

# 时空的乐章——引力波 百年漫谈(六)

卢昌海

## 十、韦伯的“大棒”

不知有没有读者注意到,我们的引力波百年漫谈进行到这里,出场的人物已不少,却没有对任何一位的生平作介绍。这是有缘故的,那缘故就是:迄今出场的人物要么是配角——比如罗森、英菲尔德、罗伯逊等;要么已著名到了无需介绍的程度——比如亚里士多德、伽利略、牛顿和爱因斯坦。在本节中,我们将首次迎来一位需要并且值得介绍生平的人物。

此人便是上节末尾所提到的美国物理学家韦伯。

韦伯之所以值得介绍,是因为在引力波的研究中,他是一个阶段性的核心人物,而且以他为核心的那个阶段是引力波探测的开创阶段,因而他这位阶段性的核心人物同时也是引力波探测的先驱人物。韦伯之所以需要介绍,则是因为他的知名度几乎仅限于引力波探测这一特殊领域,一旦离开该领域,则别说是对于公众,哪怕对物理专业的人士来说,也并不著名,因而需要介绍。

好在韦伯的经历有精彩乃至惊险的一面,介绍起来并不乏味。

韦伯1919年出生,1940年毕业于美国海军学院(United States Naval Academy),专业不是物理,而是工程学。由于就读的是海军学院,毕业又恰在第二次世界大战期间,韦伯顺利成章地进入了海军,在列克星敦号航母上服役,一度驻扎在即将遭受日本突袭的珍珠港。

不过侥幸的是,在日本突袭珍珠港之前不久,列克星敦号航母恰好奉命离开珍珠港,从而躲过了



韦伯(1919~2000)

厄运。可惜好景并不太长,一年半之后的1942年5月,在惨烈的珊瑚海海战中,列克星敦号航母最终还是在劫难逃,遭重创后自沉。但韦伯名列于幸存者之中,再次躲过了厄运。

大难不死的韦伯继续在海军服役,先后被派往加勒比海和地中海,参加过西西里岛登陆战,也从事过电子器件方面的学习和研究,直至1948年退役。

退役后的韦伯被马里兰大学聘为电子工程学教授。在当教授的同时,他继续深造,并且凭借微波光谱学领域的研究,于1951年获得了博士学位。1952年,韦伯在一次电子管研究会议上提出了“微波激射器”(Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation,简称MASER)的工作原理,成为提出这一原理的第一人。这是一项“诺奖级”的工作,比他稍晚提出这一原理的三位物理学家——美国物理学家汤斯(C. Townes)、苏联物理学家

巴索夫(N. Basov)和普罗霍罗夫(A. Prokhorov)——后来分享了1964年的诺贝尔物理学奖。当然,那三人的获奖及韦伯的默默无闻也并非“天道不公”,因为那三人不仅独立提出了微波激光器的工作原理,而且制造出了微波激光器,而韦伯虽早已有教授头衔,在科研上却还是初出茅庐,只具有“纸上谈兵”的能力——用他自己的话说,“在某种意义上讲我还只是个学生,不知道世界是如何运作的。”

不过,那项研究展示出韦伯有不俗的实力。

韦伯转向引力波探测是在20世纪50年代的中后期。那一时期他在普林斯顿高等研究院等处作过逗留,受著名广义相对论专家惠勒等人的影响对引力理论产生了兴趣。1959年,韦伯的一篇有关引力波的论文获得了美国企业家巴布森(R. Babson)设立的针对引力研究的悬赏,获奖金1000美元,进一步巩固了他的兴趣。

韦伯转向引力波探测从某种程度上讲是他在海军服役时的工作的延续和延展,因为他当时的职责之一是操作雷达及负责导航,其物理实质就是探测电磁波。从探测电磁波到探测引力波,可以说是一种颇为有序的兴趣发展。“如果你能建造电磁天线来接收电磁波,你或许也能建造引力波天线来接收引力波”——韦伯如是说。

在决定“建造引力波天线来接收引力波”之前,韦伯对引力波探测的方案作了相当系统的考虑,积累了1000多页的设计笔记。他所考虑的方案同时涵盖了上节提到的迈克耳逊干涉仪与共振质量探测器这两种类型。在后者中,则包括了将地球本身当成接收天线以及在月球上建探测站之类的宏伟构想。但限于当时的技术水准及他自己在申请项目等方面的能力,最终选择实施的是尺度比较“迷你”的共振质量探测器——即所谓的“建造引力波天线来接收引力波”。韦伯的努力吸引了几位合作者的参与,他们是:齐泼埃(D. Zipoy)、福沃德(R. Forward)、伊姆利(R. Imlay)和辛斯基(J. Sinsky)。

我们在上节中介绍过,共振质量探测器的基本原理是用共振放大引力波造成的探测臂振动。

但原理虽然简单,实现起来却不容易,因为引力波造成的探测臂振动哪怕在放大之后也依然微乎其微,依然比原子核的线度还小,用什么办法才能探测这么小的振动呢?韦伯想到了压电晶体(piezoelectric crystal),这是一种能将压强——包括振动产生的压强——转为极化,既而产生电信号的晶体。利用这种晶体,探测引力波的崭新而艰巨的任务就可转化为探测电信号这种虽依然艰巨,但很常规的工作。

在韦伯最初的构想中,整个探测臂都被设想为使用压电晶体。但那样一来,共振质量探测器就失去“迷你”的优势了——因为对于韦伯打算探测的频率范围来说,兼有共振器作用的探测臂的尺度需在“米”的量级,质量则在“吨”的量级,这些本身都不惊人,但作为压电晶体的块头却绝不“迷你”,甚至足以成为技术和资金瓶颈。好在韦伯很快就意识到那是不必要的,探测臂本身完全可以用金属材料来制作,压电晶体只需点缀性地“压”在探测臂上就可起到探测振动的作用。

这样,韦伯就形成了建造共振质量探测器的具体构想,其中探测臂的主体是一根金属“大棒”。在试验了若干种金属,综合了成本与性能等因素之后,由福沃德提议将材料选为了铝合金,形状是圆



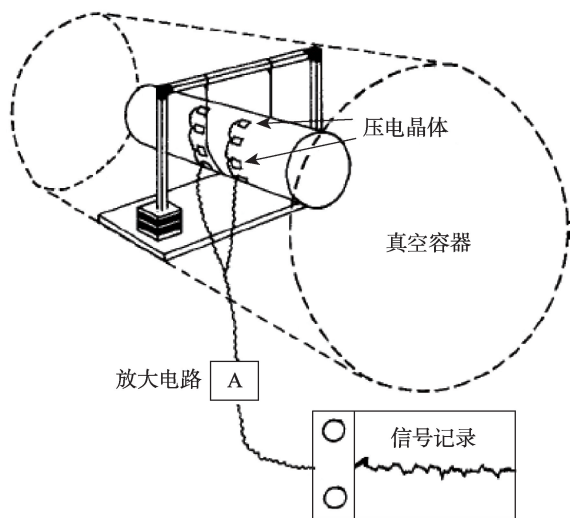
韦伯的“大棒”

柱,长度1.53米,直径0.66米,质量约为1.4吨。

为什么采用这种大小的“大棒”?韦伯等人没有给出完整理由,但为什么将长度选为1.53米则有两种说法:一种是辛斯基提供的,称那是齐泼埃的选择,理由是那样的长度能使共振频率 $\nu=1660$ 赫兹;而共振频率之所以要选为1660赫兹,则是因为相应的圆频率 $\omega=2\pi\nu=10000$ 弧度每秒,便于计算。另一种说法则是福沃德提供的,称那是他的选择,因为他知道自己时常需要搬动那根“大棒”,故而将长度选为了自己双手张开后恰好能碰到两端——换句话说,那长度乃是福沃德双手张开的长度。这两种说法都有些无厘头,并且都很儿戏,甚至有可能纯属杜撰。不过当时物理学家们对有望探测到的引力波具有什么样的频率确实还没有明确概念,因此儿戏的理由——倘若并非杜撰的话——也不失为是理由。有意思的是,1660赫兹这一频率被选定后不久,中子星的发现以及对黑洞现实可能性的逐渐认可,倒是在一定程度上支持了这一选择,因为与那些致密天体有关的物理过程被认为很有可能发射出频率在“千赫兹”量级的引力波。

为了探测“大棒”的振动,韦伯等人在“大棒”的“腰”部绑上了一些压电晶体,并且利用放大电路对压电晶体产生的电流进行了放大——这是探测小电流的传统手段。换句话说,韦伯的共振质量探测器在共振产生的机械放大之外还添加了电路产生的电子放大,因而具有双重放大的能力。这一套以“大棒”为核心的装置如今被称为了“韦伯棒”(Weber bar)。用“韦伯棒”探测引力波颇有几分古代战争中用共鸣器倾听敌方动静的意味,只不过“韦伯棒”所要倾听的不是敌方的动静而是时空的乐章。

“韦伯棒”所具有的双重放大能力使它具备了相当高的灵敏度。这种灵敏度是否足以探测引力波尚待检验,但一个棘手的副作用倒是确凿无疑的,那便是在普通实验中可以忽略的种种干扰和噪音全都有可能被探测到,从而必须逐一消除,以免干扰引力波探测。这其中包括空气扰动、热噪音、放大电路的反作用,等等。为了解决这些副作用,



“韦伯棒”的结构示意图

韦伯等人采用了多种措施:比如将“韦伯棒”置于真空容器内以消除空气扰动;比如通过对相距两千米左右的两个“韦伯棒”的信号进行比较以甄别热噪音和放大电路的反作用(因为相距两千米左右的两个“韦伯棒”的热噪音和放大电路的反作用不太可能同步,因而可用信号的同步与否来甄别热噪音和放大电路的反作用)。此外,“韦伯棒”所具有的极高的放大振幅的能力——也就是极高的Q因子(据韦伯等人的宣称高达 $10^6$ )——意味着产生共振的频率范围极其狭窄,这对频谱很宽的热噪音也是一种相当有效的抑制。

这些意在消除干扰和噪音的措施从原理上讲也都是简单的,要做到真正精密却也都并不容易,前后花费了韦伯等人好几年的时间。而且这些措施本身也是有副作用的,因为措施的精密必然会使“韦伯棒”的维护变得困难,比如任何需要触及“韦伯棒”的维护都必须首先打开真空容器,维护之后则要关闭容器并重新抽真空。而“韦伯棒”所具有的极高的Q因子又使得任何振动都衰减得极慢<sup>①</sup>,从而一旦受到干扰,就需等待很长的时间,才能让干扰衰减到足够小的程度,以便能重新接收有效信号。

而干扰几乎是源源不断的,除韦伯等人重点对付,且宣称得到解决的空气扰动、热噪音、放大电路

的反作用等等来自仪器本身或实验室之内的干扰外,还有来自外部的各种震动,比如附近车辆的行驶、学生们的游行(20世纪60年代是美国学生运动较为频繁的年代,韦伯所在的马里兰大学也无法独善其身),以及地震等等都会对“韦伯棒”造成干扰。更糟糕的是,那样的干扰——尤其是地震——往往具有较大的影响范围,从而会对韦伯等人用来甄别热噪音和放大电路反作用的那两个相距两千米左右的“韦伯棒”造成大致相同的干扰。为了减少那样的干扰,韦伯等人采用了将真空容器内的“大棒”悬挂起来之类的减震措施。而终极的措施则是在距马里兰大学1000千米以外的阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory)也建了一个“韦伯棒”,与马里兰大学的“韦伯棒”构成一对远距离相互比较的“韦伯棒”。在那对“韦伯棒”之间,韦伯等人通过电话线和微波接力等手段建立了信号联络,并且规定:倘若信号联络显示出两个“韦伯棒”的信号时间差不大于0.44秒,就被视为是时间上同步的信号。那样远距离的两个“韦伯棒”倘若出现时间上同步的信号,则包括地震在内的种种干扰的可能性就都不大了(除非是足够大的地震,但那样的地震是很容易用其他办法甄别的)。

以上就是对“韦伯棒”所涉及的若干主要技术手段的介绍。凝聚了韦伯等人长达数年的努力,汇集了上述全部技术手段构建而成的“韦伯棒”究竟能探测到多大的长度变化,或者说它的空间探测精度究竟是多少呢?韦伯等人给出了自我评估,结论是 $10^{-16}$ 米,也就是比原子核的线度小一个数量级。

这个空间探测精度是通过所谓“校准实验”(calibration experiment)得来的。在这种实验中,韦伯等人让两个相距很近的“韦伯棒”中的一个剧烈地振动起来,使它対另一个“韦伯棒”的引力(注意是引力而不是引力波,后者还要小得多)因距离的微小变动而改变,另一个“韦伯棒”的“任务”则是像探测引力波造成的振动一样探测这种引力变化使它发生的振动,并从中推断出自己的空间探测精度。

韦伯等人的这种“校准实验”如今看来是一种

不必要的自讨苦吃,因为“韦伯棒”终极任务虽是探测引力波,校准实验却完全没必要通过引力来做。校准实验的唯一目的是通过对幅度已知的振动的探测,来推断“韦伯棒”的空间探测精度,达到这一目的最方便的办法其实是电磁手段,这也是后来的同类实验所采用的办法。韦伯等人在引力上“一条道走到黑”的办法带来了巨大而不必要的额外困难,因为为了克服引力太过微弱的问题,韦伯等人必须让作为引力源的“韦伯棒”以极剧烈的方式整体振动起来,其程度之恐怖足以使“韦伯棒”本身因振动而发热,绑在“腰部”的压电晶体则会被震至脱落。不仅如此,相距很近而又振动得如此剧烈的“韦伯棒”必然会对另一个“韦伯棒”产生引力以外的很多其他影响,比如通过声波,通过其所造成的支架和地面的振动产生影响,这些影响跟所要探测的引力的细微变化相比都是不容忽视的,从而会对结果产生极大的干扰。但韦伯等人宣称他们有效地排除了那些其他影响,并成功地确定出了“韦伯棒”的空间探测精度为 $10^{-16}$ 米。

韦伯等人的校准实验于1966年开始出结果,对该实验出力极大的辛斯基和韦伯接连发表了数篇论文。校准实验出结果对辛斯基可谓是一场“及时雨”,这位追随韦伯多年的年轻人因实验进展的缓慢而迟迟无法毕业,绝望到连“求神拜佛”的歪招都用上了,此时则不仅凭借校准实验拿到了拖延已久的博士学位,而且情绪转为了超级乐观,他预期自己的博士论文即将成为热门资料供不应求,干脆自行印刷了60本以备销售。他同时还撰写了一本详述“韦伯棒”制作流程的《引力波探测器设计者手册》(*Gravity Wave Detector Designer's Handbook*),并预期那也会成为热门著作。

然而细心的读者也许注意到了,我们在介绍韦伯等人的结果时反复使用了“宣称”一词,这虽算不上贬义词,却也不是太有“正能量”的,其所针对的往往是单方面——并且只是单方面——持有的观点。在韦伯的实验中,这很不幸乃是事实,并且是自始至终的事实。对于“韦伯棒”的诸般性能——

尤其是探测引力波的能力和精度,对于“校准实验”的可靠性,物理学界都是从一开始就存有疑虑的。

但疑虑归疑虑,韦伯的实验在当时几乎是唯一认真付诸行动的引力波探测,就凭这一点,就足以确立其在圈内引人注目的地位,并且也得到了一些起码是口头上的支持。比如1963年,美国物理学家戴森(F. Dyson)就曾表示对韦伯的探测值得给予持续关注。据说,在整个20世纪60年代,广义相对论会议上的一句常用的问候就是:韦伯探测到引力波了吗?

韦伯探测到引力波了吗?我们将在下一节介绍。

### 十一、风动,幡动,还是心动?

韦伯对引力波的探测基本上是与“校准实验”同步展开的,从1967年到1970年,他在著名期刊《物理评论快报》(*Physical Review Letters*)上接连发表五篇论文,宣布了探测结果。

韦伯的第一篇论文发表于1967年3月27日,标题为“引力辐射”(Gravitational Radiation)。这篇论文发布了10组疑似引力波造成的信号,每组都标明了信号出现的时间,跨度从1965年9月21日到1967年2月17日。10组信号中,较早的7组是由单个“韦伯棒”探测到,较晚的3组则是由相距三千米左右的两个“韦伯棒”共同探测到的时间上同步的信号——以下简称同步信号。很明显,在这10组信号中,由单个“韦伯棒”探测到的7组其实没什么价值,因为没法甄别干扰;值得关注的只有由两个“韦伯棒”共同探测到的那3组同步信号。

在发表这篇论文时,韦伯的态度还相当谨慎,他表示,那几组信号若真是引力波造成的,则强度似乎太大,大到了应当伴随有其他天体物理效应——比如超新星爆发——的程度。由于并未有人观测到与他的信号相伴随的其他天体物理效应,那些信号“源自引力辐射显得很不可能”。假如源自引力辐射“显得很不可能”,那信号会来自何方呢?韦伯猜测是地震。1967年11月,在给同事的一封信中,韦伯坦率地表示,“韦伯棒”的抗干扰能力虽

然不错,却远非完善,他并且将信号源自引力波的概率估计为1/50。这个估计虽无实质的定量依据,却显示出谨慎的态度。

不过,这种谨慎的态度在后续论文中越来越少,直至消失。

韦伯的第二篇论文发表于一年多之后的1968年6月3日,标题为“引力波探测器事件”(Gravitational-Wave-Detector Events)。这篇论文发布了为期两个月的时间跨度内探测到的4组新信号,全都是由两个相距两千米的“韦伯棒”探测到的同步信号。在这篇论文中,韦伯对同步信号纯属碰巧的概率作了估计。这种估计从道理上讲是很有必要的,因为哪怕在两组完全随机的信号中,也会纯属碰巧地出现一些同步信号——尤其是在“同步”本身界定得比较粗糙的情形下。韦伯以同步信号每隔多少时间才会纯属碰巧地出现一次作为衡量其概率的指标。针对那4组信号,他给出的结果分别为150天、300天、40年和8000年。

假如韦伯的估计无误,那么很明显,每隔40年和8,000年才能纯属碰巧地出现一次的信号——尤其后者——是相当稀罕的,稀罕到了不太可能“纯属碰巧”的程度。因此虽然探测精度并无实质改进,韦伯的信心却因为这种估计而显著增加了,在论文的结论部分表示:“极低的随机巧合概率使我们能排除纯粹的统计起源”,“起码稀罕的信号有可能是引力辐射所激发的”。这个口气虽依然带有谨慎色彩(因为谈的只是“有可能”),比起将信号源自引力波的概率估计为1/50来,明显是加强了。

又隔了一年多,1969年6月16日,韦伯发表了第三篇论文,标题为“引力辐射的发现证据”(Evidence for Discovery of Gravitational Radiation)。这篇论文单从标题上看,口气就比前两篇加强了许多,因为前两篇的标题:“引力辐射”和“引力波探测器事件”都未对结果定性,而“引力辐射的发现证据”这一新标题却首次将探测结果定性为了“引力辐射的发现”。

从技术层面讲,虽然“韦伯棒”还是原先的水

准,但两个“韦伯棒”之间的距离由两三千米扩大到了1000千米,从而起码从道理上讲,对较大范围的干扰也具有了甄别能力。与第二篇论文相类似,韦伯对这篇论文所涉及的同时信号纯属碰巧的概率也作了估计,结果从数百天到7000万年不等,这其中7000万年才能碰巧一次的信号简直就只能来自引力波了。因此韦伯用不再含糊的口气作出了结论:“这是很好的证据,证明引力波已被发现了。”

1970年,韦伯再接再厉,又发表了第四和第五篇论文。

其中在第四篇论文中,韦伯改变了发布结果的方法,不再提供信号出现的时间。读者们也许还记得,在第一篇论文中,韦伯曾因为“并未有人观测到与他的信号相伴随的其他天体物理效应”,而得出了那些信号“源自引力辐射显得很不可能”的结论。如今,随着信心的屡次增加,他不仅不再谈论“源自引力辐射显得很不可能”那样的丧气话,甚至不再提供信号出现的时间了,这在一定程度上意味着他已不再关注“与他的信号相伴随的其他天体物理效应”,或者说不再寄望于用“其他天体物理效应”来印证了自己的信号了。

那么,韦伯发布结果的新方法是什么呢?是改为了只提供给定时段内纯属碰巧的信号数目与实际信号数目的比较。在这两个数目中,前者可通过概率手段估计出,后者则是实际探测到的同步信号数目。这两个数目倘若相近,则说明探测到的同步信号大都是纯属碰巧。不过韦伯发布的数据显示,后者比前者大一个数量级左右,因而并非纯属碰巧。

韦伯发布结果的这种新方法是很笼统的,但也并非毫无目的的笼统,因为这种新方法便于表述一类新的探测结果。在那类探测中,韦伯将其中一个“韦伯棒”的记录时间延后了两秒。这类新观测的意义在于:对于纯属碰巧的信号来说,因为本就是随机的,延后与否都纯属碰巧,从而信号数目不会有显著变化;但引力波造成的信号乃是必然同步的,延后两秒就会不复存在,从而信号数目会显著减少。因此,延后两秒是否会导致实际探测到的同

步信号数目显著减少可视为判断信号来源的辅助手段,若显著减少,则说明信号是引力波造成的。

那么探测的结果如何呢?韦伯在论文中宣布,通过对为期20天的延后两秒的数据进行分析,他发现信号数目显著减少了,于是可以得出结论:这类观测“支持了早先得出的引力辐射已被观测到的宣称。”

以上四篇论文无论在口气还是实验手法上都显示出一种层层递进的雄辩性,这种雄辩性吸引了很多人的关注。就连研究领域相当理论化的霍金也一度被韦伯所吸引,不仅于1970年撰文讨论了引力波的探测,并且将韦伯探测到引力波视为了已确立的事实。在引力波探测的后续征程中将起到重要作用的美国物理学家索恩(K. Thorne)则在1972年发表的综述中表示:“我们认为韦伯的引力波实验证据相当有说服力”。而一些原先认为引力波太过微弱,引力波探测太过渺茫的实验组则转变了看法,开始认真跟进。那些实验组的跟进可视为韦伯的影响力快速扩展的标志。

然而不无戏剧性乃至悲剧性的是,韦伯影响力的扩展虽快速,陨落的速度却也毫不逊色,因为他的第五篇论文——也是1970年发表的第二篇论文——就成为了自己“滑铁卢”的一部分。

这“滑铁卢”其实早在1969年就开始了。1969年7月,在以色列举办的一次学术会议上,韦伯作了个报告,在报告中他出示了一批数据,显示被他认定为来自引力波的信号呈现出24小时的周期性。韦伯表示,这种周期性意味着引力波来自天空中的一个固定方向。相对于“韦伯棒”来说,每当地球的自转使那个固定方向接近天顶时,信号就会变强,由于地球每24小时自转一圈,因此信号呈现出24小时的周期性。至于那个固定方向究竟指向何方,韦伯的猜测是指向银河系的中心——这是银河系范围之内引力场最强,从而最有可能频繁产生引力波的区域。韦伯的这一报告首次涉及了引力波的来袭方向,可算是将引力波探测推向了一个新的层面。

可惜这项研究犯了一个巨大的错误。

几乎立刻就有物理学家指出,对引力波来说地球是完全透明的,因此假如引力波来自一个固定方向,则这个方向在天顶附近跟在地球背面的天顶附近,对“韦伯棒”的影响应该是完全相同的。这意味着来自引力波的信号应呈现出12小时而非24小时的周期性。

这一错误让韦伯陷入了巨大的尴尬。

之所以尴尬,不仅因为这一错误对引力波的研究者来说是非常低级的错误,更是因为韦伯居然能拿出数据来支持这样的低级错误,这几乎无可避免地使人们怀疑韦伯是通过选择性地摆弄数据而炮制出自己预期的结果的。一些物理学家后来表示,他们对韦伯的怀疑正是始于这一错误。

这一错误被指出之后,韦伯在上面提到的发表于1970年的第五篇论文,以及发表于1971年的上述会议发言的书面文稿中都作了订正。订正的方式是宣称自己粗心了,数据所支持的其实是12小时的周期。也许真的只是粗心,但怀疑既已萌生,就不是这种宣称所能扑灭的了。这种宣称反倒更显得韦伯的数据是任人打扮的小姑娘,一些物理学家从此怀疑韦伯有能力炮制出自己所需的任何结果。

对韦伯的另一类怀疑来自他宣称探测到的引力波的强度。据韦伯自己估计,假如他所探测到的引力波来自银河系的中心,则要想产生他所探测到的信号,银河系的中心每年因引力波造成的质量损失将高达1000个太阳质量。另一方面,英国物理学家里斯(M. Rees)在1972年的一项研究中提出,银河系中心只要每年损失超过70个太阳质量,因引力束缚的减少而导致的银河系的膨胀将会被观测到。由于我们并未观测到银河系的膨胀,这表明来自银河系中心的引力波没有韦伯估计的那么强,从而也就不可能如此频繁地被韦伯探测到。不仅如此,倘若银河系中心每年因引力波造成的质量损失果真高达1000个太阳质量,则别说是银河系的中心,就连整个银河系都撑不了几亿年就会耗尽质量,这跟银河系已有近百亿年高龄的事实是完全冲突的。

当然,这类怀疑倒并非没有回应的余地,因为

对银河系中心每年因引力波造成的质量损失的估计并非毫无争议。这种估计有赖于几个基本假设,具体地说是假设了银河系中心所发射的引力波是各向同性的,是持续的,并且具有较宽的频谱。这些假设每一条都不是必然的,比如美国物理学家米斯纳(C. Misner)就认为,银河系中心所发射的引力波完全有可能具有显著的方向性而非各向同性,若如此,则对质量损失的估计可显著调低;英国物理学家夏马(D. Sciama)则进一步认为,银河系中心所发射的引力波完全有可能是断断续续而非持续的,这同样能显著调低对质量损失的估计。最后,银河系中心所发射的引力波的频谱倘若很窄而非较宽,则对质量损失的估计还可进一步调低。

不过,上述回应虽能消除或减弱银河系中心质量损失太快带来的困难,却都有不小的“副作用”,要求有高度的凑巧性,要求韦伯处于超级的幸运中。比如银河系中心所发射的引力波若具有显著的方向性而非各向同性,则“韦伯棒”必须幸运地处在引力波较强的方向上;银河系中心所发射的引力波若是断断续续而非持续的,则“韦伯棒”必须幸运地恰好是在有引力波的时段倾听着时空的乐章;引力波的频谱若是很窄而非较宽的,则那个很窄的频谱必须恰好包含“韦伯棒”的共振频率。这类诉诸偶然性的解释因带有撇不清的诡辩色彩,除非有充足证据,否则是不受欢迎的。

而对韦伯最系统的打击,则是来自那些一度可视为韦伯影响力快速扩展的标志的实验组。因为有韦伯的开路在先,那些“站在韦伯肩上”的实验组以极快的速度建起了多个“韦伯棒”,而且在精度上不仅毫不逊色,甚至犹有过之。仅仅一两年之间,那些实验组就陆续出了初步结果,然而却全都是“零结果”(null result),没有一个能印证韦伯的“发现”。

1972年,在美国得克萨斯州举办的一次相对论天体物理会议上,多个实验组报告了自己的“零结果”。虽然由于探测时间较短,那些“零结果”尚不能一锤定音,但足以加深物理学家们对韦伯的怀疑,并且足以显示出像韦伯那样频繁地观测到引力

波信号是极不可能的。

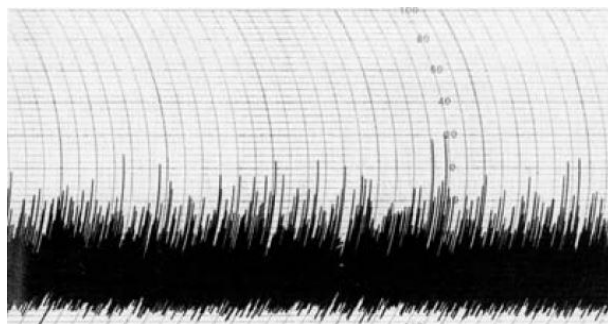
在接下来的几年里,那些实验组继续沿着韦伯开辟的道路前进,积累着数据,却始终未能发现任何能让韦伯高兴的结果——也就是未能发现任何经得起复核的信号。在那些实验组所用的“韦伯棒”中,有的连共振频率都跟韦伯的相同,从而使韦伯甚至无法以引力波只在他所探测的频率上才存在这种小概率假设为借口来辩解。

随着“零结果”的持续积累,韦伯遭到了越来越猛烈而系统的批评。那些批评所针对的已不仅仅是无法重复韦伯的观测,而且还切实指向了韦伯所犯的具体错误,比如韦伯用来确定同步信号的计算机程序被发现存在错误,比如韦伯对数据的处理被发现存在不自洽的地方,有些批评者甚至毫不客气地将矛头指向了韦伯的诚信,指责他对数据的处理不诚实。焦头烂额的韦伯对其中最严重的“不诚实”指控作出了否认,然而糟糕的是,否认过程中牵扯出的信息反倒证实了他确实对数据采用过不自洽的处理,目的是找出尽可能多的同步信号。

而最惨不忍睹的则是,韦伯曾报告过一批他的数据跟另一个实验组的数据之间的同步信号,这原本可作为强有力的证据,显示韦伯的数据具有能与其他实验组相互比对的客观性,结果却被发现双方所用的时钟根本不在同一时区——韦伯用的是美国东部时间,另一个实验组却是用的格林威治时间。彼此相差好几个小时的数据被韦伯当成同一时区的数据进行比较,居然还搞出了一大批同步信号!这个形同丑闻的错误对韦伯的信誉造成了毁灭性打击,同时也说明了他处理数据的方法哪怕是诚实的,也不过是诚实的错误,具备无中生有的能力。

韦伯昙花一现的声望就此坠下深渊。

若干篇论文,若干次会议,若干个报告,细节越来越多,口气越来越肯定,却如沙滩垒塔般在越垒越高之后,最终垮塌下来。在一个半开玩笑的意味上,我们或许可将《六祖坛经》中那则风动,幡动,还是心动的小故事套到韦伯探测引力波的故事上来——当然寓意不尽相同:“风动”是引力波的作用,



“韦伯棒”信号记录片断

“幡动”是“韦伯棒”的振动,“心动”则是韦伯对探测引力波的巨大心理期望。风动,幡动,还是心动?对韦伯的探测来说,可基本确定为“心动”。从“韦伯棒”所记录的信号图线看,也确实像是纯粹的噪音,只有“心动”的人才能从中看到“风动”导致的“幡动”。

由于韦伯的声望坠下深渊,我们在上节中提到过的辛斯基所“囤积”的60本博士学位论文也陷入了“滞销”(积压了55本),精心准备的《引力波探测器设计者手册》则乏人问津(那些跟进的实验组看来并不需要“手把手”的指点),就连他千辛万苦才完成的“校准实验”的结果——即“韦伯棒”的空间探测精度为 $10^{-16}$ 米——也遭到了怀疑,被怀疑是显著的高估,实际的精度也许只有 $10^{-13}$ 米。

虽然遭到学术界的否定,韦伯本人却痴心不改,终其一生都坚信自己探测到了引力波。在韦伯的办公室里,到处堆着书架和文件柜,只有一条窄窄的过道通往办公桌,办公桌上方的墙上则贴着一幅爱因斯坦的相片。韦伯直到退休之后,依然不时地前往实验室查看结果。对于其他实验组无法重复他的观测,韦伯先是将之归因于那些实验组的技术有问题,后来又以“阴谋论”的手法将之归咎为美国激光干涉引力波天文台想要垄断引力波探测,从而不允许“韦伯棒”出结果。这种近乎偏执的态度是不太光彩的,也是韦伯故事里最具悲剧性的色彩。一些同事认为,假如韦伯不是如此顽固地坚信自己,他在这一领域所能得到的敬意将远远超过他实际得到的,他的顽固和偏执使他不必要地被边缘化了。



在强大的反证据面前,早年支持过韦伯的物理学家大都转变了看法,只有美国物理学家戴森在一定程度上维持了原先的立场。直到1999年,戴森还重申了对韦伯的支持——虽然支持的层面变得有些抽象了。戴森表示,人们始终不相信有可能存在如韦伯所宣称的那么多引力波的波源,可射电天文学的发展史上曾有过一个类似的先例,那就是人们一度不相信能找到射电源,因为有人通过计算发现太阳在射电波段的辐射强度只有光学波段辐射强度的一万亿亿分之一( $10^{-20}$ ),那么小比例的辐射出现在遥远的其他恒星上是不可能被探测到的。但后来人们发现了大量的射电源,完全推翻了原先的看法。戴森说他心中始终存着这个例子,因此觉得宇宙中完全有可能存在各种各样没人梦想得到的源。

我读戴森晚年的文字,不止一次地感觉到他有一种滥用可能性的“和稀泥”风格——比如他曾表示过科学和宗教都在探索真理,因为两者都有规范和多样性;他还对进化论与神创论各打五十大板,主张两者要彼此尊重。具体到韦伯探测引力波的事情上,当然谁也不敢说宇宙中不可能有“各种各样没人梦想得到的源”,包括引力波的波源,但戴森说这话的时候,即1999年,已有大量技术比韦伯的先进得多的“韦伯棒”进行了几十年的探测,却未曾

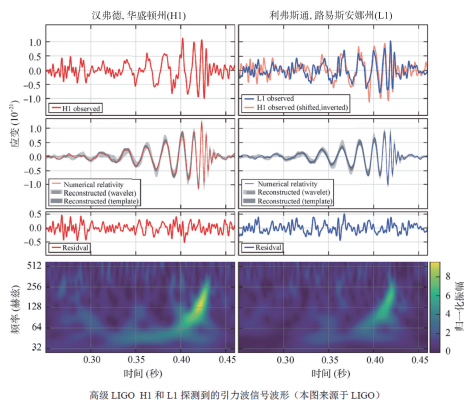
发现任何经得起复核的信号。莫非那些源是只有韦伯本人的“韦伯棒”才能探测到的?那倒真是“没人梦想得到”了。

不过在结束本节的时候,有几点是应该替韦伯美言一下的:第一,他虽终其一生都坚信自己探测到了引力波,甚至坚信到偏执的程度,但他公开允许同行们到他的实验室来检查数据和设备,在这点上他是谨守学术规范的。第二,他的顽固并未使他失去幽默感。韦伯的第一任妻子1971年去世之后,他与第二任妻子、美国天文学家特林布尔(V. Trimble)结婚。数十年后,在与人谈起此事时他微笑着表示:刚结婚时他比妻子有名,现在两人对换了。第三,韦伯虽然失败了,甚至在某些方面失败得不太光彩,起码不太潇洒,但他作为引力波探测的先驱人物将被科学史所铭记。事实上,他的“韦伯棒”如今已被包括美国激光干涉引力波天文台在内的若干机构所收藏。

①  $Q$  因子的直接物理意义——或曰定义——是受迫振动所储存的能量与每个周期因阻尼而损耗的能量之比。显然,  $Q$  因子越大意味着阻尼的作用越小,振动的衰减越慢,共振的振幅越大——从而放大效果越显著。另一方面,  $Q$  因子也是共振频率与共振峰的宽度之比,因此  $Q$  因子越大意味着共振峰越尖锐,产生共振的频率范围则越狭窄。这些特点对共振质量探测器的运作都有重要影响。

封面说明

激光干涉引力波天文台



高级 LIGO H1 和 L1 探测到的引力波信号波形 (本图来源于 LIGO)

激光干涉引力波天文台(LIGO)由分别在华盛顿州的汉弗德(Hanford)和路易斯安纳州的利弗斯通(Livingston)的两台孪生引力波探测器组成,它们彼此相距3000千米。当两个探测器同时探测到信号,才有可能为引力波。该天文台建于1999年,2002年开始运行,2015年9月14日探测到信号。

(卞卿/供稿)