

·科技纵横·

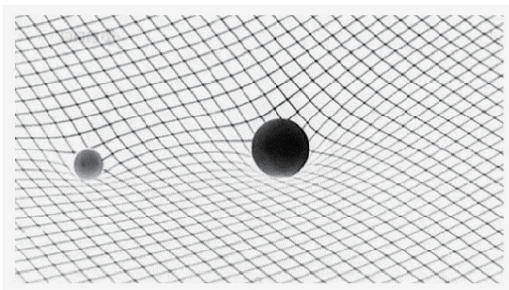
# 引力波为物理学树立新的里程碑

美国当地时间2016年2月11日上午10点30分,是物理学界值得纪念的日子,来自美国的激光干涉引力波观测站(LIGO)与美国麻省理工和加州理工大学等各处的专家们,在华盛顿特区国家媒体中心召开了新闻发布会,向全世界宣布首次直接探测到引力波的消息<sup>[1]</sup>,《Physical Review Letters》紧接着发表了相关的论文<sup>[2]</sup>。全世界都为之振奋,天文界和物理界的专家们更是激动不已。

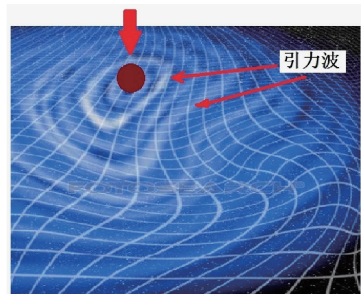
## 1 引力和引力波

有着高中物理基础的人都知道牛顿的万有引力定律揭示了引力与万物的关系,也知道引力的表现之一就是我们所熟知的重力。爱因斯坦的广义相对论也是有关引力的理论,但它从与牛顿不同的角度来看待引力。爱因斯坦首先建立了狭义相对论,将时间和空间统一在一个称之为“四维时空”的框架里,十年之后的1915年,他又将引力与四维时空的弯曲性质联系在一起,建立了广义相对论。可以用一句话来简单理解广义相对论:“物质使得四维时空弯曲,弯曲的时空又影响其中物体的运动。”也可以通过一个如图1(a)所示的通俗例子来比喻它,犹如一大片无限扩展的弹性网格以及上面滚动的小球互相影响:网格形状因小球重量而弯曲,小球的运动轨迹又因网格的弯曲而改变。

再举一个例子来说明牛顿引力理论与广义相对论的区别。当我们在地球上抛石头,石头沿着抛物线回到地面。石头为什么不走直线呢?牛顿说,是因为地球对石头的引力使它偏离了直线;而爱因斯坦说,是因为地球的质量使附近“时空”弯曲,石头走的是这个弯曲时空中的“直线”(物理学上叫做测地线)。



(a) 物质使时空弯曲



(b) 引力波是弯曲时空中的涟漪

图1 弯曲时空和引力波

牛顿引力理论与广义相对论不仅是描述引力的角度不同,重要的是它们得到的结论也不一样。在引力较弱、范围较小的场合,两者结论是基本一致的;但是,对于天文的甚至在宇宙尺度范围,就必须使用广义相对论,才能得到符合实验的准确结果。

1916年,爱因斯坦从广义相对论再进一步,预言了引力波<sup>[3]</sup>。使用上文的比喻,设想弹性网格上突然掉下一个很重的大铅球,如图1(b)。铅球不仅使得网格的形状大大改变,而且还将引起弹性床的大震荡,就像一颗石子投在平静的水面上引起涟漪一样,铅球引起的震荡将传播到网格的四面八方。将这个涟漪的比喻用到四维弯曲时空中,便是引力波。也就是说,引力波是时空弯曲产生变化而向外传播的涟漪。

根据广义相对论,任何作加速运动的物体,不是绝对球对称或轴对称的时空涨落,都能产生引力波。尽管爱因斯坦在100年之前就预言存在引力波,但是,由于引力波携带的能量很小,强度很弱,物质对引力波的吸收效率又极低,一般物体产生的引力波,不可能在实验室被直接探测到。举例来说,地球绕太阳相互转动的系统产生的引力波辐射,整个功率才只有大约200 W,而太阳的电磁辐射功率是引力波辐射的 $10^{22}$ 倍。可以想象,照亮一个房间的

200 W功率的电灯泡,散发到太阳-地球系统这样一个诺大的空间中,效果将如何?所以,地球-太阳体系发射的微小引力波一直完全无法被检测到。

## 2 长久的等待

笔者当年博士论文的课题是有关引力波在黑洞附近的散射问题,记得30年前的一次讨论会上,有人提到何时探测到引力波的问题时无人作声。当年,著名物理学家约翰·惠勒是我的博士论文委员会成员之一,只有他笑嘻嘻、信心满满地说了一句“快了!”。我那时只知道推导数学公式,对探测引力波的情况一无所知,但惠勒这句“快了”在我脑海中却记忆颇深,也使我从此关心起引力波是否真正存在的问题。

1993年,传来了两位美国科学家——约瑟夫·泰勒和拉塞尔·赫尔斯获得诺贝尔物理奖的消息<sup>[4]</sup>。他们在20世纪70年代末研究双星运动,即两颗双中子星相互围绕着对方公转,从而间接证实了引力波的存在。笔者当时便立即想起了惠勒的话,难怪那次他说“快了”。

2000年,听说惠勒的一个学生——就是和惠勒一起合作《引力》之书的Kip Thorne,他是加州理工学院的教授,曾为科幻电影《星际穿越》做编剧——在几年前启动了一个叫LIGO的项

目,专为探测引力波。1999年10月的《Physics Today》有一篇文章是关于此项目,后来看了之后,脑海里也浮现出惠勒那句“快了”。

2007年,在加州偶然碰到一个原来一起在相对论中心的同学,他在某天文台研究天体物理,谈及引力波,他也说“快了”,因为LIGO一年后将要再次升级,升级完成后就“快了”。

2014年,又一次传来探测到引力波的消息<sup>[5]</sup>。

因为普通物体,甚至于太阳系产生的引力波都难以探测,科学家们便把目光转向浩渺的宇宙。宇宙中存在质量巨大又非常密集的天体,诸如黑矮星、中子星,或许还有夸克星等。超新星爆发、黑洞碰撞等事件将会产生强大的引力波。此外,在大爆炸初期的暴涨阶段,也可能辐射强大的引力波。

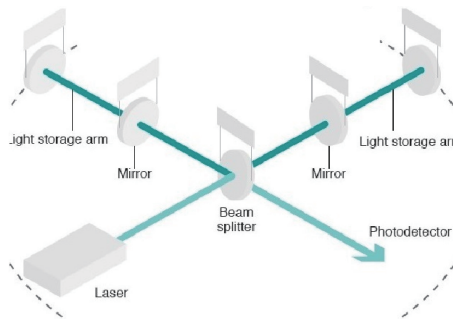
2014年传言哈佛大学设在南极的BICEP2探测器探测到了引力波,当时指的并不是直接的接收,而是大爆炸初期暴涨阶段所发出的“原初引力波”在微波背景辐射图上打上的“印记”。但是非常令人遗憾,后来证实这是一次误导,是一次由尘埃物质造成的假“印记”。

直到2016年2月11日LIGO召开发布会,人类才真正第一次直接接受到了引力波。当初惠勒的这句“快了”,实现起来也至少花了30多年,而爱因斯坦已经等待100年了。

### 3 艰难探索之路

物理学家认为,世界上的基本作用力有4种,除了通常所知的电磁力和引力之外,还有微观世界才观察得到的弱相互作用和强相互作用。这4种作用中,引力的强度是最弱的,它比电磁力至少要小35个数量级。平常我们可以明显地感觉到地球的引力,那是因为地球的巨大质量;但我们无论如何也感受不到人与人之间的万有引力,就是因为它的强度太小了,这也就是引力波难以探测到的原因。

引力波是爱因斯坦广义相对论的预言之一。这个优雅美妙的理论有几



(a) 激光干涉仪原理图



(b) LIGO臂长4 km的实际观测站

图2 探测引力波的实验设施

个基本经典预言,如水星近日点进动,光线偏转等,都一一经过了实验和观测的反复验证,唯有这个引力波没有探测到,成为物理学家的心病,如同被一块大石头压着,堵得慌。

物理学家们想,引力波虽然弱,但只要存在,总会在宇宙中留下蛛丝马迹吧。那么,如果有足够强度的引力波经过地球的话,会引起什么样的效应呢?因此,有关这方面的理论研究和计算机模拟从未停止过。

根据广义相对论,引力波使得弯曲的空间随着时间变化,也就能使物体产生伸长和收缩。比如,如果是一个球形物体便会成为一个形状不停变化的椭圆;而一根长棍子,其长度便会随时间而变化。如果探测到这个长度变化,不就探测到引力波了吗?

美国花费巨资升级的LIGO,是目前最先进的观测引力波的仪器,它使用激光干涉仪来探测引力波引起的极其微小的长度变化,见图2(a)。激光干涉仪是物理实验中常用的设备,其基本原理如下:从一点发射出两束垂直的激光,分别通过长度为 $L_1$ 和 $L_2$ 的两个干涉臂之后返回到出发点;然后,让返回的两束光进行干涉,两束光的相对相位将影响干涉图案,从而便能测量出 $L_1$ 和 $L_2$ 的长度之差 $L=L_1-L_2$ 。

显然,两束光所走的距离越长,测量便越精确。要想捕捉到微弱的引力波,两个干涉臂必须很长,但太长了激光还没返回就衰减了也不行,所以,也需要使用非常强的激光。这就是为什么图2(b)中的引力波探测仪器并不是一个放在实验室中的小设备,而是一个

地面上的大工程。以LIGO为例,它的双臂长度为4 km,并且让激光在臂中反射了400次再干涉。此外,LIGO观测机构拥有两套干涉仪,一套安放在路易斯安娜州的李文斯顿,另一套在华盛顿州的汉福。两台干涉仪都得到类似的结果,方才能证实的确接收到了引力波。这次捕捉到的引力波十分微弱,即使有效臂长延伸到1600 km,引力波引起的长度变化也只有质子半径的1/1000(大约 $10^{-18}$  m)。

如果宇宙中发生过某些特殊事件,比如说,两个中子星或者是两个黑洞,碰撞融合在一起,便会辐射出强烈的引力波。这种事件应该是发生在距离我们很远的太空中的很多亿年之前的事。事件发生时辐射的引力波经过了长时间的旅行后,也许正好某时某刻到达了地球,便会引起上述实验装置中两条干涉臂长度的有规律的周期性变化,并且反映到干涉图像中被人类探测到。这就是2015年9月14号发生的故事,称之为GW150914事件。终于探测到了引力波,科学家们为此事件而欣喜若狂。

### 4 物理研究的里程碑

测量到引力波的意义非凡。首先,这意味着科学家们可以通过它来进一步探测和理解宇宙中的物理演化过程,为恒星、星系乃至宇宙自身现有的演化模型提供了新的证据,也提供了一个更为牢靠的基础。其二,过去的天文学基本上是使用光作为探测手段,而现在观测到了引力波,便多了一种探测方法,也许由此能开启一门引力波天文学。

此外,大爆炸模型,以及黑洞等发射的引力波,都是建立在广义相对论<sup>[6]</sup>的基础上。如今真正探测到了理论预言的引力波,就能再次证明这个理论的正确性。

这次探测到引力波的波源,据说是遥远宇宙空间之外的双黑洞系统。其中一个黑洞质量是太阳的36倍,另一个质量是太阳的29倍,两者碰撞并合成一个62倍太阳质量的黑洞。显然这儿有一个疑问:36+29=65,而非62,还有3个太阳质量的物质到哪儿去了呢?其实这正是我们能够探测到引力波的基础。相当于3个太阳质量的物质转化成了巨大的能量释放到太空中。正因为有如此巨大的能量辐射,才

使远离这两个黑洞的小小地球上的我们探测到了碰撞融合过程中传来的已经变得很微弱的引力波。

因为波源是第一次发现的两个黑洞,探测到引力波也再一次确认了这两个黑洞是宇宙空间中的真实存在。黑洞物理不仅涉及广义相对论,也与量子理论密切相关,实际上,对黑洞的认识在物理的不同领域中也稍有一些不同。我们至少可以从数学、物理与天文3个不同的角度来看待黑洞。数学黑洞,指的是经典引力场方程的奇点解,更是一种数学模型,涉及的多是黑洞无毛定理、史瓦西半径、视界等等数学定义;物理黑洞,多涉及黑洞的热力学性质,诸如黑洞熵、霍金辐射、信息丢失

等,与量子物理关系密切;天文黑洞,是真实观测到的被称为“黑洞”的天体。

引力波的探测结果以及今后朝这个方向的进一步研究,将有助于深化对黑洞物理性质的认识,对两个黑洞碰撞融合过程的研究,也必定会得到大量有用的信息。对黑洞的这3个方向的深入研究,也许能促成量子理论与引力理论的统一,对基础物理学的研究意义将十分重大,有着里程碑的作用。

文/张天蓉

**作者简介:**美国德克萨斯州大学奥斯汀分校理论物理博士,科普作家。

#### 参考文献(References)

- [1] Pallab G. Einstein's gravitational waves 'seen' from black holes[EB/OL]. [2016-02-11]. <http://www.bbc.com/news/science-environment-35524440>.
- [2] Abbott B P, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(6). Doi: 10.1103/PhysRevLett.116.016102.
- [3] Einstein A, Rosen N. On gravitational waves[J]. Journal of the Franklin Institute, 1937, 223(1333-4): 43-54.
- [4] Press Release: The 1993 Nobel Prize in physics[EB/OL]. [1993-10-13]. [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1993/press.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1993/press.html).
- [5] Overbye D. Detection of waves in space buttresses landmark theory of big bang[N]. The New York Times, 2014-03-17.
- [6] 张天蓉. 上帝如何设计世界—爱因斯坦的困惑[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.

(责任编辑 王丽娜)