

聆听天籁

特鲁迪·E. 贝尔 著 孙正凡 译

一般认为，宇宙中充满了
者听到。特鲁迪·E. 贝尔
以前所未有规模探测引力波的
测器。LISA 最初是作为欧洲空
ESA)“视野 2000+”计划的一
未获批准，后来于 2004 年正式
(NASA)的合作项目，美方负
制系统及深空通讯网络，欧洲
测器将于 2018 年升空，在此之
“LISA 探路者”以验证实验技术的可靠性。

想象一下，天空中会出现一个新的星座，一个
像大熊座的勺子大小的三角形星座。但这个星座与
自然存在的那些星座有所不同，它一直在天空背景
上移动，并且在每天日落后都会出现。它慢慢旋转，
每年绕自己的中心旋转一圈。不仅如此，它自身还
会膨胀或者收缩。

实际上，我们无法用肉眼观测到这个名为 LISA
(Laser Interferometer Space Antenna, 激光干涉仪空
间天线)的人造星座——组成它的三个航天器太小，
而且发出的光线又在不可见的红外波段。尽管如此，
它却是人类最伟大的创造之一——边长达到 500 万
千米。人类对其倾注了极大热情：它有望在 2018
年前后以一种前所未有的全新方式探测到特别的宇
宙事件，如星系的形成或黑洞的死亡。

LISA 项目可能是未来几十年中我们所见证的
最具雄心的太空工程。美国国家研究委员会(National
Research Council, NRC)在对美国宇航局“超越爱
因斯坦计划”(Beyond Einstein Program)提出的天
体物理研究项目进行评估时，这项“非常具有原创
性和技术想象力”的方案名列前茅。LISA 由美国宇
航局和欧洲空间局共同开发，其目标是通过高精度
测量三个航天器之间的相对运动来探测引力波——
时空结构中的波动。尽管 NRC 进行评估时，认为
LISA 在为将来提出的标志性空间工程具有“最少的
科学风险”，但我们不能忘记，还从来没有人在如此
遥远的距离上进行过类似实验。

LISA 将探测爱因斯坦根据广义相对论所预言

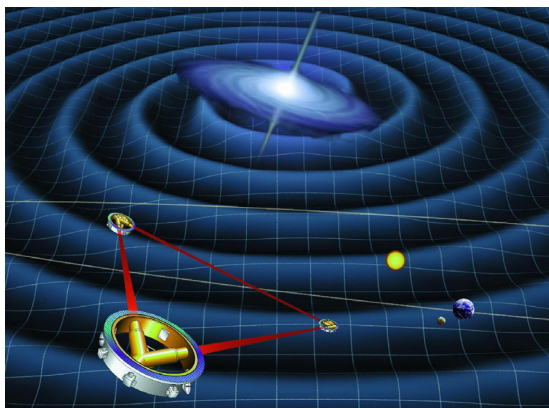


图 1 (图片来源: NASA)

引力波，但人类无法直接看到或
(Trudy E. Bell)这篇报告将介绍
实验装置——太空中的 LISA 探
间局(European Space Agency,
部分提出来的，但因其造价高昂
成为欧洲空间局和美国宇航局
责三个航天器组件、发射舱、控
提供负载和三个推进舱。LISA 探
前的 2010 年将发射前期实验装置

的引力波。广义相对论将引力视为时空几何结构，
引力波则是挤压或者拉伸这种几何结构的短暂扰
动。尽管引力波还从未被直接观测到，但间接观
测证据却已足以获得诺贝尔奖。现在普林斯顿大学
的罗素·赫尔斯(Russell Hulse)和约瑟夫·泰勒
(Joseph Taylor)在 30 多年前观测到一个由两颗中
子星构成的系统，它们每 8 小时相互绕转一周。几
年后，其绕转速度加快了——证明这个系统正在损
失能量，而能量损失的速度和广义相对论所预言的
双星系统辐射引力波的功率正好相符。

测地线和“巨人症”

即使探测大质量天体或强大加速度(比如上面
谈到的双中子星系统)所产生的引力波，也需持谨
慎态度。在相对论中，时空几何结构是由除引力之
外不受其他任何外力作用的物体做自由落体运动时
的路径决定的，这个路径称为“测地线”(geodesic)。
引力波会影响测地线，进而被探测到(但必须通过
非常谨慎的对比)。“你无法证明某个单独的粒子是
自由落体并沿测地线运动”，意大利特兰托大学物理
学教授斯泰芳诺·维塔莱(Stefano Vitale)解释说，
“你必须用两个粒子，通过不停交换光信号来比较它
们的路径形状。”引力波的微小振幅决定了以这种方
式比较测地线时，精度必须非常高，才能得到有效结
果。天体物理学家最感兴趣的是长波引力波，这意味
着必须在非常大的天文距离上比较物体的测地线。

LISA 项目要做的事情正是以这种自由落体方
式探测引力波，它分三步来进行。首先，必须保证

物体沿测地线自由下落，而不受磁力或其他任何力的干扰。然后，在传来的引力波对本地空间曲率造成干扰时，以特别高的精确度测量测地线间距离的变化。最后则是分析这些变化的性质以决定具体时空曲率扰动的形状、频率和强度，以此了解产生引力波事件的本质。

为了提供维塔莱教授谈到的联系测地线的光线，LISA 使用铷-钇铝石榴石激光器产生波长比 1 微米稍长一点的光波，波长精度非常高。它们将照亮铂金合金制成的立方体——“试验质量块”(test masses)，这三个质量块每个重 4 千克，但边长只有 4 厘米，外表镀金，打磨得如珠宝般精美，却远比珠宝昂贵。这些试验质量块只对引力响应，对电磁力等其他外力则不响应。“铂金合金的磁化率低得跟玻璃差不多。”ESA 项目科学家、来自荷兰诺得维克市 (Noordwijk) 的保罗·麦克纳马拉 (Paul McNamara) 解释说。一旦身处太空，这些试验质量块唯一的任务就是在 LISA 航天器内沿自由落体的测地线运动，同时这些航天器还将其他航天器发射来的激光信号发射回去。

LISA 整体位于地球绕日公转轨道上，比地球落后 20° (即距地球 5000 万千米)。LISA 三个航天器的距离 (即测地线间的距离) 是 500 万千米。LISA 三角形在一年之中会做“呼吸”运动 (膨胀或者收缩)，变化量约为 5 万千米。

两种声音一起听

“我们希望用引力波穿透重重迷雾，聆听到第一代星系形成时的‘声音’。”——斯科特·休斯

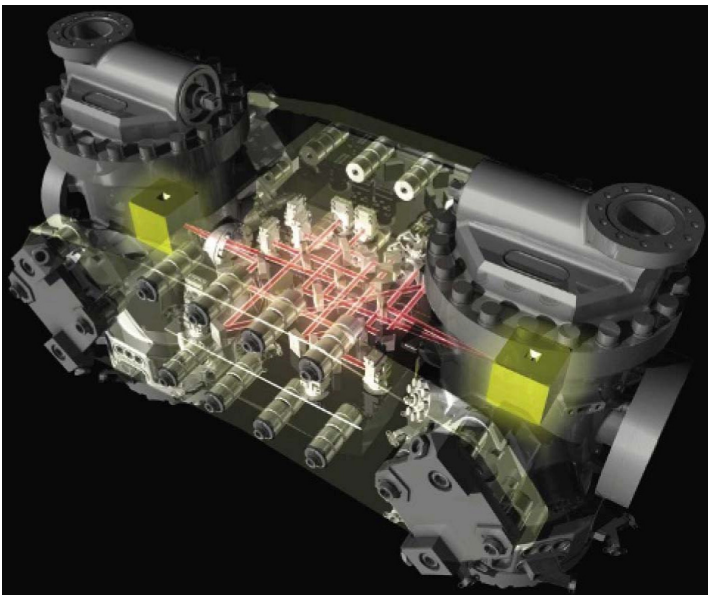


图 2 艺术家绘制的“LISA 探路者”剖面图 (图片来源 ESA)

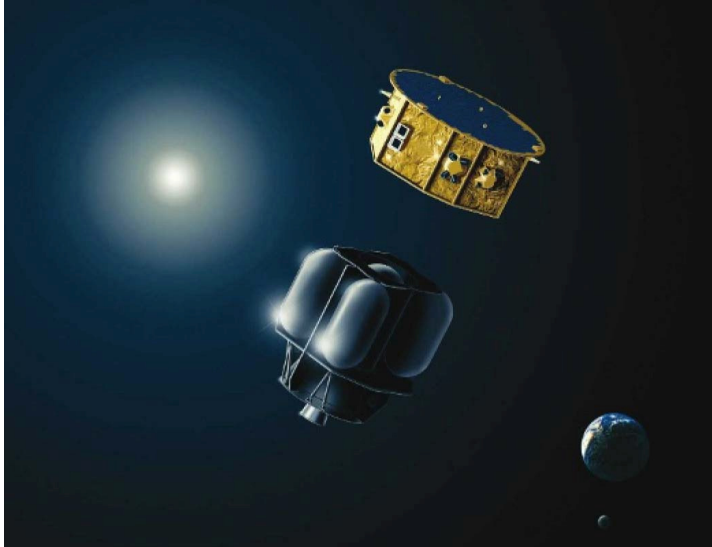


图 3 “LISA 探路者”在利萨如轨道上的工作状态 (图片来源 ESA)

LISA 并不需要测定试验质量块之间的准确距离，每个组件上都携带一个像警用测速仪一样的装置 (警察测定车辆是否超速是不需要知道具体距离的)。LISA 三角形的“呼吸”会引起可预期的多普勒移动 (跟远去的火车声音降低，或者遥远星系的光线红移的性质是一样的)：距离增长时，某个航天器中的试验质量块反射到另一台航天器中接受仪器的信号频率降低，反之收缩时频率提高。

引力波经过时会在这个可预期的多普勒信号上叠加一个变化，因为引力波将使航天器之间的空间弯曲，拉长了光信号行走的距离。与“呼吸”引起的周期为 1 年的多普勒移动相比，引力波产生的变化要快得多 (周期大约在 10 秒~3 小时之间)，LISA 前所未有的高精度测量技术将在此大显身手。LISA 探测器测量红外激光的方式同收音机接收电波信号是一样的：调频电波发射站发射的稳定高频信号 (100 兆赫左右，即每秒 10^8 周) 是经过低频音频信号 (千赫左右，或者约每秒 10^3 周) 调制的。家用或车载收音机中有一个振荡器，产生与发射站同样的高频信号，从空中接受的信号中减去这个高频信号 (这个过程称为外差法解调)，得到音频节目的低频信号，并输入收音机的扬声器。

LISA 装配的光学外差法解调器，采用频率高出百万倍的红外激光 (大约 300 太赫兹，即 3×10^{14} 赫兹)，工作原理类似，但精度却是前所未有的。进入解调器的激光束 (从远处试验质量块上反射回来的) 与向外发射的激光束的一部分 (作为参考信号) 在光电探测器上会合并对比，对比后发现 LISA 规则“呼吸”的低频 (约 1 兆赫)“嗡嗡之声”。而引力波信号又将以比这个“嗡嗡之声”的更低频 (1

毫赫兹，即每秒 0.001 周）调制的形式显示出来。通过与卫星导航接收器类似的信号处理方式，LISA 测量的低频信号可达百万分之几赫兹，相当于 10^{-12} 米的距离变化。

“探路者”即将出动

显然会有人怀疑这个像魔法一样的测量方法能否付诸实践。具体地说，就是能否完全明确并避免来自外部的干扰（比如太阳风或者阳光的光压影响），从而使 LISA 达到设计所需的灵敏度？

“的确，细节决定成败，” LISA 项目科学家、来自马里兰州格林贝特市（Greenbelt）戈达德航天中心的罗宾·斯特宾斯（Robin Stebbins）谨慎地说，“做这样高精度的测量，仪器设计者必须考虑所有可能的误差，在实验室中证明这些考虑是正确的，并不断搜寻可能被忽略的其他因素。我们已列出 50 项能够影响 LISA 试验质量块的物理因素，其中约 35 项是比较显著的。”

但是，只要未经实际验证，就不能保证技术的可行性。这就是为什么需要设计一个前期试验“LISA 探路者”（LISA Pathfinder）。“LISA 探路者”目前由承包商 EADS Astrium 公司在英国斯蒂芬内奇市（Stevenage）组装，这个航天器的目标是证明 LISA 所用技术的可行性：在自由落体测地线的质量块之间反射红外激光束，皮米级的测量学，降低对试验质量块有害的干扰。“在 2010 年升空之前，航天器组件几乎每天都要安排送来”，麦克纳马拉如是说，他是 LISA 探路者的项目科学家。

利萨如轨道

“LISA 探路者”将被发射到距地球 150 万千米、位于地球与太阳之间的“拉格朗日 1 点”，沿繁复的利萨如轨道（Lissajous，发音正好是 Lisa-ju，ju 在英文中可以看作 junior——“小”、“年少者”的缩写，即“小 LISA”）运动，太阳和地球的引力在此正好抵消。“我们希望能够脱离月亮的引力范围，也避免因为地球挡住阳光而温度下降，”麦克纳马拉解释说，“拉格朗日 1 点的阳光照射不会变化，温度也不会变，可以很方便达到上述两个目的。”

一旦航天器入轨成功，两个试验质量块将轻轻地由运送它们的定位装置中释放，这两个试验质量块和 LISA 采用的一样。释放任务可不简单：“研制能够以零速度释放试验质量块的定位器件是最具挑战性的工程问题——我们从 1994 年以来一直在解

决这个问题。”麦克纳马拉如是说。一旦试验质量块像 LISA 设计的那样成功释放，它们将沿自己的测地线做自由落体运动，只是它们的间隔只有几十厘米，而不是几百万千米。

“LISA 探路者”其余部分的作用是为试验质量块提供防护，避免它们受到除引力之外的任何作用力而干扰测量结果。这个设计就像父母在暴雨中给孩子撑伞一样，航天器不会触碰质量块本身，只是通过 10^{-6} 牛顿量级的推进器校正它们的位置，这个作用力之轻微“就像你从 200 米外呼吸喷出的气体一样”，麦克纳马拉是这样解释的。如果“LISA 探路者”可保护试验质量块做自由落体运动，那么 LISA 的三个航天器也同样能做到。

“LISA 探路者”（在距地球较近位置、寿命为 90 天的单一航天器）预算为 3 亿欧元（4.4 亿美元）。LISA 由三架航天器组成，任务寿命为 5~10 年，配有光学外差、深空通讯和其他复杂设备，共耗资 20 亿美元左右。花费高昂也是美国宇航局和欧洲空间局两家联手，并做长时间准备后再进入太空的原因之一。“在任何项目送入太空之前，专家们必须保证它的科学价值，因为太空探险是一个零和游戏（空间探测资金有限，有得就必有失——译者注），”德国汉诺威爱因斯坦学院主任、LISA 科学项目组联合主席卡斯滕·丹茨曼（Karsten Danzmann）解释说，“在 20 世纪 80 年代（当时刚提出进行 LISA 这类项目），天文学家和行星科学家已经将预算瓜分完毕。没有人愿意再和引力波探测物理学家分享蛋糕，因为那意味着他们自己得到的份额会更少。当然，那时候也没人知道如何在如此巨大的距离上测量如此微小的变化。”

LISA 项目正式浮出水面是在 1992 年，当时 ESA 正在征求中等规模的科学目标建议，丹茨曼和他的合作者（其中半数在美国）提出了一组 6 个小航天器的建议。ESA 领衔进行此项目的原因是当时 NASA 正集中精力处理“挑战者号”航天飞机失事和哈勃太空望远镜错误镜片两个重大事故。但到 1997 年，NASA 和 ESA 已建立一个联合项目，共同研究今天仍在研究中的这些概念。

“尖叫的”恒星

那么如果 LISA 在 10 年之后真如当前策划的那样探测到宇宙间的引力辐射，会揭示什么样的“新物理”？来自坎布里奇的麻省理工学院物理学家斯

科特·休斯（Scott Hughes）在给 NRC 委员会的报告中，提供了一个令人震惊的答案。在事先没有任何警告的情况下，他播放了一段老虎捕食一只猴子的录音。猴子的惨叫声在演讲厅内回荡，“室内的每个人都被吸引住了”，斯特宾斯回忆说。

休斯是想用声音而不是画面解释 LISA 的特殊数据产品，以此证明我们从中可以获取什么样的成果。他说，将 LISA 与人类听觉做类比“效果出奇地好”。两个相互绕转的恒星质量的黑洞合并到一起时辐射出的引力波频率在人类的听觉频率范围内。如果人类能听到引力波的话，黑洞最终合并时，听起来就像逐渐高昂的鸟鸣声，最终以老鼠的吱吱声结束（如果不是猴子的尖叫）。地球上的探测器正在努力聆听这最后的尖叫声。

LISA 对波长更长的引力波敏感，超大质量黑洞“吞吃”星团时发出的“怒吼声”“比所有星系中全部恒星发出的光能量总和还要大”，斯特宾斯补充道。对于 LISA 来说，判断引力波源方向就像判断捕食猴子的老虎在哪个方向一样容易。LISA 的结构好比人的耳朵，“你能够判断声音的来源，是因为声波到达两只耳朵的时间不同”，休斯这样解释，故而远距离分开的 LISA 航天器便于追踪引力波源方向，三个航天器的间距是月亮和地球距离的 13 倍，以光速走过这段距离亦需 17 秒，而引力波速和光速相同。引力波信号扫过三角形不同边的时差让 LISA 可分辨出引力波源的方向，这属于三角测量方法，其中一部分引力波源可用射电或光学望远镜跟踪观测。

宇宙的婴儿时代

引力波将会打开整个宇宙的大门，展现一幅全新且广阔的景象。——彼得·彭特

科学家期望 LISA 能够探测到宇宙在 10 亿岁之前的情况。“大爆炸之后 5 亿年是宇宙的黑暗时代，当时宇宙中充满了中性氢气体，它们阻止了光子的传播”，休斯解释说，“我们希望用引力波穿透重重迷雾，聆听到第一代星系形成的‘声音’。”（在演讲中，LISA 项目的科学家反复用声音和画面来打比方。）

而且丹茨曼介绍说，“银河系中 2000 万颗更普遍的普通白矮星双星”所产生的高频引力波会形成持续不变的“嘶嘶声和爆裂声”（背景噪声）。但仍可分辨出更加低沉的“声音”——特别是整个星系

之间的剧烈碰撞。LISA 对此类事件的灵敏度确保它可获有效结果。“在每个星系的核心中都有百万甚至千万太阳质量的超大质量黑洞。从照片中，我们可在宇宙的每个角落看到星系之间的碰撞，”麻省理工物理学荣誉退休教授瑞纳·外斯（Rainer Weiss）这样说，“所以我们知道在 LISA 探测波长范围内必定存在引力波源。”

LISA 的前景不仅限于天文学，而且对基础物理也有启发。“从哥白尼革命开始，天文学就对物理学提出了挑战。如今我们应用物理学知识来理解天体，”NASA 前副局长、现任加州圣地亚哥斯克里普斯（Scripps）海洋学院院长、NRC 报告联合主席查尔斯·克奈勒（Charles Kennel）说，“LISA 可以发现并合的黑洞，检验广义相对论的强场极限（strong field limit）。”强场极限这个词是相对论术语，它描述引力非常强大、空间结构都被剧烈弯曲的情形，这在任何实验室或近处的天体物理目标中都观察不到。

但广义相对论对此的预言却可检验，方法就是通过观测星系中心超大质量黑洞对物质和时空结构的扭曲情况。根据广义相对论预言，当较小黑洞（比如 10 个太阳质量的黑洞）落入这些巨怪之口时，时空结构也被扭曲，这种情形在其他地方是见不到的（但引力波辐射所携带的信息应该可以揭示这种极限情形）。其暴烈程度仅次于只发生在质量极端巨大情况下大爆炸本身的黑洞“自相残杀”，也就是引力波探测所希望揭示的广义相对论极限。

“人们常说，引力波将为天文学打开一个新的窗口，”来自博尔德市（Boulder）科罗拉多大学 JILA 学院的物理学家彼得·彭特（Peter Bender）说，“更准确地说，引力波将会打开整个宇宙的大门，展现一幅全新且广阔的景象。”

地球上的引力波探测器

LISA 并不是唯一的引力波探测器：地球上还有 5 个激光干涉仪，它们的研发进展和操作方式不尽相同，不过目前都还未取得任何结果，也许永远探测不到。美国的 LIGO（Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory，激光干涉引力波观测台）由华盛顿州汉德福市（Hanford）的两台探测器和路易斯安那州利文斯顿市（Livingston）的另一台探测器组成。Geo（坐落于德国汉诺威附近）这个名字只是提醒人们该探测器在地球上（geo-是“地球，

她用物理的情趣，引我们科苑揽胜； 她用知识的力量，助我们奋起攀登！

欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。其前身是创刊于 1976 年的《高能物理》杂志。该刊以生动活泼的语言介绍现代物理知识、传递科技前沿动态，以深入浅出的形式做到科学性和趣味性并重。适合广大的科学工作者、教育工作者、科学管理干部、大学生、中学生以及其他物理学爱好者阅读。

为进一步提高《现代物理知识》刊物的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者、教授以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn。稿件正文用五号宋体字、单倍行距、不分栏，文内小标题最多一级，纸张类型 A4，页边距上下 2.5cm、左右 3cm；文中公式请用公式编辑器输入；文稿务必附上英文题目；插图须在文稿中的相应位置标上编号，插图及图表中的外文务必译成中文；外国人名和地名请尽可能译成中文，有必要保留外文名称时，则在文中首次出现处，将外文用括号标注在中译名后面；请注意语言规范，例如“其它”一律改为“其他”、“公里”改为“千米”、“公斤”改为“千克”、句号用圈“。”，数字和百分

数尽量采用阿拉伯数字，书刊和一般文章的题目用书名号；投稿请将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。2008 年《现代物理知识》，每期定价 8 元，全年 6 期共 48 元，欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号：2-824。

汇款到编辑部 地址：北京 918 信箱《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要过去杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。1992 年合订本，18 元；1993 年合订本，18 元；1994 年合订本，22 元；1994 年增刊，8 元；1994 年附加增刊合订本，36 元；1995 年合订本，22 元；1996 年合订本，26 元；1996 年增刊，15 元；1997 年合订本，30 元；2000 年附加增刊合订本，38 元；2000 年增刊，10 元；2001 年合订本，48 元；2002 年合订本，48 元；2003 年合订本，48 元；2004 年合订本，48 元；2006 年仅剩 4、5、6 期，每期 7 元；2007 年每期 8 元，2007 年合订本，50 元。

以上所列，均含邮资或免邮资。

~~~~~  
土地”的词根——译者注)；Virgo（位于意大利比萨附近）这个名字不是首字母缩写，而是室女座的名字，该星座有一个活动星系组成的星系团，应该是一个主要的引力波源；Tama（多摩）因所在地日本东京西边一个郊区的名字而得名（它是东京一个高新技术区——译者注）。AIGO（Australian International Gravitational Observatory，澳大利亚国际引力观测站）位于西澳大利亚珀斯市（Perth）附近的金金（Gingin）。因为它们在地球上，探测器规模都比 LISA 小得多，探测臂长 300 米~4 千米不等，故

而只对短波（即高频）信号敏感，并且其灵敏度被地面震动噪声所削弱，而这正是 LISA 所要避免的，尽管 LISA 本身也有需要克服的噪声源。当前地基探测器的灵敏度还不足以探测引力波信号，因为发出这类高频信号的恒星质量引力波源稀少且微弱、不过，经有计划的改进之后（如特别改进后的 LIGO，将于 2013 年完工）可将探测器灵敏度提高 10 倍，预计那时可探测到一些高频信号（如果宇宙确实参与这个游戏的话）。

（北京市《中国国家天文》杂志社 100012）