

引力波的昨天、今天和明天

王紫阳¹ 乔霓炫¹ 龚云贵² 张元仲³

(1 北京陈经纶中学 100020; 2 华中科技大学 430074; 3 中国科学院理论物理研究所 100190)

一、引力波的历史

1. 引力波的理论预言及其特性

赫维赛德基于引力和电磁力都是平方反比力以及电磁波的物理特性早在 1893 年就提出了引力波的概念。庞加莱于 1905 年进一步指出了引力波以光速传播。1915 年年底爱因斯坦给出了引力场所满足的相对论场方程—爱因斯坦场方程，并且于 1916 年对爱因斯坦场方程在平直时空背景下做线性近似，推导出了引力波所满足的波动方程及引力辐射的四极矩公式，从而预言了引力波的存在及引力波以光速传播。遗憾的是爱因斯坦在 1916 年的推导中犯了一个错误，从而错误地预言引力波存在三个自由度，即三个偏振方向。一年半之后的 1918 年爱因斯坦纠正了这个错误，正确地指出引力波只有两个独立自由度，即两个偏振方向（属于横波），并计算了引力波辐射的能量。和经典电磁辐射是由电荷加速运动所产生的机制类似，爱因斯坦的四极矩公式告诉我们加速运动的物体会产生引力波。如果一个系统的质量分布不对称地运动，那么时空变形就会以波纹的形式向外传播，这就是引力波。引力波在本质上不同于我们熟悉的电磁波，由加速运动物体产生的引力波是时空纤维本身的波。由于电荷守恒定律，电磁辐射最低阶是偶极矩辐射。而能量守恒、动量守恒及角动量守恒定律则要求引力辐射最低阶是四极辐射，即典型的引力波源为类似转动哑铃的双星系统。因此，那些球对称的引力效应不会产生引力辐射，如超新星的完美球对称坍缩不会产生任何波。而非球状的塌缩则会辐射引力波，所以双星系统会辐射引力波。由于引力波的强度为物体运动速度与光速之比的五次方 (v^5/c^5)，因而其强度极小，非

常难探测，所以在爱因斯坦提出引力波之后的几十年间有关引力波的理论研究并不多。

2. 引力波是否存在的争论

引力波是否存在一直是一个有争议的问题，甚至爱因斯坦自己都怀疑引力波的存在。1936 年爱因斯坦和他的助手罗森写了一篇引力波不存在的论文（题目是“引力波存在吗”）投稿到美国《物理评论》，编辑部依据匿名审稿人的审稿意见拒绝发表该文；后来爱因斯坦接受了他在普林斯顿大学的好友罗伯森的意见改写了论文（并修改了引力波不存在的错误结论，但是他并不知道罗伯森其实就是匿名审稿人），题目也改为《论引力波》并在富兰克林学院学报上发表。

为了理解引力辐射问题，人们发展了不同的近似方法。1938 年爱因斯坦及其合作者提出了处理弱场中低速运动的“后牛顿”方法，利用这个近似方法，计算到 $(v/c)^4$ 阶都不会出现引力能量辐射。四极矩辐射出现在下一阶，这点直到 1947 年才被中国物理学家胡宁教授证明。但是对于非低速运动的引力辐射，上述近似方法便不再适用，而需要发展一套新的近似方法。对于双星系统，考虑引力波与双星系统的总能量守恒后，四极矩辐射公式则仍然适用。要处理如黑洞并合时所辐射的引力波，则需要利用数值相对论方法。

直到 20 世纪 50 年代，一些相对论理论物理学家，特别是邦迪严格证明了引力辐射实际上是一个可观测的物理现象。因为引力波携带能量，所以一个辐射引力波的系统会损失能量。其实早在 1805 年，拉普拉斯就在他著名的“天体力学条约”中指出如果引力以有限的速度传播，一个双星系统中的引力就不会指向两星之间的连线上，并且系统的角动量会随着时

间缓慢地减小。当然我们现在知道这是因为双星系统通过辐射引力波而损失了能量和角动量。1957年费曼和邦迪提出把两个黏性小球套在一根刚性杆上，当引力波传来的时候，刚性杆因为原子力的作用长度不发生变化，但两个小球的间距将会持续震荡变化，这样会与刚性杆发生摩擦，产生热量，这热量的来源就是引力波。

3. 引力波的物理效应

引力波会扭曲时空，换句话说，它们会改变两个自由的宏观物体之间的距离。一系列引力波穿过太阳系时，会在空间产生一个随时间变化的伸缩力，它会在垂直于波的传播方向上周期性地改变太阳系中所有物体间的距离。主要的问题是，由于引力波的通过而导致的相对长度变化是很小的。例如，受到典型白矮星双星系统辐射的引力波的影响，相距 10^{13} 米的两个检验物体之间的距离的周期性改变只有 10^{-10} 米。从引力波携带很少能量的意义上说，这并不意味着引力波很弱。相反，在不太远的星系中的一个超新星的引力波会以几千瓦的强度拉扯地球上的每一个角落。然而，因为时空是极僵硬的弹性介质，最终的长度改变仍然很小，以至于即使是微小的扭曲也需要极高的能量。

二、引力波的早期观测

1. 引力波观测的韦伯棒方法

从20世纪60年代开始韦伯最早尝试探测引力波。他利用一个被称为韦伯棒的铝合金圆柱体作为探测器来探测引力波，引力波会使得韦伯棒长时间地发生“共振”，安装在探测器上的转换器可以监测不同振动模式的复杂振幅。韦伯使用的圆柱体共振棒长2米，圆桶直径为1米，重约1吨，在室温下工作，其中心频率为千赫兹，带宽只有几赫兹。1968年韦伯宣布他利用共振棒探测到了引力波，但他的实验结果并没有得到重复及验证，被学术界普遍认为是错误的。

自韦伯之后，共振棒探测器有位于美国路易斯安那州立大学的路易斯安那低温及引力波天文台（ALLEGRO），位于西澳大利亚大学的NIOBE，

位于意大利东北部的AURIGA，位于欧洲核子中心的Explorer，以及位于意大利国立核子研究所的NAUTILUS等。现在的共振棒一般工作在液氦温度，其探测引力波强度的灵敏度可以达到 10^{-19} 。因为球状探测器对所有方向都敏感，莱顿大学的minGRAIL探测器是第一个设计成球形的探测器，其直径为68厘米，重1300千克，共振频率约为3000赫兹，带宽为230赫兹，期望工作在20mK。巴西圣保罗大学计划建造的Mario Schenberg引力波探测器具有类似的设计，其直径为65厘米，重1.15吨，工作温度为20mK。下一代的探测器如TIGA一般是球状的，工作温度在50mK以下，在千赫兹频段，其探测引力波强度的灵敏度可以达到 10^{-21} 。另外需要提到的是，1972年在中国也有二家实验室建立了韦伯棒用来探测引力波；一家是中国科学院在北京中关村的实验室，另一家是广州中山大学的实验室。

2. 引力辐射的间接证据

20世纪70年代，赫尔斯和泰勒发现了脉冲双星PSR 1913+16，并且对该双星系统的周期变化进行了精确观测，发现双星系统的周期变化结果和根据爱因斯坦理论计算的辐射引力波的结果是相符的，这一成果间接证明了引力辐射的存在。1993年他们获得了诺贝尔物理学奖。

三、当代大型引力波天文台装备

1. LIGO 和 Advanced LIGO

20世纪70年代韦斯等提出利用激光干涉仪来探测引力波。1984年，索恩、德雷弗和韦斯领导了激光干涉引力波天文台（LIGO）计划。1994年LIGO获得3.95亿美元的资金支持，成为世界上最大的引力波探测仪。2002年，LIGO搭建完成并开始了对引力波的探测。2004年，LIGO开始了升级，新的高级（Advanced）LIGO开始搭建，并在2015年开始运行。两个相距3002千米的相同的高级LIGO分别位于美国华盛顿州汉福德和路易斯安那州利文斯顿，每个LIGO就是两个相互垂直的臂长为4千米的迈克尔逊激光干涉仪（LIGO的外貌见图1）。



华盛顿州汉福德



路易斯安那州利文斯顿

图1 激光干涉引力波天文台 (LIGO)

2. 其他装置

地面探测引力波的装置除了 LIGO 之外，还有位于意大利的 Virgo（臂长为 3 千米），德国的 GEO600（臂长为 600 米）。计划中的澳大利亚国际引力波天文台（AIGO，也称为 LIGO- 澳大利亚，臂长为 5 千米），印度的 INDIGO（也称为 LIGO- 印度，臂长为 4 千米），日本的低温激光干涉天文台（CLIO，臂长为 100 米，其前身是臂长为 300 米的 TAMA300）及神冈引力波探测器（KAGRA，臂长为 3 千米）等。这些激光干涉仪一起构成的网络可以用来定位引力波源。下一代的激光干涉仪计划如爱因斯坦望远镜 (ET) 将建造在地下，由三个 10 千米长的臂构成等边三角形，每个角上放两个探测器，ET 可以用来探测引力波的偏振。我国相关大学及研究所也在计划建造地下激光干涉引力波探测器。

3. 人类第一次直接观测到了引力波

2016 年 2 月 11 日，LIGO 宣布他们在 2015 年 9 月 14 日观测到了来自两个黑洞并合时释放的引力波，并推测出两个黑洞的质量分别为 36 及 29 个太阳质量，并合后的质量为 62 个太阳质量（缺失的 3 个太阳质量以引力波的能量辐射出来），距离我们 410Mpc（410 兆秒差距约为 13.4 亿光年）。这个发生在 13.4 亿年前的引力波信号被命名为 GW150914，它先被位于 Livingston 的干涉仪探测到，6.9 毫秒后被位于 Hanford 的干涉仪探测到。至此，人类历史上第一次直接观测到了引力波。随后的 2016 年 6 月 15 日，LIGO 又宣布观测到第二个引力波信号，这个信号发生在 2015 年 12 月 26 日，来自距离我们 440Mpc 的质量为 14.2 个太阳质量及 7.5 个太阳质量的两个黑洞的

并合，并合后的黑洞质量为 20.8 个太阳质量，这个信号被命名为 GW151226。

四、已经启动或将要启动的未来空间引力波探测计划

由于受到地球引力梯度的限制，在地面上不可能观测频率低于 1 赫兹的引力波。要探测频段为 10^{-4} 到 1 赫兹的引力波，则需要空间进行探测。

计划中的空间探测引力波计划有欧空局 (ESA) 的从 LISA 激光干涉空间天线 (Laser Interferometer Space Antenna) 计划到 eLISA 计划；日本的分赫兹干涉引力波天文台 (DECIGO)；中国科学院的太极计划，中山大学与华中科技大学的天琴计划等。下一代的空间引力波探测器有大爆炸天文台 (BBO) 等。

其中欧空局的 eLISA 是 LISA 的进化 (evolving) 版本，其布局是由三颗航天器组成边长为 200 万千米臂长的等边三角形，三颗星之间由激光连接形成激光干涉仪可以探测引力波造成的臂长变化，三颗星的编队围绕太阳运动。

中国科学院空间引力波探测计划源于胡文瑞院士从 2008 年开始组织中国科学院和相关高校的有关专家的论证和方案设计，该空间引力波探测计划于 2016 年初命名为太极计划，其方案也是三颗星的编队围绕太阳运动（类似于 eLISA，不同之处主要在于其臂长为 300 万千米）。中山大学与华中科技大学的天琴计划中的三颗星臂长为 10 万千米的量级，三颗星编队是围绕地球（而不是太阳）运动的。以上三个空间计划的布局之间的比较参见图 2。

此外，需要一提的是为了验证 eLISA 计划的关键技术，欧空局的 LISA 探路者 (LISA Pathfinder) 已经于 2015 年 12 月 3 日发射，其环绕第一个拉格朗日点旋转，实验结果已经于 2016 年 6 月发表在美国的《物理评论快报》上。

五、其他的引力波探测计划

通过观测引力波对电磁波在空间传播过程中的影响也可以用来探测引力波。脉冲测时阵便是通过测量引力波对微秒脉冲星的电磁脉冲到达地球上的望远镜的时间的影响来测量引力波的，这种方法可以测量到频段

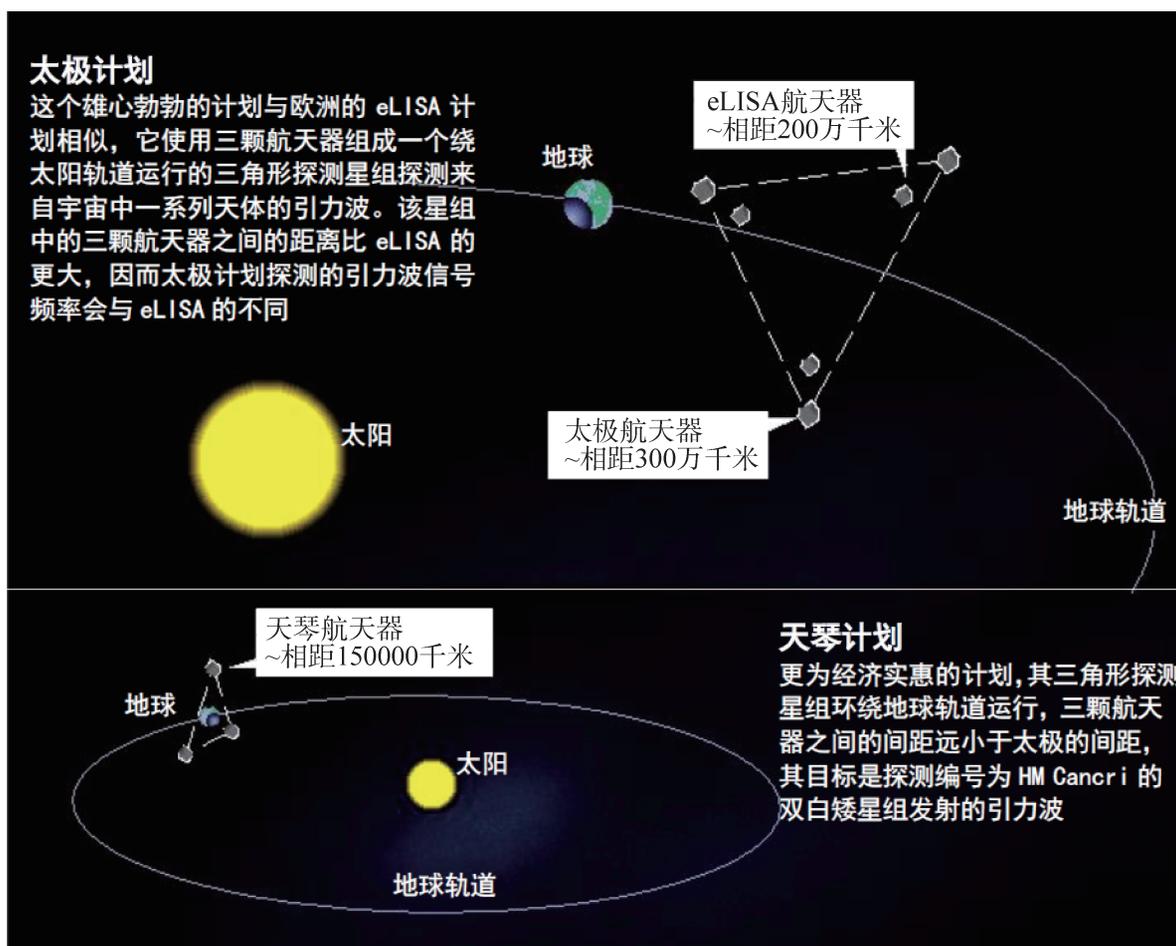


图2 eLISA、太极、天琴的比较

为 10^{-9} 到 10^{-5} 的引力波。脉冲测时阵有欧洲脉冲测时阵 (EPTA)，北美纳赫兹引力波天文台 (NANOGrav)，Parkes 脉冲测时阵 (PPTA) 等国际脉冲测时阵。中国科学院的 110 米口径全可动射电望远镜 (QTT) 及 500 米口径球面射电望远镜 (FAST) 也可以通过脉冲测时阵方法测量引力波。

带电粒子的加速运动会产生经典连续电磁波，原子内电子的量子跃迁会产生分立的电磁波。类似地，除了上面讨论的由非对称质量分布的系统加速运动产生的经典引力波外，宇宙极早期暴涨时期的量子涨落会产生原初引力波，其频谱范围为 10^{-18} 到 10^7 赫兹。频谱在 10^{-16} 到 10^7 期间的原初引力幅度很小而且几乎与频率无关，前面讨论的那些方法基本上不可能测量到这么小的原初引力波。由于原初引力波会在微波背景辐射极化中产生所谓的 B 模极化，所以通过测量微

波背景辐射中的 B 模极化不但可以探测原初引力波，而且可以用来研究极早期宇宙的物理。对 B 模极化测量也分为地面及空间探测两种方式。地面探测实验主要有位于智利的 POLARBEAR 及位于南极的 BICEP 与 Quid。尽管 BICEP 组在 2014 年 3 月 17 日宣称探测到了原初引力波对微波背景辐射 B 模极化的遗留痕迹，但是后来发现他们在处理前景噪声时存在问题，所以这个发现纯属乌龙。目前空间项目主要有欧空局于 2009 年发射的 Planck 卫星，下一代空间项目有 PRISM 及 CORe 计划等。到目前为此，我们还没有发现原初引力波。中国科学院针对原初引力波提出了阿里计划。

总之，今天引力波发现以及明天的进一步探测不但是对爱因斯坦理论在强引力场情况下的检验，而且更是为我们研究引力理论及天文现象打开了一个全新的窗口。