

引力波: 探索宇宙奥秘的新窗口

符长波

上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240

E-mail: cbfu@sjtu.edu.cn

2017年10月3日, 瑞典皇家科学院宣布授予Rainer Weiss, Barry C. Barish和Kip S. Thorne 2017年度诺贝尔物理学奖, 以表彰他们在“LIGO探测器和引力波观测中的决定性贡献”。Rainer Weiss出生在德国, 现为美国麻省理工学院(MIT)物理学教授。Barry C. Barish和Kip S. Thorne现为美国加州理工学院物理学教授。

1 时空自身的“地震”

100多年前, 爱因斯坦创立的狭义和广义相对论, 彻底地改变了人类对时空的认识: 时间和空间不再是过去认为的那样是分离的两个对象, 也不再静止不变, 而是其自身也可以运动起来, 表现出时空弯曲和引力波等种种现象。

描述运动, 需要时空这个框架, 即时空是物质运动的舞台。而引力波可以说是时空舞台本身的运动。日常大家可能看到过这样的场面, 两个花样滑冰运动员在冰面上绕彼此旋转, 随着彼此靠的越来越近, 由于体系角动量守恒的缘故, 他们的旋转速度会越来越大。假若他们不是站在结实的冰面上, 而是在橡皮膜上做上述动作, 情况会怎么样呢? 橡皮膜会由于二者的体重而塌陷, 改变其形状。二人绕彼此旋转时, 也会同时带动橡皮膜本身震动, 而这种震动会以波的形式传播到远方, 被远方橡皮膜上的比如一只小蚂蚁感受到。在现实的宇宙中, 如果大块头的运动员, 比如中子星或黑洞, 在运动时, 时空这个舞台不再是那么刚性, 而是如橡皮膜一样被扭曲, 引起时空的“地震”。如果“地震”足够大, 且离地球足够的近, 我们人类小蚂蚁就有望感知到这种震动。

但是, 通常情况下, 一方面发生这种大的“地震”的概率很小; 另一方面, 震源离地球非常远, 使得这种“地震”的幅度异乎寻常的小, 使得地球上探测引力波非常困难。假若两个约30倍太阳质量的黑洞互相旋绕, 彼此距离350 km。开始时二者以每秒转75圈, 随后二者会螺旋式地越转越近, 而且越近转得越快, 并最终合并为一体^[1]。这个质量庞大, 速度是与光速比拟的巨无霸, 对时空舞台的扰动, 在事发地看来, 无疑是非常巨大的。但如果传到10亿光年外的地球, 它的影响就微乎其微了, 它所引起的太阳到地球之间距离的变化, 仅仅有约一个原子直径大小。



符长波 博士 上海交通大学特别研究员, 上海“东方学者”特聘教授。从事实验核物理与粒子物理研究, 研究方向包括: 实验室核天体物理, 暗物质直接探测等。在利用强激光模拟天体等离子体环境研究天体相关核反应、探测暗物质候选粒子“弱相互作用重粒子”和“轴子”等方面, 取得了世界领先的成绩。迄今在国内外知名刊物上发表论文90余篇。

2 理论到实验发现的百年历程

不知对人类来说是幸运还是不幸, 这种“时空地震”引力波是如此的微弱和稀有, 以至于人类花了半个多世纪才得以目睹引力波真容。

探测引力波的尝试, 始于20世纪60年代。美国物理学家约瑟夫·韦伯(Joseph Weber)利用类似音叉的原理, 来测量金属铝圆柱体和引力波特定频率的共振。他声称观测到了引力波。可是由于他的实验没能被其他物理学家重复, 且数据分析存在缺陷, 因此其结果不为大多数科学家认可。1962年, 苏联的科学家Gertsenshtein和Pustovoi^[2]提出, 利用激光干涉仪探测引力波。随后几十年里, 这个实验方案一直沿用和发展。1967年, MIT的物理学家Rainer Weiss, 造出了第一个1 m长的引力波激光干涉仪原型(https://www.ligo.caltech.edu/system/media_files/binaries/313/original/LIGOHistory.pdf), 并在其后的工作中, 确立了各种降低实验噪声的技术路线, 包括地震、热噪声、引力梯度、真空热梯度、地磁等。Weiss的开创性工作, 为他赢得了2017年诺贝尔物理学奖。此外, 这一时期加州理工学院(Caltech)的Kip Thorne也开始对引力波进行了深入的理论探索, 包括预言各种引力波源的信号以及如何分析其实验信号。这些研究表明引力波的探测是可行的, 给后续引力波实验增加了信心, Kip Thorne也因此被授予2017年的诺贝尔物理学奖。

进入20世纪80年代, MIT研究组在美国自然科学基金

会(NSF)的资助下,开始研究千米级长度的引力波干涉仪的可能性.研究蓝皮书(https://dcc.ligo.org/public/0028/T830001/000/NSF_bluebook_1983.pdf)表明千米级探测器实践上是可行的,能达到所需精度,同时也建议建造相距几千米的两个5 km长的干涉仪.加州理工学院随后也建立了40 m长的原型机.1984年,LIGO(laser interferometer gravitational wave observatory)项目筹建工作正式开始.经过多年反复的申请、被拒、再申请、再被拒的过程,终于在1991年得到了NSF的资助,正式开始了LIGO建设.LIGO一共有两个探测器,相距3002 km,分别位于美国路易斯安那州和华盛顿州.1994年,Barry C. Barish出任主任,其出色的领导工作为他赢得了2017年的诺贝尔物理学奖.然而第一代的LIGO建成后并未探测到引力波信号,因此于2008年又开始了升级计划,即Advanced LIGO,并于2015年完成了升级改造,探测灵敏度提高了10倍.与LIGO同时期建造的引力波探测器还有VIRGO,它位于意大利比萨市,1996年开始建造,并于2003年完成并运行,2016年完成升级到第二代(Adv-VIRGO),使得灵敏度提高了约一个量级.

在LIGO升级后的第一次科学运行时,也就是2015年9月,幸运之神就降落了,它发现了人类历史上第一例被直接探测到的引力波事件^[2].紧接着在2015年12月又探测到了第二例信号^[3].又过了约一年,2017年1月4日,测到了第三例信号,并且这次是LIGO的两个探测器同时探测到了信号.2017年8月4日,引力波再次光临地球,这次不但被两台LIGO记录到,也同时被位于意大利的VIRGO探测器记录,这是人类记录到的第4次引力波事件.LIGO和VIRGO探测器的配合,实现了引力波探测器观测的网络化——尽管是小规模的网络化,对引力波的来源方位定位也更加精准.

2017年8月17日,LIGO-VIRGO组合又观测到了中子星合并的引力波事件^[4].在LIGO-VIRGO给出引力波“警报”后,全球数十台天文望远镜,包括中国的“慧眼”X射线卫星,也开始在不同波段寻找并记录对应的电磁信号.这是人类观测到的第5次引力波信号,第一次中子星合并引力波信号,第一次实现引力波和电磁波信号的同时观测.

也许对于第一、二次引力波信号,一些科学家对其真实性仍心存疑虑,毕竟引力波信号实在太小了,但第三、四、五次信号,彻底证明:引力波,经过百年的期盼,长达半个世纪的努力,确确实实地被捕捉到了!从1916年爱因斯坦正式发表广义相对论到2015年观测到引力波,这个历时百年的探索成功来之不易,包含着无数人的辛勤汗水.仅就LIGO项目来说,就有来自20多个国家的千余一流流科学家.从第一个探测原型样机到现在已经超过50年了.

3 引力波探测的关键性技术

引力波探测仪是放大版的迈克尔逊干涉仪,主要由

两个互相垂直的长达数千米的臂、穿梭于两臂的激光和反光镜构成.引力波到来时,会引起两臂长度细微变化.但由于变化实在是太小了,如何提高灵敏度,排除各种噪声信号是关键.

其中外部噪声包括如微地震、周围汽车乃至人走路引起的振动等.对于外部噪声采用多级减震的方式.首先是进行主动减震:实验仪器平台并不直接放在地面,而是放在一个可移动的平台.当检测到实验室地面移动时,实验平台会被驱动向相反的方向移动,从而补偿了来自地面的移动.除此之外,还要采取悬挂式被动减震.被动减震类似于:手中拿一根线,下端悬挂一重物,当手移动缓慢时,重物会跟着手移动;但如果手来回晃动频率较高时,重物的移动幅度会大大小于手移动的幅度,从而实现被动减震的目的.干涉仪的镜子用0.4 mm的石英玻璃线,一级级地悬挂在前一级的架子上.这样的悬挂一共有4级,通过多级隔离达到减震目的.

实验仪器内部也有很多地方带来噪声,比如:空气对激光的散射、激光光压等.因此,激光的路径上必须抽成超高真空,以减少空气散射带来的噪声.当激光打到反射镜面上时,会对镜面产生压力(即光压),光压会引起镜面的微小震动,这也是重要的噪声来源.对于这个噪声来源,也采取了主动消除的办法.其原理就是常见的阻尼震荡.给镜子施加一个阻尼力,即与其速度成正比、方向相反的力.当调整至临界阻尼时,镜子的震动会很好地消除,保持平衡状态.镜子的震动如果用热学温度概念描述的话,仅有等效于 $1.4 \mu\text{K}$ ^[5].

除此之外,还有很多其他技术,用于提高探测灵敏度、降低噪声.如光复用技术,即让光在悬臂之间来回运动多次,这样增加了等效运动距离,减少了驱动激光的总功率.用纯度非常高的石英玻璃做光学器件,以保障高的透光率;器件加工精度非常高,误差都控制在几个原子厚度.尽管LIGO等可以探测到小到不可思议的距离变化.但细究其中的技术细节,却可以甚至用老技术来形容.但是,就是因为把为数众多的老技术都做到了极致,从而实现了对不可思议的微小位移的探测.

4 人类认识宇宙的新机遇

引力波观测的实现,无疑是人类认识自然的里程碑事件.人类从史前开始,就对浩瀚的宇宙有与生俱来的好奇与敬畏.但人类至今还迈不出太阳系,只能靠光子、宇宙射线粒子等信使来认识宇宙.长久以来,可见光范围的光子是宇宙传递到地球的唯一信使,直到近代才扩展到X光、伽马光的范围.另外宇宙射线粒子,包括电子、质子和其对应反物质,乃至中微子都在近代得到了发展.而引力波,为人类打开一个全新的认识宇宙之窗.也正是因为如此,引力波探测很快地被授予诺贝尔物理学奖.正如诺

贝尔奖委员会在其物理学奖颁奖新闻中所说:“各种电磁辐射、宇宙射线和中微子等,已经被用于宇宙探测。但是,引力波是对时空扭曲扰动的直接证明。它是一个全新的、完全不同的东西,为我们打开了未知的世界。如果谁能在后续捕获并解释引力波,那么等待他的将是大量的全新发现”。

事实上,国际上除了在运行的LIGO和VIRGO引力波探测器外,还有大量其他在建或计划中的引力波探测项目,包括:日本的KAGRA^[6],美国和印度的LIGO-印度^[7],欧洲的爱因斯坦望远镜^[8],激光干涉太空天线(LISA)^[9],以及中国的天琴计划、太极计划和阿里计划等。这些新的引力波探测项目,必将为人类展示更为清晰的宇宙画卷!

参考文献

- 1 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 061102
- 2 Gertsenshtein M E, Pustovoit V I. On the detection of low frequency gravitational waves. *Sov Phys JETP*, 1962, 43: 605–607
- 3 Abbott B P, Adams T, Bonnard R, et al. GW151226: Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 241103
- 4 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 161101
- 5 Abbott B, Abbott R, Adhikari R, et al. Observation of a kilogram-scale oscillator near its quantum ground state. *New J Phys*, 2009, 11: 073032
- 6 KAGRA collaboration. Detector configuration of KAGRA. *Class Quant Grav*, 2011, 29: 124007
- 7 Unnikrishnan C S. IndIGO and LIGO-India: Scope and plans for gravitational wave research and precision metrology in India. *Int J Mod Phys D*, 2013, 22: 1341010
- 8 Sathyaprakash B, Abernathy M, Acernese F, et al. Scientific potential of Einstein telescope. 2011, arXiv: 1108.1423
- 9 Danzmann K, Rüdiger A. LISA technology—Concepts, status, prospects. *Class Quant Grav*, 2003, 20: S1–S9