

引力波探测的现状和意义

王海英

(华北电力大学应用物理系 保定 071003)

引力波是广义相对论的一个理论预言。1916年爱因斯坦创立广义相对论,揭示了一个全新的时空观念:时间和空间并非绝对和独立地存在,它们是相互联系的,由物质分布和运动所决定的属性。在时空中运动的物质,其轨迹由时空曲率决定。这种时空结构的几何化概念,对引力的本质提出全新的解释,是一种新的引力理论。

一、引力波是变化着的4维时空曲率的传播

物质的引力场是一种无需介质的广延场,与电磁场相类比:电荷的加速运动能辐射电磁波,那么,理论上物质的运动也辐射引力波。爱因斯坦在引力场方程的弱场近似解中得到平面引力波辐射的结论。近代其他引力理论也得出存在引力波的预言。

爱因斯坦还给出了引力波的定量计算,结果表明:相同质量的体系,其分布的不对称性愈高,变化的速率愈大,辐射出的电磁波则愈强。物质决定时空曲率,引力波则是变化着的时空曲率的传播,它叠加于“静态”时空之上从而动态地影响了局域的时空曲率。相对论认为任意两点的距离都由“时空间隔”来表示,在慢变情况下,时空间隔近似为空间间隔。引力波引起的时空曲率的改变可由测量空间间隔的改变而得到反映,这是当前引力波探测的依据。

爱因斯坦还同时给出引力波的传播速度和偏振性质,这些性质也可以通过引力波探测得到检验。

二、目前两类主要的引力波探测器

1969年美国的韦伯(J. Weber)在《物理评论快报》发表了一篇文章,称他已测得“不能排除是来自银河中心”的引力波讯号。尽管这一结果未能为其他同类研究所证实。但是,他的工作开创了实验检测引力波的先河,更多的人投入这一研究之中。

但是,40年过去了,还没有探测到引力波。原因在哪儿呢?理论预期较强的引力波能使相距1m的两点产生的距离相对变化为 10^{-22} ,这是人类至今仍未达到的空间分辨水平。更为主要的问题是:任何距离的变化,都要通过仪器和传感元件去测量。而这些仪器和元件都有“噪声”。同时,设置环境的噪声也会影响测量的结果。这两种噪声尤其是前者

(内部噪声)的消减是非常困难的课题。近数十年的引力波探测研究,主要仍集中在如何克服噪声的影响上。

目前用于引力波探测的主要是以下两类探测器。

韦伯式探测器。它的接收天线是一根高 Q 值(低内耗)的铝合金棒,引力波引起棒的振动,并以其共振频率维持其振动。机电换能器(如压电陶瓷)将检拾此振动讯号并被后续放大器所放大。韦伯的铝天线是在室温下工作的。后来,一些国家的实验室陆续研制出超低温(10^{-2} K)天线,预期灵敏度可在 10^{-21} 水平。

韦伯式探测器利用天线棒的共振性质,提高了检测的灵敏度,却限制了检测的带宽。而且棒的尺寸限制它只能工作在引力波的高频段($\sim 1000\text{Hz}$),只有像超新星爆发这类比较罕见的突发事件才产生这个频段的引力波,而且它的中心频率也不一定正好在棒的共振频率上,因而这实质是一种“守株待兔”式的探测。由于长期维持超低温环境的困难,更由于这种测量方法的局限性,预计这种探测器的发展将受到限制。

激光引力波探测器。这种探测器的发展与韦伯式探测器几乎是同步的。其基本原理与传统的迈克尔逊干涉仪相同,两个相互垂直的光臂受引力波的作用。由于引力波的偏振性质,两光臂将产生不同的距离改变,并通过干涉条纹的移动反映出来。干涉仪的分辨率取决于光臂长。最好选用等于引力波波长的 $\frac{1}{2}$ 为光臂长。光臂必须保持高度真空,长的光臂需要大的投资,实际上采用光在光臂两端多次反射的取得要求的光程。假设引力波频率为 1000Hz ,则波长为 300km 。要建成长度各为 75km 的互相垂直的光臂显然是困难的。但如果反射10次,就可把光臂缩小至 $1/20$ 。即约为 $3\sim 4\text{km}$ 的距离,这就容易多了。目前,已有一些国家正投入巨资联手共建这种 $3\sim 4\text{km}$ 臂长的激光引力波探测器。

对激光引力波探测器来说,光源噪声是主要的

现代物理知识

她用物理的情趣,引我们科苑揽胜; 她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿, 欢迎订阅

2002年的《现代物理知识》,继续设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯共8个栏目。欢迎大家向这些栏目踊跃投稿。恳请大家注意如下几点:稿件请用方格稿纸誊写,用微机打印的则请单面打印并留1.5倍的行距;外国人名地名,请译成中文,有必要保留外文名称时则在文中首次出现时将外文用括号括在中译名后面,图表中的外文也尽可能地译成中文;文稿中的插图最好单独成页,并在文稿中的相应位置标上插图的编号;文稿无需附“摘要”和“关键词”等,一般也无需附“参考文献”,只需附上英文题目和作者的英文姓名;请注意语言规范,例如,“其它”一律改为“其他”,“公里”改为“千米”,“公斤”改为“千克”,数字和百分数尽量采用阿拉伯数字,除了书刊名称用书名号外,一般文章的题目则用引号。

《现代物理知识》的读者对象颇为广泛,有科学工作者、教育工作者、科学管理干部、大学生、中学生和其他物理学爱好者。欢迎各界人士继续订阅!

在邮局漏订或需要过去杂志的读者,请按下列价格汇款到《现代物理知识》编辑部(100039,北京918信箱现编部)补订。1992年合订本,18元;1993年合订本,18元;1995年合订本,22元;1996年合订本,26元;1993年增刊,8元;1994年增刊,8元;1994年附加增刊合订本,36元;1996年增刊,15元;1997年合订本,30元;1998年合订本,32元;1999年合订本已售完,尚有1、4、5、6期单行本,每本3元;2000年附加增刊合订本,38元;2000年增刊,10元;2001年合订本,48元;2002年每期7元,全年42元;《微观绝唱:量子物理学》、《睿智神工:基本粒子探测》(《诺贝尔奖百年鉴》丛书中的两本,上海科技教育出版社2001年出版),每本10元。以上所列,均含邮资或免邮资。

内部噪声。特别是光的量子噪声,抑制这些噪声需要稳定、单色大功率连续输出的激光源。近年来发展的钕铝石榴石固态激光器将以其大功率、高效率的优异特性成为主要的应用光源。

激光引力波探测器是非共振式接收器,有较宽的工作频带。对重现脉冲引力波形十分有利。此外,还因工作在常温下而减少维持环境温度的困难。由于地面振动的限制,上述探测器的探测频率下限为10Hz。近来,欧洲宇航局正计划建立一个由4个地球卫星组成的空间激光探测器,其引力波频率下限将达到 10^{-2} Hz。我们正拭目以待。

三、引力波探测的意义及前景

人类观测宇宙的手段,几乎都是接受来自天体的电磁辐射。对于那些缺乏电磁辐射的“暗”天体,人们就会视而不见,引力波探测却可弥补这一缺陷。

黑洞不辐射电磁波,而它们的产生和碰撞都将辐射出强烈的引力波。历史上每一新的探测工具的使用,都伴随着重大的天文学发现。可以预期,由于

引力波携带着天体运动的大量原始信息,引力波探测也将在宇宙观测上有新的发现,引力波探测器将成为研究天体物理学的有力工具。

同时,引力波探测对人类认识自然也有重要作用。从物理学看,既然各种引力理论都预言了引力波的存在,并赋予它不同的特征。那么引力波探测的结果将有助于区分理论的正确与否,从而推动理论研究的发展。对引力波性质的深入了解,有助于引力场量子化的理论研究,从而为大统一理论做出贡献。

综上所述,更多的引力波讯号的获得将极大地开阔人类的宇宙视野,对获得的引力波讯号特性的分析将促进人类对引力本质的认识。人类一旦掌握了引力波,所导致的社会效应将可与人类掌握电磁波相类比。由于引力波具有极强的穿透能力,作为宇宙间的通讯工具将具有无与伦比的优势,科学家们在这方面已建立起良好的合作关系,新的突破,将是共同努力的结晶,这也是引力波探测的前景和未来。