

赛先生 专栏

找到引力波既是幸运,也是意料之中

13亿年前的地球充其量还只有低等生命的存在,然而那时候遥远太空里一颗质量为29倍太阳质量的黑洞与另外一颗36倍太阳质量的黑洞缓慢地靠近了,它们相互绕转,最后碰撞并合在一起,拨动了宇宙的琴弦——发出引力波。引力波以光速传播,在走了漫长的13亿年后,如今正强烈地拨动着2016年地球人的心弦。

一百年前,爱因斯坦提出广义相对论的完整理论,把一维时间与三维空间看成是一个整体,成为一个四维的几何体。这一几何体被称为四维时空或四维流形。然而,如果把这个四维时空做一个依赖于观察者的3+1分解,就可以得到空间与时间。

爱因斯坦发现,三维空间本身是有弹性的,它会随着一维时间振动。这一振动将在整个空间激发出一种波动,类似于水面上的涟漪,爱因斯坦称这种空间的涟漪为引力波。

1919年,爱丁顿等人在日全食期间用光线弯曲的实验论证了爱因斯坦广义相对论是一个满足天文观测的引力理论,这一实验验证为爱因斯坦的广义相对论提供了实验依据,也成为科学史上的大事件。此后,陆续有验证爱因斯坦广义相对论的实验推出,但这些实验都没有超出太阳系的尺度,因此局限在宇宙的一隅,犹如坐井观天。而且,所有以前的实验,只观察到一个固定的弯曲空间,没有一个实验能看到弯曲空间的波动。

终于,97年后的今天,一个更震撼人心的实验结果出现。美国当地时间2月11日上午10点30分(北京时间2月11日23点30分),美国国家自然科学基金会携加州理工、麻省理工和LIGO(激光干涉引力波观测站)科学合作组织(LSC)的专家向全世界宣布,美国的LIGO首次直接探测到了引力波,其波源来自13亿光年之外的遥远宇宙空间,由两个黑洞碰撞并合所引发,这显然是在宇宙尺度上对爱因斯坦广义相对论进行检测与判断的一个重要实验。

此前,人类从未直接探测到引力波,科学家仅通过对一个双星系统的观测——两颗双中子星相互围绕着对方公转——得到了引力波存在的间接证据,为此美国新泽西州普林斯顿大学的拉塞尔·赫尔斯和约瑟夫·泰勒获得了1993年诺贝尔物理学奖。此后,人们一直孜孜以求,科学界也有多种探测引力波的方法和设备,但一直无所斩获,直到去年LIGO升级(LIGO于2001年正式投入观测,2010年关闭,开始进行升级改造,升级后的LIGO于2015年9月18日重新开机运行,预计2019—2020年完成全部升级改造)后,事情开始有了眉目。

一场有准备之战

北京师范大学天文系主任朱宗宏教授是研究引力波的专家,曾在日本国立天文台的引力波探测项目TAMA300(激光干涉仪臂长300 m)工作多年,目前参加日本后续项目KAGRA(大型低温激光干涉仪,位于神冈,臂长3200 m,项目负责人是

2015年诺贝尔物理学奖得主梶田隆章)。

2015年初,朱宗宏访问加州理工学院陈雁北教授(参与LIGO项目的资深专家)时,曾与他共同商讨在北京举办大型国际引力波活动The Next Detectors for Gravitational Wave Astronomy(参见2015年12月出版的《中国科学》英文版),当时就发现加州理工学院的专家们已经开始专门开会商量LIGO发现引力波后的应对策略了。

朱宗宏说,在LIGO还没有升级改造的时候,LIGO高层主管在数据分析科学家不知情的情况下,输入了一个约6000万光年之外的两颗中子星碰撞并合的模拟信号,数据分析科学家们从引力波信号波形的分析中找到了这个事件——这说明在LIGO升级之前,引力波信号波形的分析技术已经成熟——此路可以

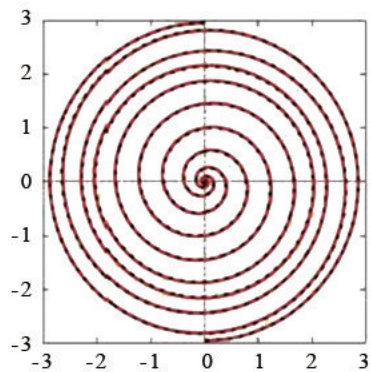


图1 通过数值求解爱因斯坦方程得到的双黑洞轨道演化
注:图中显示的是两个黑洞不同时刻的(x,y)坐标,它们的初始位置分别在(0,3)和(0,-3)。

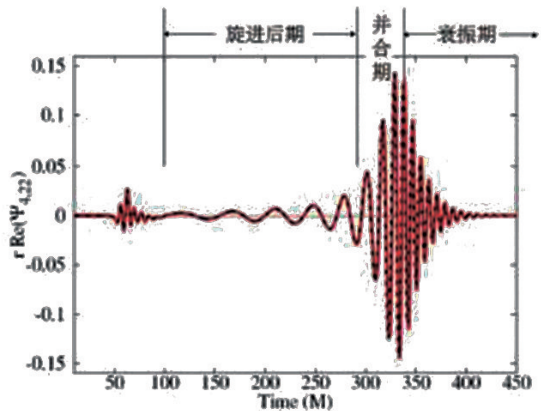


图2 数值计算所得到的引力波波形

走通,这无疑是一个巨大的鼓舞。

但这远远不够。朱宗宏介绍说:“初期LIGO的精度是 10^{-22} ,对于4000 m的干涉臂来说,相当于可以检测出千分之一质子大小(质子直径是 10^{-16} m)的距离变化,这个精度是相当高的。”2015年9月,升级后的LIGO精度进一步提高到了 10^{-23} ,相当于可以检测出万分之一质子大小的距离变化。

除了精度问题,朱宗宏还透露,根据科学家们的估计,在LIGO升级改造之前,它一年能够测到0.0002~0.2次双中子星并合信号,或者0.0002~0.5次双黑洞并合信号;而在LIGO升级改造之后,它一年就能测到0.4~400次双中子星并合信号,或者0.4~1000次双黑洞并合信号了。所以就双黑洞并合信号而言,保守估计是两年半看到一次,乐观估计则是一天就能看到3次。所以说,正在升级中的advanced LIGO初试锋芒就探测到信号,可说是非常幸运,也可以说是非常正常。

朱宗宏表示,美国在LIGO实验上的项目经验值得借鉴:LIGO的激光干涉仪为什么有两台,每台臂长为什么要4000 m,这两台之间的距离多少为最优,如何制作减震系统,如何加大激光器的功率等等这些问题都经过了前期精心测算。因为“在大科学实验中,不能打无准备的仗”。

LIGO何以探测到引力波

根据现在已有的消息,造成此次探测到的引力波是两个分别为29倍太阳质量与36倍太阳质量的黑洞并和形成一个62倍太阳质量的黑洞所形成的。也许你会问,合并后的黑洞为什么损失了3个太阳质量?

原来,在两个黑洞相互接近绕转的过程中,根据广义相对论的数学物理推导,这是一个随时间变化的四极矩,因此会不断向外辐射引力波,而引力波的辐射会把两个黑洞之间的引力势能降低,所以两个黑洞的距离会变小。这是一个典型的正反馈过程,随着两个黑洞的距离变小,它们之间相互绕转的频率会更快,最后两个黑洞碰撞并合在一起,这一过程会放出大量的引力波能量,损失的那3个太阳质量就是变成引力波辐射出去的。

这一辐射的能量有多大,通过爱因斯坦的著名质能方程 $E=mc^2$ 计算可知,这相当于数以亿亿亿计的原子弹同时爆炸,其威力相当惊人,整个空间都在颤动。这一颤动也在13亿年后传到了地球——这就是目前LIGO探测到的引力波。

引力波信号传递到地球以后,其在激光干涉仪的接受器上会形成一个电子信号,这个电子信号在模数转换后在终端电脑上表现为一个“引力波信号波形”。对这一波形的处理堪称技术性难题,而科学家需要从波形里读出很多信息:黑洞并合所花费的时间、并合后黑洞的质量、并合后黑洞的自转角动量、黑洞并合事发现场距离地球的距离。(详细信息可见加州理工学院的引力波专家基普·索恩所著的《星际穿越中的物理学》英文版的16章,本书也有中文版。)

LIGO对引力波信号波形的分析足足花了几个月的时间。

并合后的黑洞角动量有多大

对上述技术性难题中的黑洞角动量问题,国家天文台研究员苟利军说:“一般黑洞是旋转的,我们称之为克尔黑洞。克尔黑洞的角动量可以通过围绕其公转的粒子的最内稳定轨道来推定,最内稳定轨道的半径与克尔黑洞的角动量之间存在一条巴丁对应曲线。由这一对应曲线,我们可以知道克尔黑洞的角动量,这是对传统黑洞的角动量的经典研究方法,对于目前LIGO探测到的合并后的黑洞的角动量,则需要从引力波信号波形中进行提取。”

目前,多方信息透露出LIGO目前探测到的引力波揭示出合并后的62个太阳质量的黑洞具有中等数值的自转角动量。这一自转角动量用无量纲数 a^* 来表示,当 $a^*=0$ 的时候表示黑洞不发生自转,而 $a^*=1$ 的时候表示黑洞是一个极端黑洞(不能转得更快了,否则就会出现裸奇点)。

期待更多“零”的突破

作为首次被探测到的引力波,这次的波源是双黑洞并合所引发,这种引力波的典型频率在1~100 Hz之间。但是,就公开发表的情况来看,对于其他频段的引力波的测量目前还没有实现“零”的突破,比如 10^{-16} Hz左右的原初引力波会在宇宙微波背景上产生所谓B模式,而用脉冲星计时阵探测的 10^{-9} Hz左右的双超大质量黑洞的引力波也是科学家们关心的物理过程。这些频率的引力波探测都还需要后续进一步的工作去完成。

发现引力波可以与100多年前发现电磁波的事件相提并论。很明显,电磁波已经改变了我们人类社会的面貌,从手机信号到微波炉,从WIFI到GPS,电磁波带来了人类文明的曙光。

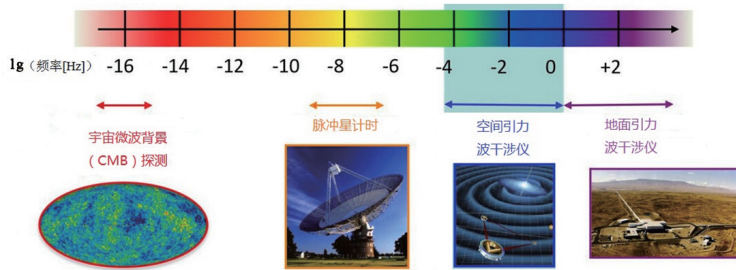


图3 不同的引力波探测器对应的不同引力波频段

在电磁波被发现100多年以后的今天,引力波被找到了。它是唯一可以在高维时空中传递的波,这点与电磁波完全不同,对引力波的深入研究可以带给我们对大尺度时空结构信息的全面深入了解。同时,毫无疑问的是,引力波的穿透能力比中微子还要强,它也许真能像科幻小说《三体》中描述的那样,被人类用于星际通讯领域。

(注:原标题为《升级版LIGO未开机已发威:找到引力波是幸运,也是意料之中》)

文/张轩中

(责任编辑 王丽娜)