

引力波与引力波探测

李芳昱 张显洪



一、引力波探测的主要背景

引力波是爱因斯坦和其他物理学家提出的关于广义相对论的四大预言之一,未来在引力波探测的研究中所获得的突破,将可能比其他预言产生更为巨大而深远的影响,甚至大大促进人类文明的进程。1916年爱因斯坦发表了他的广义相对论,并在该理论的基础上预言了引力波的存在。到目前为止,广义相对论一些重大预言都被实验证实了,它们包括水星近日点的进动、光线在引力场中的弯曲、光谱线在引力场中的频移,以及由此而延伸的关于雷达回波的延迟等。这些成果又进一步推进了相对论在天文观测、相对论天体物理、宇宙学甚至高能物理和广义相对论的交叉领域等方面的应用。此外,广义相对论还预言了黑洞的存在,随着近些年来科学技术和观测手段的迅速发展,黑洞的存在及其物理效应也在多方面露出端倪。而引力波至今还没有获得直接探测的认证,除了对脉冲双星 PSR1913+16 辐射阻尼提供了引力波存在的一个间接证据外(该成果获得了 1993 年诺贝尔物理学奖),引力波的直接检验可以说还没有获得真正的突破。广义相对论的其他验证,可以说大多数是在静态或准静态的。当然,由于爱因斯坦引力场方程的高度非线性特征,在强引力场的情况下,即使是在静态引力场,也是非线性引力效应。而引力波则是一个非静态的引力效应,而强引力辐射既是非静态又是非线性的引力效应,加之引力作用的微弱性和不可屏蔽性,这无论在理论上还是在实验观测上都带来了很大的困难。因此,人们对引力波的研究经历了一个漫长而艰苦的过程。上个世纪 50~60 年代,由于关于引力波的一系列重大理论问题的相继解决,使得引力波的存在已在物理学界形成了共识。由此才使对引力波的探测从纯粹的理论研究开始步入实验观测阶段。

二、引力波源和引力波探测的现状

理论研究表明,引力波是横波,以光速传播。由于它的高度非线性,它不具有像电磁波、机械波的反射、干涉、衍射等性质,也不满足叠加原理。它的作用

截面非常小,穿透能力非常强。它能穿越时空穿透地球。因此它能携带古老而遥

远的信息,但它又是非常微弱的。因而探测引力波首先必须对引力波源进行分析。许多科学家对引力波进行了富有成效的理论考察,迄今为止,认为可能的引力波源可分为两大类,天体引力波源和实验室(人工)引力波源。前者包括三类:连续源、爆炸源和随机源;实验室引力波源虽然早在上世纪 60 年代曾被韦伯(Weber)提出,但直至近几年来,由于相关技术的迅速发展,才导致它又成为理论和实验研究的热点。

在 1918 年,即在建立引力场方程不久,爱因斯坦就得到了引力场方程的近似波动解,从而在理论上预言了引力波的存在。而具有周期性变化质量四极矩的物质系统会发出连续引力波。宇宙中质量四极矩会产生周期性变化的天体有双星系统、旋转致密星体、非径向对称振动的致密星体。在众多的天体连续引力波源中,双星系统的运动状态是最为稳定的。双星引力辐射使双星系统的引力能量减少,结果是轨道周期、长半轴和偏心率均变小。由此可以很容易测出轨道周期及其他一些运动学参数。这些参数除了用作天体物理研究以外,还可以用作广义相对论引力辐射性质的间接检测。

旋转致密星体是另一类相当确定的连续引力波源。具有非轴对称质量分布的天体旋转时,就有引力辐射。由于引力辐射和无量纲振幅正比于星体自旋频率的平方,寻找高速旋转的致密星体无疑对引力波探测研究是有利的。估计旋转致密星体的引力辐射强度的结果往往带有一定的主观随意性,这些主观随意性,一是来自计算所采用的物理模型,二是来自旋转星体椭圆率的估计。

此外,星体的非球对称振幅也会辐射连续引力波,比如太阳就有各种不同类型的非球对称振动模式。理论上,这种非球对称振动模式对于其他致密星

体也应该存在。但由于我们对致密星体振动了解甚少,目前还难以对它们引力辐射的性质做出合理的估计。与天体连续引力波源相反,具有非周期性变化质量四极矩的物质系统会发射非连续引力波,即爆发引力波,或称脉冲引力波。宇宙中会产生这种非周期性变化质量四极矩的天体事件有超新星爆发和坍缩、球状星团内黑洞的生成、星系核和类星体内黑洞和生成、致密双星坍缩、星体被黑洞俘获、中子星核振动等。这些天体物理事件称为天体爆发引力波源。

天体爆发引力波源出现的时间、出现的方位有很大的随机性,它的运动的方式和持续时间彼此之间存在着很大的差异。由于这些爆发事件几乎都是一次性的,不会重复出现,使得我们难以对这些事件有一个准确的认识。

对天体爆发引力波源的分析大多基于一些基本的理论模型。这些理论的假设一般包括引力辐射总能量和假设、引力辐射功率的假设,以及爆发时间的假设等。

与天体连续引力波源相比,天体爆发引力波源的出现有很大的随机性,对它们辐射性质的分析亦有很大的主观随意性。这种主观随意性主要表现在物理模型的建立,对引力辐射功率谱的假设和转化因子的估计上。因此,随着人类对宇宙认识的深入,关于天体爆发引力波源的某些结论可能会被不断地修正。

除了在银河系的星系中的个别天体引力波源,包括比较确定的天体连续引力波源和在时间和方位上都具有随机性的天体爆发引力波源已被研究得较为清楚外,在全宇宙中还有大量的引力波源。这些引力波源由于数量巨大,在全天区的径向分布和角向分布都十分分散,难以对它们各自的引力辐射性质加以区分和估计。这些天体引力波源辐射的连续引力波和爆发性引力波相互叠加形成了一种随机背景引力辐射。形成这种随机背景引力辐射的主要机制有两种。一是数量庞大的密集双星系统辐射的连续引力波;另一种主要机制是黑洞形成前期的引力波。针对大爆炸宇宙模型中的均匀性、视界困难,以及大爆炸理论本身不能解决时空爆炸的奇点的起源问题,科学家们分别1981、1982和1983年提出了暴胀宇宙模型、暴胀宇宙模型修正方案和混沌暴胀宇宙模型。按照这

种模型,当宇宙处于 $10^{-35}\sim 10^{-32}$ 秒间,宇宙经历过一个急剧的膨胀阶段。在这段时间内,宇宙的尺度增长了 $10^{50}\sim 10^{60}$ 个数量级。近年来,人们运用精质暴胀宇宙模型对天文观测数据进行分析表明,在 10^9Hz 频段附近应有一个对应宇宙急剧膨胀阶段的遗迹引力波(Relic Gravitational Waves)峰值区。如果理论分析正确,在引力背景辐射中就应该包括这一部分。很长一段时间,人们认为几乎不可能在实验室产生引力波。直到现在,虽然没有能够在实验室产生可供观测的引力波,但理论研究却是热点。

其次,在引力波探测方面,也有一大批人为之付出了艰辛的努力,并取得了丰硕的成果,到现在为止,可能的探测方法可分为三种。

第一种是利用引力波的潮汐效应,即在引力波作用下两个质点之间的距离会发生微小变化。例如利用引力波天线或利用激光测量两个质点之间距离的变化。实验上探测引力波的先驱工作,是美国马里兰大学韦伯在实验室建成的第一个引力波探测器。它是一个重1.4吨的铝棒。引力波使铝棒周期性的伸长缩短,固定在棒上的压电晶体将记录下这种振动。人们从引力波的潮汐效应计算出它在该探测器上引起的应变,在原则上是可以被探测的。1969年韦伯公布了他们研究小组的实验数据,并宣称探测到了振幅达 $h\approx 10^{-15}$ 的在kHz频带的引力波。但韦伯的研究结果始终未能被重复验证,后来其他一些精度远高于韦伯棒的实验小组均未发现韦伯宣称的引力波信号,而且还由于找不到合适的理论模型来解释韦伯的结果,所以科学家一般认为,韦伯得到的信号并非来自宇宙的引力波,而仅是噪声而已。尽管如此,韦伯的工作却成了世界各地开展引力波探测工作的先导。70年代以后,世界各地10多个小组开展了这方面的工作,除了按照韦伯棒原形而改进的低温引力波天线外,还有大型的激光干涉引力波观测站,以及拟议中的空间激光干涉引力波观测站,它们在检测精度上所达到的先进水平已得到人们的公认。激光干涉引力波探测器的基本原理,即人们熟悉的迈克尔逊(Michelson)干涉仪,但其臂长要长得多。而且采用了激光技术和多次反应效应,这样使两个臂长的相干光合成后的干涉条纹显示的检测精度,远高于通常的迈克尔逊干涉仪。在引力波的作用下,光电转换器接收到的从两个光臂上来的光束的

位相差就会变化,其臂长越长,能探测到的相位差就越大。

目前世界上正在运行的激光干涉引力波观测站有:美国路易斯安那州利文斯敦的一台,其臂长为4千米。另外为美国华盛顿州的两台,其臂长分别为4千米和2千米,它们的英文名字为LIGO,即Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory的缩写。其峰值灵敏度为 3×10^{-23} (180Hz)。法国和意大利在比萨建立臂长为3千米的激光干涉引力波天线(简称为VIRGO),其峰值为 10^{-22} (500Hz)。德国和英国在汉诺威建成的臂长为600米的激光干涉引力波天线(简称为GEO600),由于采用了最为先进的干涉仪,尽管其臂长小于LIGO和VIRGO,但其峰值灵敏度仍可达 8×10^{-23} (600Hz)。日本东京大学所建成的臂长为300米的激光干涉引力波天线,简称为TAMA300。由于采用了低温技术,其峰值灵敏度为 5×10^{-21} (700–1000Hz)。事实上,由于激光干涉仪的两臂中的相干光来回反射,因而其有效臂长比其几何尺度大得多。例如,在LIGO的每一条光臂中的激光束要来回反射100次左右,从而使其有效臂长延伸到400千米左右。为了避免地面探测中所遇到的地面振动噪声、电磁噪声以及地球本身引力场和引力梯度的影响,并期望探测宇宙中可能存在的大量的低频引力波(其频率成分在1Hz以下),美国航天局(NASA)和欧洲空间局(ESA)已计划在2011年发射3颗携带激光的卫星,这些卫星将构成一个边长为500万千米(相当于地月距离10倍以上)的等边三角形。探测频带主要在 10^{-4} Hz范围的低频引力波。这实际上是一个臂长为500万千米的激光干涉仪,这就形成了一个空间干涉的天线阵列,因其灵敏度也将提高许多倍;这称为激光干涉空间引力波天线(Laser Interferometer Space Antenna,其缩写为LISA)。由于LISA处在一个高真空而远离地球的环境,因而它避免了由于地球的多种环境噪声所造成的影响。LISA最可能探测到的将是星系中质量极大(相当于100万甚至10亿个太阳的质量)的黑洞相互旋转运动时发出的低频引力波。

此外,我国目前已在酝酿的ASTROD(意指用光

学装置进行相对论天体动力学的空间检测)计划。也是一个小型的空间激光干涉引力波探测方案,其探测频率为 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ Hz的低频段。由于ASTROD只须发射两个飞船分别在地球公转轨道两侧的两个轨道上,所以它比LISA的成本和规模要小得多。但因与LISA分析信号的方法和探测的频带有所不同,所以它与LISA计划有一定互补性。

第二种探测引力波的方法是测量系统因辐射引力波所带来的能量损失,这种方法属于间接方法。根据广义相对论,双星系统是一种旋转着的质量四极矩,它应能以辐射引力波的方式辐射能量。与所有束缚在一起的二体引力系统一样,其运行轨道周期将随着能量的辐射而减少。20世纪60~70年代,天文学以及天体物理学的进展表明,某些天体有可能辐射强大功率的引力波。要使这些天体产生的物理效应能被测量,至少应满足两个条件:轨道非常小(两子星足够近),以使广义相对论效应尽量明显;有一种精度很高的轨道周期测量方法。泰勒(Taylor)和赫尔斯(Hulse)在1974年发现的脉冲双星*PSR1913+16正好满足这些条件。该双星的两子星的最大距离只有 10^{11} cm的量级(约一个太阳半径),一个子星为脉冲星则使以上条件得以满足:由于脉冲星所发脉冲的周期被誉为“钟一般的准确”,泰勒及其合作者们便能以异常高的精度观测,从而推算出轨道周期变化率。经过4年来上千次的观测,他们于1978年宣布了对轨道周期变化率的观测结果,与线性引力论的四极辐射公式计算的理论值吻合得很好。这是引力波理论提出60年来关于引力波携带能量的第一个定量观测证据。虽然只是间接证据。他们后来又对这一脉冲双星继续观测并取得进展,终于获得了1993年诺贝尔物理奖。

第三种探测引力波的方法是引力波的电磁响应,其原理是引力波与电磁波发生相互作用后,会产生一些平直时空中没有的新的物理行为(如传播方向、极化方式、分布和位相等),该方法目前在理论上非常热门,已经有不少实验室正在准备进行实验。

在第三种方法中,目前理论上最关注的是利用实验条件在实验室产生和引力波相互作用的电磁场,从而检测引力波的存在(包括天体源和实验源)。

* 脉冲双星(binary pulsar)是指一个子星为脉冲星的双星,PSR是脉冲星的识别符,1913和+16分别代表它的赤经和赤纬(角度坐标)。

然而,由于引力波振幅非常小,而且和电磁场的作用截面也非常小,并且早些时候的计算表明,引力波与电磁场的相互作用与磁分量的强度,作用区域成正比。但由于实验条件的限制,强电磁场和大的作用区域受到很大的限制,为此,许多科学工作者考虑了很多巧妙的方法以提高探测的可能性,比如葛瑞斯确克(Grishchuk)等考虑用腔量子电动力学的方案来获得更大的扰动效果,重庆大学引力波研究组在采用高斯束和静磁场结合获得引力波谐振,得到了迄今为止在实验室探测引力波(特别是高频区域)方面最好的效果。

三、新的动向和发展趋势

下一代激光干涉引力波探测器 目前精度最高的 LIGO 的探测峰值设计精度为 10^{-23} ,即使能达到这一精度,按照比较公认的看法是,观测到引力波的几率也不会超过 50%。计划到 2006 年完成的改进后的 LIGO 的精度将有进一步的提高,其激光器的功率将从 10 瓦增加到 180 瓦,11 千克重的二氧化硅玻璃反射镜也将被 30 千克的蓝宝石晶体代替,这些改进使其灵敏度提高工作效率 20 倍,由于在这一过程中采用了量子无破损检测技术,从而其检测精度可望达到测不准原理所允许的量子极限的两倍。另外,日本也将计划 TAMA300 的干涉仪臂长由现在的 300 米扩展到 3 千米,并将建造在神冈矿井的地下深处。加之采用超冷却蓝宝石反射镜,在探测频

率低于 40Hz 时,其灵敏度可达到与第二代 LIGO 媲美的水平。

激光干涉空间引力波天线 即上面提到的美国 NASA 和欧洲 ESA 的 LISA 计划和我国拟议中的 ASTROD 计划;科学家们正在为实现这些计划而努力工作。

高频遗迹引力波和新的探测方案 前面得到的探测引力波的频率均在千赫兹和更低的范围,这是一般天体运动引力辐射所确定的范围。然而近年来精质暴宇宙模型 (quintessential inflationary modes) 预期了峰值在 10^9Hz 的高频遗迹引力波,且振幅量级可达 10^{-30} ,从而成为电磁探测的最佳窗口。特别是由于超强场物理超导量子流体、高 Q 值超导微波腔、纳米技术、高能实验室天体物理迅速发展,为上述高频引力波的探测提供了技术上的可能性。目前英国的伯明翰大学建成的波环形波导和瑞典天体物理中心建成的双球形超导耦合微波腔,正是针对上述高频引力波的探测而设计的。当然,由于遗迹引力波的随机性质,它比单色连续引力波的探测要更为困难。但可以肯定地说,以上探测窗口将和传统的探测方案形成很好的互补性。虽然,人类在探索引力波方面做了一些工作,并且取得了一定的成绩;但探测引力波的道路是非常艰辛和遥远的;而且我们坚信引力波的神秘面纱最终会被人类揭开。

(重庆大学理论物理研究所 400044)

科苑快讯

激光技术使火星数据传输速度提高 10 倍

美国宇航局打算在 2009 年向火星发射火星探测器 (Mars Telecommunications Orbiter),该探测器将首次装备远距离通讯激光装置。美国宇航局科学家声称,利用红外激光可以使从火星轨道向地球传输数据速度比现有传送器快 10 倍甚至百倍。

新装置通信能力达到每秒 1 兆~3 兆比特,可以满足从火星或更遥远行星与地球之间的通话,而现在科学家不能获得火星探测器或火星车大部分信息,正是由于受到通讯线路通信能力的限制。确实,利用激光束作为通信线路也有缺点,它会受到云团的阻碍。计划作者打算通过在世界各地架

设几台望远镜来克服这一缺点,由口径从 0.8~5 米的望远镜来接收信号。比如,火星探测器上一台 0.3 米口径望远镜发出的激光束,能十分准确地瞄准地球上目标,如果是现有火星探测器发出的无线电波束,则会"覆盖"整个地球,而在同样距离上的激光束抵达地球后只是直径为几百千米的"斑点"。另一方面,这会使接收原本非常微弱的激光信号变得异常困难,为了记录到微弱激光信号,工程师正在研制一种新型光接收器,它们的灵敏度比目前使用的光接收器更高。

在火星探测器上仍将安装无线电设备,该卫星将成为第一颗另一行星的太空探测器,不仅可以用于科学研究,也可以用作转发器,它将在未来轨道探测器与着陆器之间建立通讯,同时也可以火星车与地球之间建立通讯。

(周道其译自《乌克兰新闻时报》2004/10/10)