



捕捉引力波

柯惟力

(江苏广播电视大学基础部 南京 210013)

一、足够精确的 牛顿引力理论

在宏观物理世界中,引力是一种主要的作用。太阳东升西坠,地球四季交替,海水潮涨潮落,众多自然现象都受到引力的支配。1687年,牛顿在前人的研究基础上,导出了万有引力定律。利用万有引力定律可以圆满地解释哥白尼的学说和开普勒的行星运动三定律。牛顿引力理论的精彩之处还有准确地预言了海王星和冥王星的存在,指导天文学家成功地发现了这两颗太阳系行星。

按牛顿的引力理论,两物体间的引力作用是瞬间完成的。但爱因斯坦认为,光速是任何作用的极限速度,因此引力作用不可能在瞬间实现。1905年,爱因斯坦发表著名的历史文献《论动体的电动力学》,建立了狭义相对论。在以后的十余年间,爱因斯坦进一步考虑引力作用,建立了广义相对论。爱因斯坦同时指出可以利用三个实验来验证广义相对论。第一个是水星近日点的进动,困扰了天文学家多年的难题,用广义相对论去讨论几乎是迎刃而解。第二个是光线在引力场的弯曲偏转,爱因斯坦建议观察日全食时的天文现象。1919年英国皇家科学学会派出的日全食观测队远征南半球,观测结果与广义相对论的预言吻合。虽然第三个引力红移的实

验由于测量手段的限制,多年后才实现。爱因斯坦已因日全食观测结果的公布而声名鹊起,誉满全球,由此奠定20世纪最伟大的自然科学家的基础。

不过在20世纪上半叶,对于人们研究的绝大多数天文现象,牛顿的引力理论已经可以给出足够精确的解释。广义相对论仅仅给出一个与 $2GM/c^2R$ 有关的无量纲的修正项,来表征引力场的强弱。表1给出典型星体的 $2GM/c^2R$ 的值,这里 G 是牛顿引力常数, M 是星体的质量, R 是星体的半径。很明显,对人们熟悉的月球、地球、太阳而言,在引力最强的星体表面,修正值 $2GM/c^2R$ 只有 $10^{-10} \sim 10^{-6}$,微不足道。对当时已知的密度高达 $10^9 \sim 10^{12} \text{kg/m}^3$ 的最稠密星体——白矮星,修正值也仅有 10^{-3} 左右,似乎不用广义相对论去讨论也行。

表1 典型星体的 $2GM/c^2R$ 值

星体	M (kg)	R (m)	$2GM/c^2R$
月球	7.35×10^{22}	1.74×10^6	10^{-10}
地球	5.98×10^{24}	6.38×10^6	10^{-9}
太阳	1.99×10^{30}	6.96×10^8	10^{-6}
白矮星	10^{30}	10^6	10^{-3}
中子星	10^{30}	10^4	10^{-1}

直到20世纪60年代之后发现脉冲星(后来人们证明脉冲星就是中子星),特别是1974年霍尔斯(R. A. Hulse)和泰勒(J. H. Taylor)发现中子星PSR1913+16,其密度数量级达 10^{18}kg/m^3 ,直径只有

精密核分析

低本底材料的开发和应用,用于下一代的双 β 衰变,暗物质寻找和太阳中微子实验。也有可能生产高放射性纯度的材料应用于商业。

当然,中国物理学家在中微子振荡实验这样的前沿课题中做出贡献无疑是重要的,但是通过这样的实验建立一支从事非加速器物理,进行多目标地下实验的队伍将更有意义,更为重要。一个好的地下实验室不是一成不变的,它会随物理的发展而不断调节、更新,如日本的神冈实验室,意大利的格兰萨索,美国的苏丹地下实验室等等,无一不与时俱进,继续发展,而且现在还在不断建设和建设新的多用途的地下实验

室,因为已有的实验室过去所取得的成绩是有目共睹的。一个成型的地下实验室将为下一步的非加速器物理发展提供平台、基础、空间,它的存在可以为新物理工作的开展节约时间,不至于因缺少基础一切从头开始而丢失机会。我们应该抓住粒子天体物理刚开始发展、还没有取得有突破性进展的时机,从现在开始努力做出有实质意义的贡献。

作者简介

杨长根,1962年7月出生于山西太原,1982年毕业于中国科学技术大学近代物理系。1985年起在中国科学院高能物理所工作。现为高能物理所研究员,博士生导师,从事高能粒子实验物理的研究。

现代物理知识

10千米多,因此其表面附近的引力场非常强,修正项 $2GM/c^2R$ 的估值 10^{-1} ,仅用牛顿万有引力定律来讨论就嫌精确度不够了。广义相对论认为,脉冲双星旋转时辐射引力波。脉冲双星(PSR1913+16)辐射引力波的功率并不小,有 $6.4 \times 10^{24} \text{W}$ 。只是这对双星距地球太遥远,到达地面的引力波能流密度只有 $2.2 \times 10^{-21} \text{W/cm}^2$,引力波无量纲振幅为 2.3×10^{-22} ,现在尚无法直接检测出如此弱的引力波。(通常用无量纲振幅 $h = \Delta l/l$ 表示引力波的强弱。 Δl 表示引力波到达时在距离 l 间引起的微小距离变化。)不过根据广义相对论,由于脉冲双星辐射引力波时必然伴随着能量损失,即使使双星系统的能量减少,周期变短,称为引力辐射阻尼。经过近20年的观测,发现这对脉冲双星的运动周期在稳定地减少,其周期减缓的变化率与广义相对论的理论值相当符合。所以脉冲双星的观察被认为是引力波存在的间接证明。霍尔斯和泰勒因发现这对脉冲双星而荣获1993年诺贝尔物理学奖。

二、广义相对论中引力波的性质

广义相对论是关于空间、时间和引力的理论。狭义相对论认为时间、空间是一个四维时空的整体,能量、动量是一个四维动量整体,但没有讨论时间-空间与能量-动量之间的关系。广义相对论进一步讨论了这种关系,认为能量-动量的存在(也就是物质的存在)会使四维时空发生弯曲。万有引力并不是通常意义下的力,而是时空弯曲的一种表现。大质量的物体在时空结构中产生“凹痕”。其他物体在弯曲时空中沿短程线运动,就像弹子球在蛛网上运动。即通常所说“物质告诉时空如何弯曲,时空告诉物质如何运动。”图1可以认为是三维空间中的类似图像。

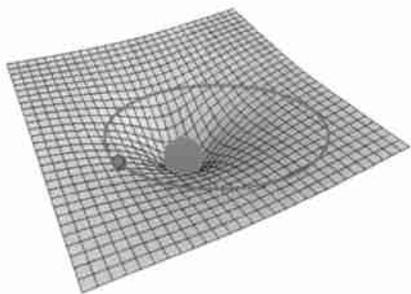


图1 弯曲时空和质量

广义相对论认为,如果质量分布以非对称方式运动,时空凹痕将像时空的涟漪一样向外传播,称为引力波。引力波和电磁波有本质的不同。电磁波由加速的电荷产生,在时间和空间的参考系中传播。

引力波由加速的物质产生,是时空结构本身的波动。

引力波和电磁波有若干相似之处,例如都是横波,都以光速 c 传播等等。但是由于引力波产生机制和电磁波的产生机制不同,引力波的强度非常弱。首先是因为引力作用远小于电磁作用。考虑一个质子和一个电子,在距离相同的情况下,很容易计算出引力与静电力大小之比为 10^{-38} 。其次是引力波产生机制和电磁波的产生机制不同。对于电磁波来说,电荷的运动变化激发电磁波。只有一种电荷(指仅有正电荷或仅有负电荷)随时间变化的单极矩辐射由于电荷守恒定律的限制不可能存在。最简单的仅由各个正负电荷组成的电偶极子的相对振动,也即偶极辐射就可以产生最强的电磁波。稍复杂一点的结构是由等效的电偶极子对组成的电四极子。电四极子中的电荷相对运动辐射电磁波被称为四极辐射。四极辐射的强度远弱于偶极辐射强度,两者之比为 10^{-17} ,多数电磁波均来自偶极辐射。对于引力波来说,质量的运动变化产生引力波。引力波的单极子辐射由于能量守恒定律的限制不可能存在,否则将导致孤立系统的质量发生变化。由于动量守恒定律的限制,孤立质量系统的偶极矩引力波辐射也不可能存在。角动量守恒定律则限制了孤立质量系统的类似于磁偶极矩引力波辐射的存在可能。因此最强的引力波发射机制也只能是类似于电磁波四极辐射的质量分布变化。

最简单的质量四极子引力波源是围绕通过联结棒中点的垂直轴旋转的哑铃。据说爱因斯坦也曾有过旋转金属棒以制造人工引力波源的想法。不过迄今为止,在地球上人工制造引力波源还仅仅是幻想。以人类现有的技术和材料可以造出的若干引力波源,但这些引力波源产生的引力波太微弱,无法被检测出来。

宇宙中有数以万亿计的天体,其中有大量的质量巨大的星体,而且不乏以各种形式发生质量运动变化的天文物理过程。探测来自宇宙中引力波,抓住太空中的涟漪,是自上世纪60年代以来物理学家的追求之一。

三、引力波实验探测的意义

时至今日,广义相对论已经成为现代物理学的基本理论。但是,引力波从未被直接探测到。引力波是否确实以横波的形式存在并且以光速 c 传播?引力波是否也有两个偏振方向?引力波的传播是否对应预期的时空弯曲?这些都有待于实验的验证,

也是对于广义相对论的进一步验证。

引力波实验探测的另一个意义是有可能打开第三扇新的宇宙观测窗口。当年伽利略组合成功光学天文望远镜,是打开了第一扇宇宙观测窗口,使天文学家可以超出肉眼的观测极限,探索月球、火星、太阳、银河系以至河外星系等所有发出可见光的星体。人类的天文知识得以突飞猛进。而射电天文望远镜的发明运用,则是打开第二扇宇宙观测窗口,将人类的视界扩展到可见光之外,发出无线电波、红外光、紫外线、X射线、 γ 射线等电磁波的天体均成为观察对象。人类的天文知识又一次大膨胀。射电天文学的发展已经催生了数个诺贝尔物理学奖获得者。引力波和电磁波产生机制的不同,使得引力波必然携带众多与电磁波不同的信息。引力波实验探测必然再一次极大丰富我们的天文知识,特别是关于中子星、超新星、黑洞以及大爆炸等人类现在知之甚少的天文现象。毋庸置疑,引力波实验探测也将产生数个新的诺贝尔物理学奖获得者。

四、共振棒引力波探测器

现代天文物理学的研究认为,地球上的引力波探测器最有可能接收到的是互绕旋转的双星系统发出的引力波。双星系统可以是中子双星、黑洞双星,也可以是一个中子星和一个黑洞组成。如前所叙,双星系统发射出引力波。由于角动量守恒,双星的旋转速度随引力波的不断辐射而逐渐加快,旋转半径逐渐减小,最后两颗星合二而一。不过这种过程非常缓慢。依目前的变化速率推算,双星 PSR1913+ 16 至少数亿年之后才会合并为一个星体。在双星系统合并前的几分钟,旋转速度和半径变化急速加快,故其发出的引力波也由先前缓慢变化的正弦波,相应变成频率增加、振幅增大的波形,如图 2 中的末段波形所示。这段波形对应的引力波强度也比较大。地球上的引力波探测器希望能捕捉到这样的引力波。令人遗憾的是引力波强度比较大的事件在地球上相当罕见。目前的分析认为,引力波无量纲振幅 $h > 10^{-21}$ 的事件每年在地球上发生不会超过两次。

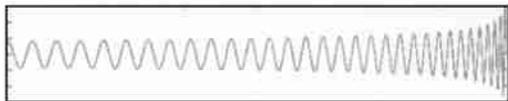


图 2 双星合并前的引力波波形

由于来自宇宙中的引力波极其微弱和罕见,探测引力波的关键就变成设计和建造灵敏度极高的接收天线,并能排除各种干扰,长时间地连续工作。最

初发展的天线是共振棒引力波探测器。

一般认为,上世纪引力波实验探测,特别是棒状引力波天线的先驱是美国马里兰大学的韦伯(J. Weber),虽然他的实验结果未能被世人接受。韦伯利用自由悬挂的重达数吨的铝金属棒来检测引力波。若传来的引力波的频率与金属棒的固有频率一致时,金属棒就可能因共振而将引力波信号放大输出。所以棒状天线也被称为共振棒引力波探测器。棒状天线的优点是体积小、投资不很大。其关键缺陷是探测频带太窄——只有共振频率(约 10^3Hz)附近的几个赫兹。另外灵敏度也不够高,韦伯的天线灵敏度只有 10^{-15} ,现在最好的棒状天线灵敏度也只有 10^{-19} 。所以虽然棒状天线已经问世 30 余年,现在也有五六个共振棒探测器组成一个天线阵运行了 10 余年,并没有探测到令人满意的结果。

本世纪共振棒引力波天线的发展方向是用球形的或者是球状的 20 面体的高 Q 物质替代金属棒,并降低工作温度至 50mK 以进一步减少热噪声。球状引力波探测器的探测频带将有可能扩展为几百赫兹,灵敏度达到 10^{-21} 。

五、激光干涉引力波探测器

激光干涉引力波探测器的探测频带可以展宽到几千赫兹,灵敏度达到 10^{-21} 以上。其核心部分是相互垂直、长度相等的由激光谐振腔组成的两个臂。图 3 是其原理图。激光谐振腔由靠近分光镜的部分

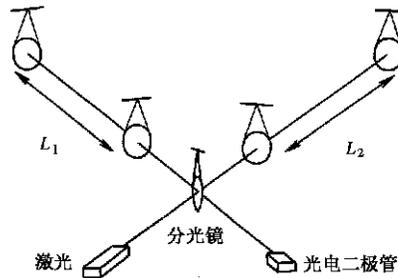


图 3 激光干涉引力波探测器原理

透射镜(透射率很小,实际上也是反射镜,称检测质量)和臂端的全反射镜(检测质量)组成。激光器发出的光经分光镜后分成相互垂直的两束,穿过部分透射镜,被两臂端的反射镜反射回来又交汇在分光镜。光电二极管接收器记录两束反射光的相位差变化。没有引力波通过时, $\Delta l = L_1 - L_2 = 0$, 在光电二极管处的两束反射光相位差相反,光电接收器输出零信号。只有当引力波通过时,两臂长度随时空发生不同的变化, $\Delta l \neq 0$, 相位差 $\Delta\phi$ 不为零,光电接收器才有与引力波对应的非零信号输出。若 Δl 越

大, $\Delta\phi$ 也越大, 光电接收器的输出越强。延长激光束和引力波的作用时间可以增加 Δl , 所以提高激光干涉引力波探测器灵敏度的有效方法是增加臂的长度。对于几百赫兹的引力波, 最佳臂长约为几百千米。由于地球表面曲率的限制, 建造如此长度的直线臂是不现实的。解决问题的办法是把几百千米的臂“折叠”成三、四千米长的可以实际操作的臂, 让激光束在两个反射镜构成的谐振腔内多次反射, 走过的距离等于最佳臂长后再交汇至光电接收器。这样激光干涉引力波探测器的有效物理臂长仍然是最佳

理论臂长。

建造千米级臂长的激光干涉引力波探测器是上世纪末天体物理实验界的一股潮流。表 2 列出世界上大型激光干涉引力波探测项目的概况。但是由于激光干涉引力波探测研究周期漫长、耗资巨大, 很少有国家能够在资金上给予长期的支持。由于资金的限制, 欧洲的德国和英国、法国和意大利在前期研究的基础上分别结成伙伴, 共同投资建设野外大型激光干涉引力波探测器。亚洲也仅有日本在建设一个臂长为 300 米的激光干涉引力波探测器。

表 2 大型激光干涉引力波探测项目概况

项目名称	LIGO		GEO 600		VIRGO		TAMA 300	ALGO
国家	美国		德国	英国	法国	意大利	日本	澳大利亚
主要研究单位	加州理工学院、麻省理工学院		普兰克研究所	格拉斯哥大学	科学研究中心	核物理研究所	国立天文台、宇宙研究所	国立大学、西澳大学
开始时间	1987		1986		1986		1994	2000
地点	华盛顿州	路易斯安那州	德国汉诺威		意大利比萨		日本三鹰市	澳大利亚珀斯
探测器数目	2	1	1		1		1	1
臂长	4km、2km	4km	600m		3km		300m	76m(计划 3km)
预算(百万美元)	292(一期)		7		90		15	

从表 2 可以看出, 美国是目前世界上惟一大规模投入资金进行引力波实验探测的国家。美国的引力波实验项目简称 LIGO, 是 Laser Interferometer Gravitationalwave Observatory 的缩写, 中文意思是激光干涉引力波观测站。LIGO 是美国加州理工学院和麻省理工学院的联合项目, 从 1987 年起, 就得到了美国国家科学基金会 NSF 的坚决支持。在美国相距 3000 多千米的华盛顿州和路易斯安那州, 分别建起了一座激光干涉引力波观测站。一期项目投入资金已高达 2.92 亿美元。到 2002 年底, 这两座观测站已经开始科学运行采集数据。从 2002 财政年度起, 美国国家科学基金会将继续每年投入 3300 万美元以上的资金, 用于观测站的运行和二期项目 (Advanced LIGO) 的研究。到 2006 财政年度为止将再投入 1 亿 7 千 5 百万美元的科研资金。所以 LIGO 引力波项目也被称为世纪之交时期投入资金最多的单项物理实验。

LIGO 的两个观察基地的建设地点事先经过全国范围的挑选与评估, 选定的基地位置远离喧嚣的大城市, 距离中小城市也有几十千米远, 以避开大量人类活动造成的噪声。但是各种干扰造成的地面振动噪声仍然是必须处理的首要问题。即使在夜晚最安静的情况下, 基地的地面振动噪声振幅也有 10^{-7} m。因此必须有高效可靠的多级复杂隔振装置, 将地面振动噪声减小一百万倍以上来保证激光干涉引力波探测器的正常工作。

LIGO 的一期灵敏度目标是 $h = 10^{-21}$ 。相对于 LIGO 的 $l = 4$ km 的臂长, 要实现这样的灵敏度, 检测质量的相对位移必须小于 $\Delta l = lh = 10^{-18}$ m。请注意, 这只有一个氢原子核直径的千分之一! 测量这样的动态长度变化, 几乎是在追求当今科学技术的极限。为此, LIGO 采取了一系列措施和各种各样的噪声信号作斗争。

在相距 3000 多千米远的地点建两个同样的探测基地, 是为了保证同时工作时可以排除干扰, 确定无误地探测引力波信号。局部的干扰, 如微小地震、声波扰动和激光的起伏等等有可能被单独的激光干涉引力波探测器误认为是引力波信号。但在相距 3000 千米以上的两个遥远地点不可能同时出现同样的干扰。只有两个基地的引力波探测器几乎同时 (相对于以光速传播的引力波, 3000 千米最多只有 10 微秒的时间差) 测到的类似的信号, 才被作为最有可能的引力波信号来研究。华盛顿州的基地还同时建一个 2 千米臂长的激光干涉引力波探测器。所以 LIGO 项目实际包含 3 个千米级臂长的大型激光干涉引力波探测器。

为减少气体分子的热运动对隔振装置、光学器件和激光束的干扰, LIGO 激光干涉引力波探测器的

中微子物理若干前沿问题

郭万磊

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

在过去的几年间,大量的实验结果已经表明中微子有非零质量以及轻子味混合。这一进展为我们打开了一个全新的值得探索的基本粒子世界。关于中微子我们已经知道了多少,我们想要发现什么?本文将从理论与唯象的观点进行阐述。

目前中微子物理的前沿问题主要包括:

- ® 中微子真的发生味转化吗?
- ® 有几代中微子? 存在惰性中微子吗?
- ® 中微子的质量是多少?
- ® 中微子是马约拉纳粒子还是狄拉克粒子?
- ® 轻子味混合矩阵的混合角有多大?
- ® 轻子味混合矩阵包含 CP 破坏位相吗? 如果包含,那么在中微子振荡和无中微子双 β 衰变中,这些位相会导致可探测的 CP 破坏效应吗?
- ® 在早期宇宙,重子反重子不对称可以通过轻子的 CP 破坏产生吗?
- ® 中微子和反中微子的性质破坏 CPT 守恒吗?
- ® 中微子能告诉我们天体物理和宇宙学方面的信息吗?

隔振装置、测试质量、光学系统及多数监控设备都被封闭在不锈钢的罩壳和管道内。罩壳和管道内抽高真空至 10^{-7} Pa, 这使封闭系统内的单位体积气体分子数下降至一个大气压时的 10^{-12} , 大大减少了热噪声, 对 LIGO 的一个基地而言, 两臂相加就有 8 千米长以上的封闭管道, 管道直径 1.2 米, 真空系统容积就达一万立方米, 被称为“地球上最大的真空实验室”。

激光和光学系统是探测器的核心部分。LIGO 激光选用低噪声的 Nd: YAG 激光(波长 1.064 μ m), 用激光二极管作泵浦源, 目前输出功率为 10W。对激光的频率、强度和模数均有很高的稳定要求, 频率不稳定性小于 10^{-7} 。分光镜和组成谐振腔的反射镜均由超纯度的融化硅磨制而成。反射镜通常也称检测质量, 直径 25 厘米, 厚 10 厘米, 重 10.7 千克。分光镜和检测质量的损耗均小于万分之一。

目前 LIGO 的探测灵敏度达到 10^{-20} , 已经进行了两次科学运行。科学家们还在紧张地调试中, 有

® 中微子能作为额外维(超出我们熟悉的 3 维)的探针吗?

® 中微子是否衰变? 衰变产物是什么?

® 中微子味物理的起源是什么? 它是高能标下的新物理吗? 如果

是, 那个标度是多少? 在那个标度下存在什么样的新物理? 中微子质量是通过跷跷板(seesaw)机制产生的吗? 中微子质量与混合的背后存在什么样的对称性? 轻子味物理和夸克味物理之间的联系是什么?

我们将讨论上述问题中的一部分, 这里我们已经考虑了最新的实验结果。

中微子真的发生味转化吗

现在, 有非常强的实验证据支持中微子从一种味变到另外一种味。在 2002 年 4 月, 真正令人兴奋的证据是来自关于太阳中微子的 SNO 实验。我们先回顾一下, 在太阳的核反应过程中产生的中微子仅有电子中微子 ν_e 。而 SNO 的结果清晰地显示到达地球的太阳中微子流中含有 μ 中微子 ν_μ 和/或 τ 中微子 ν_τ 。中微子味转化并不会改变总的中微子流量, 仅仅是在不同味之间重新分配而已。如果我们考虑惰性(sterile)中微子, 由于它不参加正常的弱作用, 所以味转化总体上会减少活性的、可探测的中微子流。现在让我们仅考虑没有惰性中微子的情况。

可能在 2003 年底实现 10^{-21} 的一期设计目标。二期项目(Advanced LIGO)已开始前期的研究, 预计 2008 年左右实现 10^{-23} 的探测灵敏度。

德国和英国的激光干涉引力波探测器联合项目 GEO600 进展比美国的 LIGO 慢一些, 尚未能进行科学运行。法国和意大利的联合项目 VIRGO 进展比 GEO600 还要慢一些。日本的 TAMA300 虽然已经科学运行 1000 小时以上, 但是探测器的臂长只有 300 米, 而且是建在城市之中, 背景噪声较高, 实际探测灵敏度不够好。日本科学家还在争取资金, 希望能在野外建立 3 千米臂长的激光干涉引力波探测器。

世界上从事引力波探测研究的科学家们已经形成了一个非常紧密的合作关系。顺利的情况下, LIGO、GEO600 和 VIRGO 会在今后的几年内组成一个激光干涉引力波天线阵联合运行, 极有可能捕捉到引力波。4 个独立的引力波天线的信号就可以确定四维时空中引力波源的位置。到那时, 人们就能更清楚地认识宇宙过去、现在和将来。

现代物理知识