

漫谈引力波探测

唐江凌 梁伟红

爱因斯坦广义相对论预言了行星进动、引力红移、光线偏折、回波延迟等物理事实,而“存在引力波”是爱因斯坦广义相对论的另一重大预言。根据广义相对论,我们从爱因斯坦广义相对论引力场方程的弱场近似可得线性近似的引力波解;引力波是横波,能以光速穿过真空。引力波非常弱:若一根长20米、直径1.6米、重500吨的圆棒,以能使自身断裂的极限速度(每秒28转)围绕自身中心点高速转动,则其发射的引力波功率也不过只有 2.2×10^{-19} 瓦,因此引力波极难探测。

一、引力波探测的意义

引力波探测除了能够验证爱因斯坦广义相对论的正确性外,还有助于证明其他各种引力理论的正确与否。基于引力波探测的引力波天文学将是继传统电磁波天文学、宇宙线天文学和中微子天文学之后,人类认识宇宙的一个新窗口。引力波探测还将推动引力场量子化的理论研究,从而为完善物理学“大统一”理论做出贡献。同时,由于引力波探测需要精确度极高的观测仪器和设备,因此它必将促进激光和晶体技术、精密机械制造技术、精密测量技术、自动控制技术等相关高新技术的发展,并在此基础上产生难以估量的巨大经济价值、社会效益。

二、引力波探测的历史、现状和发展

探测引力波的尝试最早可追溯到20世纪60年代。根据广义相对论相关原理,正如电磁波引起接收天线振荡一样,引力波也使与其相遇的物体以一定方式发生振荡。例如,当足够强的引力波作用在一个物体的圆形截面上,我们将看到圆截面的上下左右不断拉长或压缩,从而使物体截面的形状在圆形和椭圆形之间来回变化。美国马里兰大学的物理学家约瑟夫·韦伯根据以上原理于60年代末建造了世界上第一个引力波探测器。探测器包括一个长2米、直径1.5米的铝棒天线。韦伯预计,如果一个引力波经过,探测仪的长度将会瞬间伸缩。1969年韦伯宣称,他探测到引力波几乎同时穿过了马里兰州和芝加哥的探测器,这一结果震惊了物理学界。但是韦伯的实验结果却存在极大缺陷:首先,没有其他任何一个实验小组能复现韦伯的实验结果;其次,韦

伯宣称接收到的引力波来自银河系中心,因此银河系中心必定发生了十分激烈的天文事件,然而当时的天文观测资料却未见任何异常;另外,韦伯所接收到的“引力波”能量太大,令人难以置信。因此,韦伯的实验结果未被科学界承认。

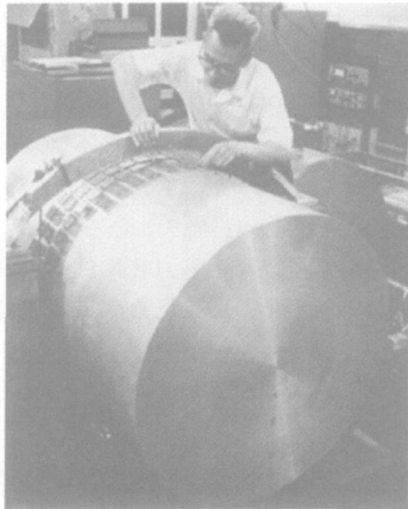


图1 韦伯和他的共振质量探测器

韦伯探测引力波的方法称为共振质量探测法。大多数改进后的共振质量探测设备——共振质量探测器,都有巨大的共振四极天线(相当于韦伯探测器中的铝棒天线)。共振质量探测器能够在引力波经过共振四极天线时,从中吸收能量并产生振动。探测器周围的感应器将检测到这些振动,并将其转化为可供分析的电信号。新一代的共振四极天线一般置于真空中并保持极低温度,以抑制噪音。因为共振质量探测器只对特定的、有大量背景噪音的引力波源敏感,其测量频带太窄。目前在用的已经不多,其中包括瑞士的探索者(Explorer)、意大利的鸚鵡螺(Nautilus)、荷兰的小圣杯(MiniGRAIL)等。

1974年,美国天文学家赫尔斯和泰勒发现了脉冲双中子星PSR1913+16。这一脉冲双星系统的轨道周期很短,为7.75小时,轨道呈椭圆形,偏心率很大,达0.617。赫尔斯和泰勒对脉冲双星系统的轨道运动周期进行了长期观测。他们发现,或是双星相互旋转一周所花的时间每10年就要减少4秒,或是双星每年相互靠近大约1厘米。根据广义相对论,双星系统在作轨道运动时,会因为辐射出引力波

而使周期变短,轨道变小。赫尔斯和泰勒的观测结果与广义相对论符合得极好,误差不超过 0.5%,他们的观测结果成为引力波存在的间接证据。

利用上述原理探测引力波的方法称为脉冲双星探测法。2004 年又发现由一对高速旋转脉冲星组成的双星系统,天文学家将其命名为 PSRJ0737-3039A/B。这对双星的轨道周期仅为 2.4 小时,轨道较圆,椭率为 0.088,与赫尔斯和泰勒发现的 PSR1913+16 脉冲双星相比,这一双脉冲星系统的轨道周期更短、引力辐射更强,是一个更理想的引力波探测对象。

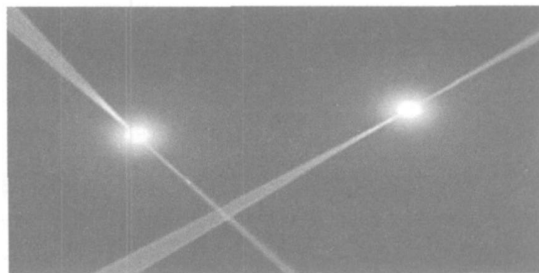


图 2 脉冲双星模拟图

目前引力波探测中用得最多的是激光干涉探测法,该方法采用一部巨大的激光迈克尔逊干涉仪,没有引力波时调整干涉仪臂长,使从互相垂直的两臂返回的两束相干光在分光镜处相干减弱,这时输出端的光电二极管接收的是暗纹,无输出电信号。引力波到来时,干涉仪两个臂的长度将发生变化。这样一来,两束相干光有了光程差,破坏了相干减弱的初始条件,这时光电二极管输出电信号,物理学家可据此判定存在引力波。

利用激光干涉探测法进行引力波探测的设备称为激光干涉引力波探测器。20 世纪 70 年代以来,世界上有好几个实验室研制出这类装置。其中较著名的有 LIGO(美国)、GEO 600(德国)、TAMA(日本)和 VIRGO(意大利、法国)。

美国的 LIGO 项目于 1991 年秋开始启动。LIGO 观测所拥有两套干涉仪,一套在路易斯安纳州的利文斯顿,另一套在华盛顿州的汉弗。利文斯顿的干涉仪有一对封闭在直径 1.2 米真空管中的长 4 千米的臂,而汉弗的干涉仪则稍小,只有一对 2 千米长的臂。两套干涉仪一起工作时,就构成了一个观测所。因为激光强度的微小变化、微弱的地面颤动,甚至研究人员在实验室附近活动引起的震动等种种干扰,看起来都可能像引力波信号;然而如果是

干扰信号,其记录将只会出现在一台干涉仪中,真正的引力波信号则会被分处两地的两台干涉仪同时记录。所以科学家可对两地的数据记录进行比较而得知哪些信号是噪声、哪些信号是引力波信号。遗憾的是,LIGO 从 2003 年开始收集数据以来,迄今为止还没有任何发现。



图 3 美国华盛顿州汉弗的 LIGO

GEO 600 是德国汉诺威的一个引力波观测站,其干涉仪有一对封闭在直径 60 厘米真空管中的 600 米长的臂,是 2002 年开始运作的一个英德合作项目。TAMA 建在日本东京附近,臂长 300 米。

VIRGO ——“室女座”激光引力波干涉探测站,从 1993 年开始建造,2003 年 7 月投入使用,位于意大利比萨附近的卡希纳,是由意大利国家核物理研究所和法国国家科研中心联合研制的。“室女座”有两条分别长 3 千米的巨大椭圆形管道臂,两条管道臂互相垂直,呈“L”形,它们以中心建筑大楼为起点,外部由 1 米多厚的钢管覆盖,内部为高真空状态,并接近绝对零度。中心建筑大楼内竖立着一座高 10 米的金属塔,金属塔的钢壳里隐藏着由 5 个摆组成的复摆结构装置,下面悬挂着各种光学元件。这个装置的作用是将外界的各种干扰分离出来。“室女座”可以感知的两点间距变化相当于质子直径的 1%,也就是 $1/10^{18}$ 米。

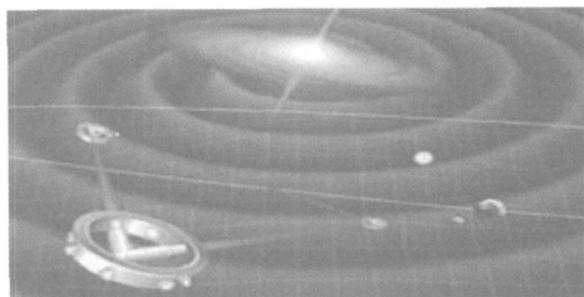


图 4 LISA 模拟图

目前最宏伟的引力波探测计划——LISA(Laser Interferometer Space Antenna)——空间天线式激光干涉器计划,是欧洲航天局(ESA)和美国国家航空

航天局(NASA)的一个空间合作项目,倍受物理学界关注。该计划将于2015年前后向太空发射3个探测器,使其组成等边三角形,相邻两个探测器之间的距离为500万千米,它们将在地球后面以 60° 夹角一起绕太阳运行。3个探测器之间相互进行激光干涉测距,以探测引力波。由于LISA所占的地域比地球上的探测器大得多,所以所受外界干扰较少、灵敏度也更高,因而更易于捕捉低频引力波信号、探测到更多的引力波源,甚至还可能探测到宇宙大爆炸时产生的“原始引力波”。物理学家对此寄予厚望。

三、我国引力波探测近况

中国天文物理学界和理论物理学界也一直紧跟国际引力波探测的发展潮流,进入新世纪以来,国际引力波研究和探测领域的进展也受到中国科学家和国家科学技术部门领导的密切关注。上世纪七八十年代,中国科学院高能物理研究所和中山大学就曾开展共振质量探测器的研制。

2004年4月,中国科学院艾国祥院士和美国国际引力波探测委员会首届主席、LIGO实验室主任巴瑞什教授分别代表中国科学院国家天文台和美国引力波探测实验室签署合作开展引力波探测的理解备忘录。美国《科学》杂志还专门报道了中国爱因斯坦引力波探测站(China Einstein Gravitational Wave Observatory, CEGO)提案。

2005年1月,国家天文台汤克云研究员应邀访问LIGO实验室。实验室主任巴瑞什教授等与汤克云研究员讨论了中美合作开展引力波探测的具体步骤:第一步,培养相关领域的科技人才;第二步,建造一个40~100米的激光干涉引力波探测器;第三步,建立一个千米量级的引力波探测激光干涉站。

2005年3月,爱因斯坦引力波探测研讨会在中国高等技术中心召开,吸引了天体物理、理论物理、高能物理、地球和空间物理、激光和晶体技术、精密机械、材料科学、测量技术、自动控制等领域的20多个研究所和大学的近百名科学家赴会。

2005年9月,在北京香山饭店召开的主题为《相对论物理学100年的发展及展望》的香山科学会议第263次学术讨论会也研讨了引力波探测问题。会议期间,北京大学乔国俊教授介绍了脉冲双中子星PSR1913+16的相关知识,及未来的空间激光干

涉仪可能探测到双中子星系统合并所产生的引力波。重庆大学李芳昱教授提出高频引力波的电磁探测方案。上海光机所王育竹院士提出了场移式原子钟的工作机制,可用以获取高精度超窄原子跃迁谱线来测量引力波。

2006年3月,我国紫金山天文台太阳系天体研究组与德国马普引力物理研究所开始就LISA引力波探测计划航天器轨道设计展开合作。合作研究工作在太阳历表应用、轨道优化算法、积分器改进等方面取得了进展。双方将就轨道摄动分析、数值模拟、优化处理等课题继续深入合作。

2006年6月,由中国科学院紫金山天文台和中国空间技术研究院研究发展中心主办的第三届单航天器激光天文动力学研讨会在紫金山天文台召开。单航天器激光天文动力学空间计划(ASTROD I)是激光天文动力学空间计划(Astrodynamic Space Test of Relativity using Optical Devices, ASTROD)的第一步:用太阳轨道上的一个无拖曳航天器与地面站以双向激光干涉跟踪和脉冲计时测距的方法精确探讨天文动力学,检测相对论与时空基本定律,改进引力波探测的灵敏度及更准确地测定太阳、行星和小行星的参数。ASTROD I航天器对引力波的探测灵敏度较射电波追踪航天器的探测方法进一步提高。根据中国科学院紫金山天文台倪维斗教授的介绍,ASTROD I的航天器可由长征四号乙运载火箭发射,最后阶段直接由绕行地球的低轨道进入绕行太阳的轨道,然后两次接近金星以获得引力助推,将于发射后约370天抵达太阳对面,开始各项空间实验。该计划可行性极强。2006年7月,在北京召开的第三届国际激光天文动力学研讨会上,来自中、德、英、法等国的科学家进一步研讨了ASTROD I空间计划,多国合作探测引力波的工作将适时展开。

改革开放以来,我国已培养出一大批堪当重任的科学技术人才,积淀了较丰富的理论成果,测量技术和制造技术的水平也大大提升,我国应当不失时机地抓紧研究引力波探测,力求做出具有国际水平的原创性成果。

(桂林市广西师范大学物理与电子工程学院 541004)