺仪还与任何干扰隔离,从而处在最安静的环境下。除非平衡状态被外力打破,否则陀螺仪将始终高速自旋,保持角基准方向。当地球的存在和运动引起时空扭曲时,陀螺仪的旋转轴会发生方向偏离。美国国家科学研究委员会认为,如果该实验成功,那么它将成为验证物理理论的一个经典实验。如果没有发现爱因斯坦理论的佐证,这次实验也将是革命性的,因为那意味着现代物理的基石——广义相对论将被改写。

“引力探测 B”卫星正在正常运转。太阳能电池

板在发电,所有的设备都得到电力供应。卫星与地面站和中继卫星之间的通信状况良好。如果一切顺利,它将收集到一批科学家期待了近 90 年、筹划了约半个世纪的数据,以检验广义相对论所预言的某种时空扭曲是否真的存在。这项耗资 7 亿美元的探测任务,是将以事实给爱因斯坦的理论再添一块基石,还是将动摇它、从根本上改变我们对宇宙及其演化史的认识?要回答这个问题,我们最好期待,那个异常精密的大家伙,能够按计划运行 16 个月不出半点差错。

(安徽省淮南市学院南路 248 号淮南联合大学 232001)