

引力波天文学

——一个观测宇宙的新窗口

王运永 朱宗宏 R. 迪萨沃

引力波是爱因斯坦“广义相对论”最重要的预言，引力波探测是当代物理学重要的前沿领域之一。以引力波探测为基础的引力波天文学是一门正在崛起的新兴交叉科学，由于引力辐射独特的物理机制和特性，使得引力波天文学研究的范围更广泛、更全面，物理分析更精确、更深刻。它以全新的探测理念和探测方法揭示宇宙的奥秘，探寻未知的天体和物质。它能提供其他天文观测方法不可能获得的信息，加深人们对宇宙中天体结构的认识，是继以电磁辐射（包括射电、红外线、可见光、紫外线、X射线和伽玛射线）为探测手段的传统天文学之后，人类观测宇宙的一个新窗口。对研究宇宙的起源和进化，拓展天文学的研究领域都有极其重要的意义。

爱因斯坦的广义相对论是20世纪人类在自然科学领域取得的最辉煌的成就之一。它开创了近代物理研究的新纪元。

一、引力波的产生

引力场的扰动在时-空中传播出去，就像水池中水的扰动向外传播的波纹一样，这种弯曲时-空中的涟漪就是引力波（图1）。

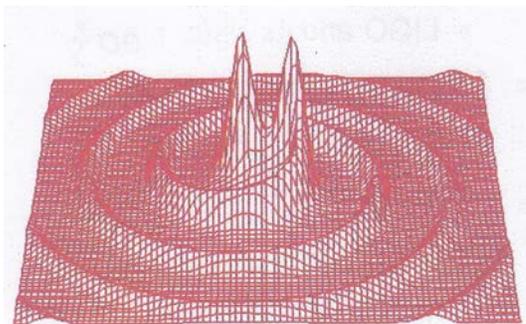


图1 引力波

引力波理论认为，当物质运动，或物质体系的质量分布发生变化时，就会发出引力辐射。从数学上来讲，我们可以把任何物质或物质系统的质量分布以质量多极矩的形式表示出来，引力波是由于质量多极矩随时间变化时辐射的。物质的质量单极矩是它的质量，根据能量守恒定律，它是一个常数，不随时间变化，因此不会有单极矩引力辐射产生。质量偶极矩的时间微分是源的动量，根据动量守恒定律，它也是不随时间变化的，当然也不会有引力偶极辐射。因此第一阶引力辐射是由源的质量四极矩随时间的变化引起的。应该指出，在有些天体内部存在着质量流，我们同样可以写出它的质量流多极矩。根据对称性，质量流单极矩本身不存在。质量流偶极矩的时间微分是源的角动量，根据角动量守恒定律，质量流偶极辐射是不存在的。因此，源的质量流四极矩随时间的变化所产生引力辐射也是第一阶引力辐射的组成部分。

引力波所满足的方程可以从爱因斯坦引力场方程推导出来。在爱因斯坦引力场方程中，

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (\mu, \nu=1, 2, 3, 4)$$

其中 $R_{\mu\nu}$ 是里奇张量； $g_{\mu\nu}$ 是时空度规张量； $T_{\mu\nu}$ 是物质的能量-动量张量，它描写引力场源的能量和质量分布。

在弱场近似（即忽略二阶以上的小量）情况下，时空度规张量 $g_{\mu\nu}$ 可写成闵可夫斯基度规 $\eta_{\mu\nu}$ 加上一个小的微扰项 $h_{\mu\nu}$ 来表示

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}, \quad (|h_{\mu\nu}| \ll 1)$$

将它代入引力场方程且在真空情况下，此方程就变为

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) h_{\mu\nu} = 0。$$

这就是熟知的真空方程，该方程最简单的解是平面波，选择横向无迹规范条件（TT 规范）可以得出方程的解，取引力波的传播方向为 z ，其表达式为：

$$h_{\mu\nu}^{TT} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_\times & 0 \\ 0 & h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} e^{-i\omega(t-z/c)}$$

二、引力波的性质

由波动方程的解我们可以知道引力波具有如下特性：

1. 引力辐射的第一项是质量四极矩随时间变化时发射的

引力波在引力理论中的位置与电磁波在电磁学中的作用类似。像电荷的电多极矩一样，也可以写出引力波源质量分布的质量多极矩。引力波是波源质量多极矩随时间变化时发射的。它的第一项是质量四极矩随时间变化时发射的。

2. 引力波是横向无迹的，它有两个极化方向 h_+ 和 h_\times （图 2）

让我们以 h_+ 极化为例说明引力波对时空产生的影响。假设我们在空间划定一个圆（虚线），它位于空间的 $x-y$ 平面内，引力波沿 z 轴方向传播。该圆表示无引力波存在的空间状态。当引力波到来时，圆内的空间将跟随引力波的频率 ω 在一个方向上被拉伸（或压缩），相应地，在与其垂直的方向上被压缩（或拉伸）。 h_\times 的情形也是这样，只不过两个偏振引起的

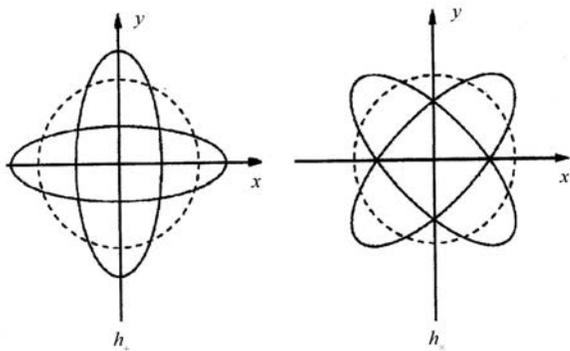


图 2 引力波的极化方向 h_+ 和 h_\times

空间拉伸或压缩方向成 45° 角。

3. 引力波以光速进行传播

4. 引力波的强度非常弱

引力波的强度用无量纲振幅 $h(t)$ 表示， $h(t)$ 的物理意义是引力波引起的时空畸变与平时时空度规之比。 h 又称为应变，应变的定义可用下面的简图说明（图 3）：

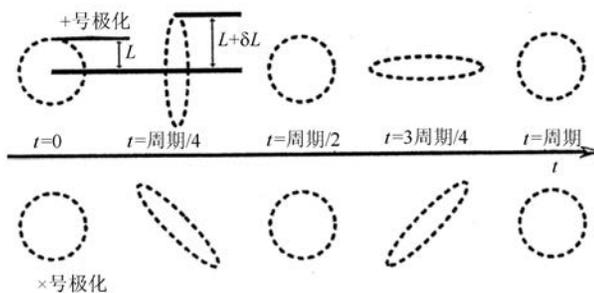


图 3 引力波无量纲振幅 h 的物理意义

让我们以 h_+ 极化为例加以说明。像在前面讨论的那样，设想在无引力波存在时，在空间划定有一个圆（虚线），它位于空间中 xy 平面，半径为 L ，该圆表示无引力波存在的空间状态。当引力波沿着垂直于圆的平面（即 z 轴）穿过时，该圆会因时-空弯曲发生畸变，根据引力波的特性，圆内的空间将随引力波的频率 ω 在一个方向上被拉伸（或压缩）；相应地，在与其垂直的方向上被压缩（或拉伸），变成一个椭圆。其长半轴为 $L+\delta L$ ，短半轴为 $L-\delta L$ 。当引力波通过 $1/2$ 周期时恢复到圆，而在 $3/4$ 周期时又变成椭圆，不过方向转了 90° 。当引力波走过一个周期时，该空间重新恢复到圆。引力波的强度以此圆畸变的尺度来表示：

$$h_+(t) = \delta L/L.$$

对于叉号偏振 h_\times 同样可以用图 3 来说明，只不过两个偏振引起的空间拉伸或压缩方向成 45° 角。

引力波的强度非常弱，根据理论计算，比较可能出现的引力波的无量纲振幅 h 为 10^{-22} 量级或更小。在臂长为 4 km 的激光干涉仪引力波探测器（如 LIGO）中，由它引起的两个测试质量之间距离的变化 δL 仅为 10^{-19} m 量级。

三、引力波与电磁波的比较

为了更好地理解引力波的性质，我们将它与日常生活中天天接触的电磁波进行比较。

表1 宇宙中引力波与电磁波的比较

电磁波	引力波
电荷加速或电流振荡产生电磁波	引力质量四极矩随时间变化产生引力波
电磁波是在空间传播的横波	引力波是时空扰动的传播，是横波，有两个偏振态
是由天体源的构成部分（如原子、分子、离子等）彼此无关地辐射出去	由天体源的物质运动或质量分布发生变化时产生
波长远小于天体源的尺度	波长可与天体源的大小相比拟，甚至大于天体源的尺度
可对天体源进行“类像”探测，即“看”电磁波	可对天体源进行“类声”探测，即“听”引力波
有比较成熟的场的量子化理论，场量子为光子	还没有成熟的引力场量子化理论，想象中的场量子为引力子

四、引力波天文学的特点

天文学的研究是基于对天体辐射的探测，根据被探测辐射类型的不同可分为：电磁辐射天文学、宇宙线天文学、中微子天文学和引力波天文学。电磁辐射天文学仍然是当代天文学研究的主流。然而，从遥远天体发射的电磁辐射，必须穿过大气层才能到达地面，大气层对电磁波的很多波段会产生强烈的吸收，使得大气层对这些波是不透明的。例如，大气中的臭氧层和氧原子分子及氮原子分子会强烈吸收紫外线、X射线和 γ 射线，大气中的水分子和二氧化碳分子会强烈吸收某些频率的红外线，因此在地面上就接收不到这些波段的天体辐射，无法对这些天体进行观察和测量。幸运的是大气层对可见光、波长为30 m ~ 1 mm的射电波和部分红外线是透明的。传统的电磁辐射天文学才能通过这个大气窗口得以存在和发展（图4）。

引力波天文学是以探测物质辐射的引力波为基础的一门新兴科学。由于引力辐射是由天体源的物质运动或质量分布发生变化时产生的，使得引力波在传播过程中有很多突出的特点，这种独特的产生机制和性能为人类打开了一个全天候观测宇宙的新窗口。引力波天文学将以全新的探测理念和探测方法，为我们提

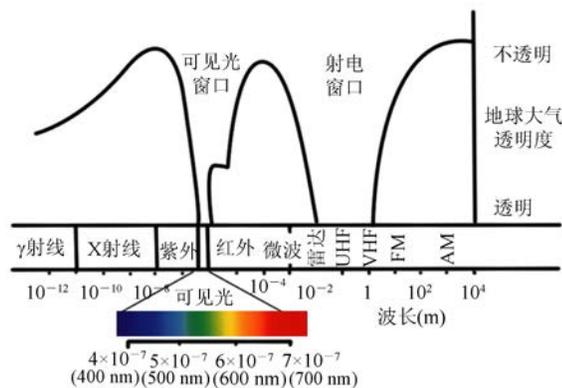


图4 观测宇宙的窗口

供其他观测方法不可能获取的天文信息，丰富并加深人们对宇宙的认识。

引力波天文学具有如下的特点：

1. 引力波天文学的基础是引力波探测，它是由天体源物质运动或质量分布发生变化时产生的，在宇宙中具有更大的普遍性。它可以提供电磁辐射不能携带的信息，探测到无法用电磁辐射或不具有电磁辐射的天体，为我们描绘出与（以电磁辐射为观测基础的）传统天文学给出的完全不同的宇宙图像。

2. 引力波在传播过程中，基本上不被吸收、不被散射、不被屏蔽，它可以将观测领域扩大到被宇宙尘埃弄暗，或被其他物质屏蔽的宇宙区域，发现新的天体和物质体系，更加明晰地揭示宇宙真面目。

3. 引力波能向我们提供天体源深处、高密度部分所发生的物理过程的完整信息，而发自天体源深处的电磁辐射全部或部分地丧失了这些信息。

4. 宇宙空间中很多引人注目的天文事件，如超新星爆发、星体碰撞、双星并合、脉冲星转动、黑洞扰动等剧烈的天文过程可能会以引力波形式释放相当强的能流。如果能够探测到这些引力波，则可以获取这些剧烈过程的完整的、独特的信息。

5. 到目前为止，我们所知的宇宙中所有的质量，包括已知的星体、尘埃、气体等，还不足用来解释星体运动所需质量的1/10。由于引力波与大质量天体密切相关，对这种大天体的寻找与研究给我们提供了破解这一难题的重要手段。

6. 根据宇宙大爆炸理论，引力波是在大爆炸后 10^{-43} 秒与物质分离的，是随机背景引力波的重要组成部分，它的探测能给我们提供宇宙最早状态的信息。

但是，它很可能比较弱，探测起来难度很大。具有强引力辐射的质量体系及由大量频谱相互叠加的引力波构成的宇宙随机背景辐射是引力波天文学研究的领域之一。

7. 电磁辐射天文望远镜只能观测天空的一小部分，而且光学望远镜一般都在晴朗的夜间工作。引力波探测器则不同，除了像电磁辐射探测器那样可以在晴朗的夜间工作外，引力辐射探测器在阴雨天气和白天都能正常运转，它甚至能够探测从地球的另一面穿透而来的引力波信号。可以说，它是一种全天候、全方位、经常性的观测器，可探测到剧烈天体变化的全面貌。

五、天体引力波源

当前，引力波天文学的重要任务是引力波探测，宇宙中最可能存在的引力波源有以下几大类：

1. 密近双星的旋绕与并合

对设在地面上的引力波探测器来说，致密双星系统是首选的引力波源，这种双星系统可以是中子星-中子星，中子星-白矮星，中子星-黑洞，黑洞-黑洞等。由于星体的尺寸一般都较小，例如中子星直径一般为 20 km 左右，它们靠得很近，以较高的频率绕质心转动。这意味着质量四极矩的二阶导数很大，引力波以很高的功率辐射。理论计算表明，其辐射能量是如此之大，以至于一个彼此相距几千米的双星会在几分钟甚至几秒钟之内失去它们的大部分势能。随着时间的增加，引力波的振幅和频率都会增加，直到两个天体足够靠近而并合。

应该指出，多数双星系统的总寿命可能长达几千万年，所以多数时间里，它们辐射功率很小，引力辐射的频率很低。只有在最后阶段，当它们靠得很近的时候，才会发出高功率的引力波，其频率也落在地球上引力波探测器的探测频带之内。

密近双星的并合过程分为旋绕、并合、余波三个阶段（图 5），每个阶段辐射的引力波波形各不相同（图 6）。

（1）旋绕阶段

由于引力辐射带走能量，密近双星的旋转轨道逐

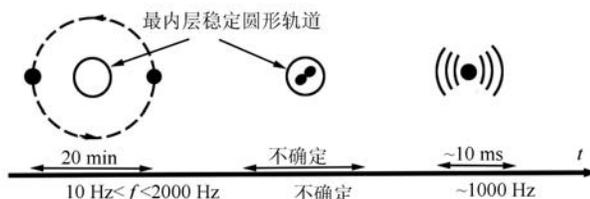


图 5 密近双星并合过程示意图

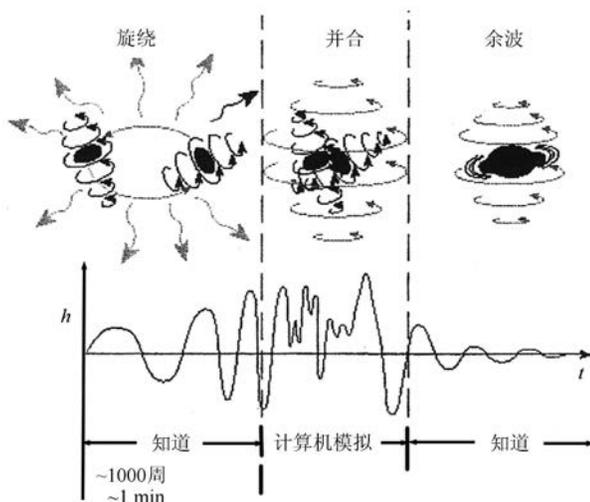


图 6 密近双星并合过程中不同阶段辐射波形示意图

渐从椭圆变成圆形。其引力波的频率也逐渐变大，进入以地球为基地的探测器的测量范围之内。在此阶段，由于引力辐射不断带走轨道能量，旋转轨道不断收缩，引力波幅度增大，频率也不断增高，表现为一种典型的 chirp 信号（振幅不断增大，频率不断提高的连续信号），如图 7 所示。它与双星的质量、间距及轨道的偏心率有关。

（2）并合阶段

当双星的旋转轨道达到最内稳定圆时，两个星体将动态地并合在一起，并合过程的引力辐射是剧烈的，

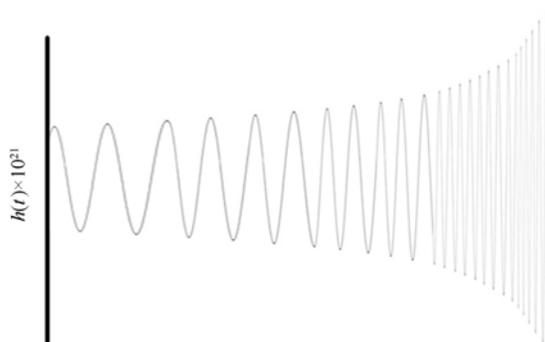


图 7 Chirp 信号示意图

爆发性的与星体的结构和质量密切相关。这时的引力波携带大量与星体内部结构有关的信息，为研究此类天体的性质提供有用的数据。

(3) 余波阶段

当两个星体并合后高速旋转时，其发射的引力波具有“余波”特点，幅度逐渐衰减，它携带着并合体的质量、自旋等信息。

2. 超新星爆发

超新星质量很大，又很致密，在经历非常大的加速而坍缩的过程中，对于II型超新星来说，如果它的核在坍缩时偏离对称轴，将有引力波辐射出来。根据这种引力波的强度和波形特点，可以用来判断这类超新星爆发的尚未清楚的机制。原则上讲，下面在4和5中讨论的模式也在本节范围之内。但是为了突出重点，我们独立列出。

3. 中子星或黑洞形成

当一颗星体的核燃料耗尽时，它将坍缩成一颗中子星或黑洞。探测中子星或黑洞形成过程中辐射的引力波，会对该星体核坍缩的物理过程、跳动及随后发生的振荡提供重要信息。此外，球状星团内黑洞的生成，星系核和类星体内黑洞的生成，星体被黑洞俘获等天文现象都会有爆发性引力辐射产生。引力波探测是发现和研究这类剧烈天体变化过程的最佳方法。

4. 新生中子星的“沸腾”

新诞生的中子星温度可高达 10^9 K量级。其极大的热量可导致中子星内部不稳定，从而使该星核中的物质被拖拽到“中微子气体”中。根据理论估算，这种“沸腾”时间约为0.1 s，导致爆发性引力波产生。

5. 坍缩星核的离心悬起

当一个临近坍缩的星核快速自转时，在尺寸达到中子星的直径之前，可能因为离心作用而悬起，为收缩到中子星的尺度，它将以引力波的形式把轨道能量释放出去。

6. 旋转的致密星体

具有非轴对称质量分布的星体旋转时，会发射连续的引力波，旋转的致密星体如中子星就属此类。质量的非轴对称分布可能来自导致星体变形的极端强磁场，也可能来自星体形成的历史过程中的形变，或者

来自对星体物质的吸积过程。

7. 超大质量黑洞

正在吞噬周围天体的超大质量黑洞($M > 10^5 M_{\odot}$ ， M 为黑洞质量， M_{\odot} 为太阳质量)也是非常好的连续引力波辐射源，但其频率较低，一般为mHz量级。在地球上探测很困难，但恰是太空引力波探测的有力候选者。

8. 随机背景辐射

宇宙中存在着大量的引力波源，连续的和爆发性的。由于数量巨大，分布范围极广，它们发射的引力波相互迭加，形成一种随机背景引力辐射。这种随机背景引力辐射主要由以下三种成分组成：

(1) 数量庞大的密近双星系统辐射的连续引力波

双星系统在宇宙中是广泛存在的，其子星质量、轨道周期、轨道偏心率以及到地球的距离大多数是不相同的，到达地球的引力波的频率成分和强度也各有不同。它们相互叠加形成随机背景引力辐射的一部分。

(2) 黑洞形成前期发射的引力波

质量超过2.4倍太阳质量的主序星在演化后期，恒星星体的简并中子气体向外膨胀的力已经不能抵消恒星星体质量产生的自引力。星体不断坍缩下去，直至变成黑洞。在即将变成黑洞之前，由于存在高密度物质的剧烈的非轴对称运动，导致引力波的产生。它也构成随机背景引力辐射的一部分。

(3) 宇宙大爆炸时的遗迹引力辐射

理论研究表明，引力波是在大爆炸后 10^{-43} s内辐射的(图8)，宇宙大爆炸时产生的引力波遗迹构成随机背景引力辐射的一部分，也是我们最感兴趣的部分。它能给我们带来宇宙最早状态的信息。

六、引力波存在的间接实验证据

引力波存在的间接实验证据是由美国物理学家泰勒(Taylor)和赫尔斯(Hulse)取得的。1974年，他们利用设在波多黎各的射电天文望远镜，发现了脉冲双星PSR1913+16。它是由两颗质量大致与太阳质量相当、相互旋绕的中子星组成。其中一颗已经没有电

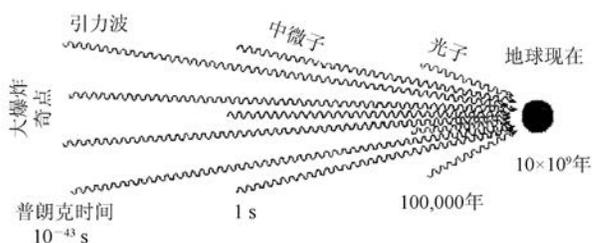


图8 大爆炸发生后各种辐射与物质的分离时间

磁辐射，而另一颗还处在活动期，可以在地球上观测到它发射的射电脉冲。利用观察到的射电脉冲，可精确地获得两颗星在绕其质心公转时其轨道的长半轴及转动周期。通过连续观测，他们发现其轨道的长半轴逐渐变小，绕质心转动的周期逐渐变短。这种变化可以利用广义相对论作很好的解释。

根据广义相对论，当两个质量体绕其质心转动时，由于体系的质量四极矩随时间发生变化，会产生引力辐射。辐射出的引力波带走能量使系统的总能量减小。从而使轨道的长半轴变小，公转周期变短。

泰勒和赫尔斯对 PSR1913+16 连续观测达 14 年之久（图 9）。这是人类得到的第一个引力波存在的间接证据，是对广义相对论引力理论的一大贡献。泰勒和赫尔斯因此荣获 1993 年诺贝尔物理学奖。

在图 9 中，纵坐标表示相对的累积周期变化，单位为秒。取测量开始时周期变化为 0 秒。横轴为测量

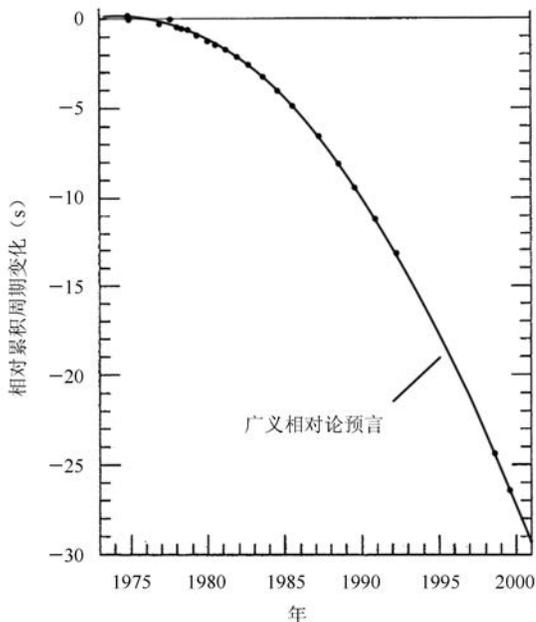


图9 PSR1913+16 转动周期累积移动观测值与广义相对论预言值的比较

时间，单位为年。图中圆点表示测量值，实曲线是根据广义相对论的预言值画出的。可以看出，测量获得的数据与广义相对论的预言符合得很好。

七、引力波探测

早在 1916 年，爱因斯坦就根据弱场近似，预言了引力波的存在。为什么半个多世纪之后引力波的探测才提到日程上来？原因来自理论上的两大困难。首先，引力波的理论最初是同坐标选择有关的，以致无法弄清引力波到底是引力场的固有性质，还是某种虚假的坐标效应。第二，引力波是否从发射源带走能量，也是个十分模糊的问题，这使得引力波探测虚无缥缈，缺乏理论根据。到了 20 世纪 50 年代，同坐标选择无关的引力辐射理论才完成，求出了爱因斯坦真空方程的严格的波动解。20 世纪 60 年代，物理学家通过研究零曲面上的初值问题，严格证明了引力辐射带有能量，检验质量在引力波作用下会发生运动。至此，经过 50 多年的精心研究，两大难题相继攻克，引力波探测有了可靠的理论基础。引力波的直接探测被提到日程上来。

1. 爱因斯坦交响乐

在晴朗的夜晚我们仰望天空，漫天星斗犹如颗颗宝石，镶嵌在浩瀚的宇宙中，发出璀璨的光芒，这是电磁辐射给我们描绘的太空画面。同样，茫茫宇宙中也充满了动听的乐曲，轻柔的和激昂的，高音为主的和低音丰富的，它们构成了奇妙无比的“爱因斯坦交响乐”（图 10），这是引力辐射给我们描绘的太空图像。不过，爱因斯坦交响乐的强度非常之小，远非普通人的耳朵能够听到，正是应了那句话：“此曲只应天上有，人间能有几回闻”。为了欣赏这支美妙的乐曲，科学家们已经奋斗了半个多世纪！

20 世纪 60 年代，美国物理学家韦伯（J.Weber）领导的研究小组建成了世界上第一个引力波探测器——共振棒，标志着引力波直接探测时代的到来。很快在全世界掀起了引力波探测的热潮，几年之内就有 10 多台共振棒引力波探测器建成运转。由于当时达到的灵敏度较低，探测频带很窄，限制了它的应用



图 10 爱因斯坦交响乐

和发展。到了 20 世纪 90 年代，几乎所有的共振棒引力波探测器都关闭了，引力波探测跌入低谷。

激光干涉仪引力波探测器的出现给引力波探测带来突破性进展，由于探测灵敏度高，频带宽度大，表现出广阔的发展前景。很快就取代了共振棒，成为引力波探测的主流设备，给引力波探测带来新的希望，开辟了引力波探测的新时代。

2. 激光干涉仪引力波探测器的工作原理

利用干涉仪进行探测的基本原理在于，比较光在其相互垂直的两臂中度越时所用的时间。当引力波在垂直于干涉仪所在的平面入射时，由于它特殊的偏振特性，使干涉仪的一臂伸长而使另一臂缩短，从而使光束在两臂中度越时所用的时间差发生变化，探测到这种变化就证实引力波的存在。

激光干涉仪引力波探测器的工作原理如图 11 所示。原则上讲，激光干涉仪引力波探测器是一台“变异”的迈克尔逊干涉仪，其相互垂直的两臂各有一个法布里-珀罗腔，并带有光循环镜和其他功能部件。如果不考虑法布里-珀罗腔、循环镜及其他部件的作用，激光干涉仪引力波探测器就可以简化成一台单次往返的迈克尔逊干涉仪。

从激光器发出的一束单色的、频率稳定的激光，在分光镜上被分为强度相等的两束，一束经分光镜反射进入干涉仪的一臂（Y 臂），另一束透过分光镜进入与其垂直的另一臂（X 臂）。

在经历了相同的度越时间之后，两束光返回，并在分光镜上重新相遇，产生干涉。若两束光的度越时间相等（或时间差为光振动周期的整数倍），由于它们之间的相位差为 π ，两束光干涉减弱，输出口是暗条纹，（朝着激光器方向返回的那两束光则是干涉加

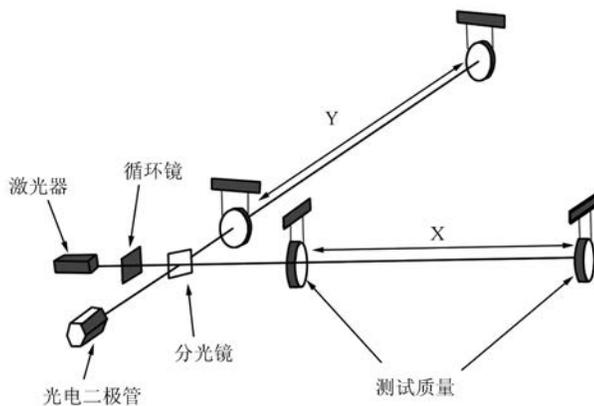


图 11 激光干涉仪引力波探测器工作原理

强，呈亮条纹）。这意味着没有光线进入光探测器，激光干涉仪引力波探测器的输出信号为 0，这是探测器的初始工作状态。

在引力波作用下，由于它独特的极化性质，干涉仪两个臂的长度做相反的变化，即一臂伸长时另一臂相应缩短，从而使两束相干光有了新的光程差，破坏了相干减弱的初始条件，有一定数量的光线进入光探测器，使它有信号输出，该信号的大小正比于引力波的无量纲振幅 h ，探测到这个信号即表明探测到引力波。

设在引力波作用下，两束光在臂中往返一次增加的相位差为 $\Delta\phi$ ，

$$\Delta\phi_{\text{GW}} \approx \frac{2\ell\omega_0}{c} h(t),$$

可以看出，干涉仪的臂长 ℓ 越大，对引力波的响应越强。

3. 世界激光干涉仪引力波探测器网

20 世纪 90 年代，一些大型激光干涉仪引力波探测器在世界各地开始筹建，迅速掀起了引力波探测的新高潮。到了 21 世纪初，几台大型的激光干涉仪

引力波探测器相继建成并投入运转。它们是位于美国路易斯安那州利文斯顿 (Livingston) 臂长为 4 km 的 LIGO (llo)；位于美国华盛顿州汉福德 (Hanford) 臂长为 4 km 的 LIGO (lho)；位于意大利比萨附近，由意大利和法国联合建造的臂长为 3 km 的 VIRGO；位于德国汉诺威 (Hannover) 由英国和德国联合建造的臂长为 600 m 的 GEO，位于日本东京国家天文台臂长为 300 m 的 TAMA300。(图 12) 在澳大利亚，也建造了南半球唯一的一台小型激光干涉仪，并用它进行了大量的探测器基础研究，取得了很好的成绩。印度也与 LIGO 合作正在积极筹建一台臂长为 4 km 的大型干涉仪。与此同时，第一代激光干涉仪引力波探测器

器的升级改进，如高级 VIRGO，高级 LIGO 和 GEO-HF 也在加紧实施。而太空引力波探测器 eLISA 和地下干涉仪 KAGRA 的研发与建设也在紧锣密鼓地进行。

当前激光干涉仪引力波探测器的灵敏度为 10^{-22} ，达到了预定的精度，频带宽度为几十赫兹到几千赫兹。激光干涉仪引力波探测器的灵敏度曲线如图 13 所示。

在图 13 中，纵坐标为应变灵敏度 $h(f)/\sqrt{\text{Hz}}$ ，横坐标为探测频率。实曲线为设计灵敏度曲线。可以看出，在一定频带内灵敏度已经好于 10^{-22} 。

为了提高引力波探测的可靠性，有效地甄别虚假信号，更精确地测定引力波天体源的位置，分析引力波天体源的结构和性质，世界各大引力波探测器已经



图 12 (a) 位于美国路易斯安那州利文斯顿附近的臂长 4 km 的激光干涉仪引力波探测器 LIGO (llo)



图 12 (b) 位于美国华盛顿州汉福德附近的臂长 4 km 的激光干涉仪引力波探测器 LIGO (lho)



图 12 (c) 位于意大利比萨附近，由意大利和法国联合建造的臂长为 3 km 的激光干涉仪引力波探测器 VIRGO

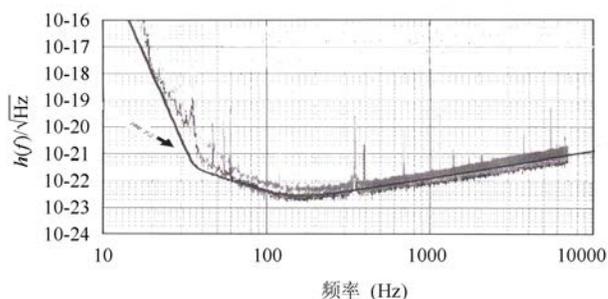


图 13 激光干涉仪引力波探测器 LIGO 的灵敏度曲线

联合起来，相互合作，同时运转，形成了一个庞大的引力波探网（图 14）。

4. 第二代和第三代激光干涉仪引力波探测器

在激光干涉仪引力波探测器的发展过程中，人们一般把 21 世纪初建成的 LIGO (llo)，LIGO (lho)，VIRGO，GEO600，TAMA300 等称为“初级探测器”，连同其后小步升级改造而成的“加强 LIGO”和“VIRGO+”统称为第一代激光干涉仪引力波探测器，应变灵敏度的设计指标为 10^{-22} 量级。其基本目标是使灵敏度达到设计值，从而验证利用激光干涉仪来探测引力波在原理上是正确的（这个目标实现了），当然也期望能够直接探测到引力波（可惜没有做到）。

第一代激光干涉仪引力波探测器完成之后，世界各大实验室都在采用新材料、新技术对它们进行大规模升级改造，研发第二代引力波探测器，它们就是目前正在建造中的高级 LIGO，高级 VIRGO 和 GEO-HF，应变灵敏度的设计值比第一代探测器提高一个数量级左右。例如，高级 LIGO 的设计灵敏度在一定频率范围内，甚至突破标准量子极限 10^{-24} 。相对于第一代的“初级探测器”它们又被称为“高级探测器”。第二代激光干涉仪引力波探测器的核心目标是直接探测到引力波，实现零的突破。当然，如有可能，也开展力所能及的天文学研究。

现在正热议中的爱因斯坦引力波望远镜（Einstein Telescope），设计灵敏度比第二代干涉仪又提高一个数量级，被称为第三代激光干涉仪引力波探测器。它由三个干涉仪组成，臂长 10 km，两臂之间的夹角为 60° ，中心分别位于一个等边三角形的三个顶点上，三条隧道组成三角形的三条边，安放干涉仪的臂。

爱因斯坦引力波望远镜将建在 100 ~ 200 m 深的地下，并采用低温技术。第三代激光干涉仪引力波探测器的核心目标是建设“引力波天文台”，开展天体



图 14 世界各大洲激光干涉仪引力波探测器的分布
（图中共振棒引力探测器在 21 世纪初已陆续停止运行了）

物理、宇宙学、广义相对论等引力波天文学研究。

5. 空间和地下激光干涉仪引力波探测器

为了降低噪声，提高探测灵敏度，将探测频率向低频方向扩展，可以把激光干涉仪引力波探测器建在太空或地下，这就是正在筹建中的 eLISA 和 KAGRA。空间引力波探测器的优点有以下几点：

- (1) 没有地面震动噪声的干扰
- (2) 周围环境的热稳定性好
- (3) 工作在高真空环境中
- (4) 没有以地球为基地的引力波探测器所遇到的地域球面效应，干涉仪的臂可以做得很长。

低噪声环境和大的臂长使空间引力波探测器在非常低的频率和非常大的位移状态下探测引力波应变信号。

例如，若空间激光干涉仪引力波探测器的臂长为 10^9 m，对无量纲振幅为 10^{-21} 的引力波信号来说，位移量可达 10^{-12} m。而对臂长为 4 km 的陆基引力波探测器 LIGO 来说，相应的位移量仅为 10^{-19} m，相差 7 个数量级，空间干涉仪极大地增加了探测到引力波的可能性。

KAGRA 是一台正在筹建中的大型地下激光干涉仪引力波探测器，臂长为 3 km，位于日本的神冈，建在 300 多米深的地下，激光功率为 150 W，测试质量所用的材料为蓝宝石且工作在低温环境中。由于建在地下，大大减小了牛顿引力梯度噪声，地面震动噪声也能有效地压低。低温条件，可使测试质量的热噪声降低约一个数量级。通过这些措施，KAGRA 的灵敏度得到大幅度提高，甚至能与高级 LIGO 相比拟。

八、结束语

引力波是爱因斯坦“广义相对论”最重要的预言，引力波探测是当代物理学重要的前沿领域之一。20 世纪 60 年代中期以来，引力波探测取得了长足的进步。特别是激光干涉仪引力波探测器的出现，给引力波探测带来突破性进展。多年以来，很多国家如美国、德国、英国、法国、意大利、日本、澳大利亚、印度等都投入大量的人力物力进行研发，在世界范围内迅速掀起了引力波探测的新高潮。到了 21 世纪初，几台大型的激光干涉仪引力波探测器相继建成并投入运转，探测灵敏度在短短几年之内也提高了近 4 个数量级，达到 10^{-22} ，显示了广阔的发展前景。当前，以大量新技术、新工艺、新材料为支撑的第二代激光干涉仪引力波探测器正在紧张的建造，灵敏度直指 10^{-23} 。而灵敏度为 10^{-24} 的第三代激光干涉仪引力波探测器（如爱因斯坦引力波望远镜）也开始筹划。笔者认为，在不久的将来，比如说，第二代探测器建成并运行 1 到 2 年之内，人类将看到引力波探测的第一道曙光，而以第三代引力波探测器为基础的引力波天文台的建立，必将迎来一门崭新的交叉科学——引力波天文学蓬勃发展的新时代。

作者简介

王运永，北京师范大学天文系教授。朱宗宏，北京师范大学教授，教育部长江学者特聘教授。R. 迪萨沃 (R. Desalvo)，美籍意大利物理学家，圣尼奥大学教授。



科苑快讯

机器读梦

听起来似乎是科幻小说，但是日本京都市国立信息与通信技术科学研究所 (National Institute of Science of Information and Communications Technology) 的神谷之康 (Yukiyasu Kamitani) 和同事确实做到了读懂梦境。一些志愿者睡眠时的大脑活动受到功能核磁共振设备的监控，当脑电信号提示研究者志愿者“看到”什么东西时将被叫醒。通过询问志愿者的梦境，研究者将

其与大脑活动之间建立对应关系，这样就能预报出人类的 20 大类梦境。精确度约为 60%，这当然远超碰运气才能到达的概率。

不过，对于研究者看到的是志愿者的梦境还是他们的入睡前幻觉，目前仍存在争论。但是，这毕竟是在通过脑活动模式读取人类思维的研究方面前进了一步。

(高凌云编译自 2013 年 5 月 22 日《欧洲核子中心快报》)