

1969年6月,《物理学评论通讯》(Phys. Rev. Lett.)发表美国马里兰大学韦伯教授的报告:他们建立在马里兰校园和相距千里的阿贡国家实验室的引力波检测器同时接收到来自银河中心的引力波讯号。消息传来,震动了物理学界。

什么是引力波?物理学认为:波是物质周期性运动在空间的传播,如机械波和电磁波。引力波是全新的一类波动,目前仍只是物理学上的预言,并未被实验检测所证实。广义相对论预言的引力波,类似于投石激起平静水面上的波浪,它是物质加速运动在引力场中激起的传播着的“涟漪”。

不要把牛顿引力和引力波的作用相混淆。牛顿引力与距离 r 的平方成反比,引力波强度则随 r 的一次方而改变。从广义相对论观点看来,牛顿引力并不是真正的力,它可借助于坐标变换而消除,如自由下落系统中引力将消失。引力波的作用具有潮汐力特征,不因坐标变换而失去。

除了广义相对论外,还有多种其他的引力理论被提出,他们都预言引力波的存在,但对引力波的性质(如传播速度,偏振等)都作了不同的规定。实验检测引力波,将有助于判断这些并行理论的对与错。既然引力波由物质的运动产生,研究引力波讯号便可以得到波源运动的信息。在这个意义上,引力波又将是人类观察自然的新工具。这是韦伯报告引起重视的原因。为了证实韦伯的结果,一个世界范围的引力波研究热于70年代初兴起,尽管有些检测器和韦伯相同,而且所有检测器灵敏度都较韦伯的高(甚至高 10^3 倍)。但是,它们都还没有接收到引力波讯号。韦伯的结果被否定了,大量的理论和实验研究表明,我们能够得到的引力波讯号实在太微弱了,由于引力的弱相互作用性质,检测器截留引力波能量的效率很低(也即引力波的穿透力强),要在地球上检测引力波,还必须大大提高检测器的灵敏度。伴随引力波实验研究的进展,一个以检测声量子能量(10^{-24} 尔格)为目标的领域——超高灵敏度检测技术已经出现。

一、引力波的产生

引力波产生又叫做引力辐射,并不是任何物质运动都能产生引力波。广义相对论指出:不存在单极和偶极的引力辐射,最低序的引力辐射是四极辐射。可以这样理解,中心对称的球的呼吸运动不引起远处引力场的变化。一定距离的两个异号电荷相对运动,能产生强的电偶极辐射。但是,两个质量相同的物质相对运动,由于质量的符号相同,运动引起的引力场变化相互抵消,残留的部分仅只是由于两质量初始位置不重合而出现的差别,也就是相应于质量的四极矩成分。由于相反运动相互抵消的性质,因而物质运动产生引力辐射的效率很低。物质分布不对称性愈高(质量四极矩大),运动物体密度愈高,速度愈大,辐射引力波愈强。在我们所处的局部空间,物质的密度不高,运动相对平静,虽然,许多运动原则上也能产生引力波,但目前仍无法得到强度可以检测的引力波源。天文观测指出,在离我们远处的宇宙某些部分,星系演变十分激烈,高密度和高速度的天体产生着强的引力辐射。两个以光速相撞的黑洞,辐射的引力波能量高达 10^{59} 尔格。恒星寿命终了时期发生的超新星爆发,星体静止质量的 $1/100$ 将转化为引力波能,假定爆发的恒星有



两倍太阳质量,则辐射出来的引力波功率可达 10^{34} 尔格/秒。如果事件发生在银河中心,到达地面的引力波能量通量将达 10^9 尔格/厘米 2 ·秒。中子星和白矮星是另两类高密度的天体,密度分别达 10^{14} 克/厘米 3 和 10^7 克/厘米 3 (比较地球平均密度—6克/厘米 3)。著名的蟹状星云中的脉冲中子星(PSR 0532+21),辐射出连续的引力波,到达地面的能量通量为 4×10^{-8} 尔格/厘米 2 ·秒。此外,大量存在于宇宙的双星也是重要的引力波源,较强的如大熊星座双星WUMa,辐射连续引力波到达地面的通量为 3.2×10^{-13} 尔格/厘米 2 ·秒。虽然由于距离遥远,到达地面的引力波因而变弱,但它们仍是我们可能得到的较强的引力波源。值得指出的是:银心的超新星事件所爆发的引力波已能为现代的检测器所发现,只是这样的事件十分稀少。因而,对检测器灵敏度的要求是能检测更大范围的超新星事件。

由此可见,引力波检测器将成为研究天体物理的重要工具。我们知道,除中微子观察外,所有天文观测手段都依赖于电磁辐射。对于弱电磁辐射的“暗”天体,特别是黑洞,引力波是独有的检测工具。此外,其他被观测到的天文讯息都来源于微观粒子过程,只有引力波是直接反映大质量块的运动讯息。由于物质对引力波吸收微弱,因而这种讯息能直接传播到遥远处。应用引力波检测来研究宇宙天体运动的引力波天文学,必将给出一个全新的宇宙图景。

二、引力波对物质的作用

引力理论指出,引力波是横波,它对物体的作用力与其传播方向相垂直,两个互成 45° 的偏振方向分别用 h_+ 和 h_\times 表示,它们代表空时度规(或空时曲率)因

引力波而产生的相对变化量,称为引力波无量纲振幅,合成振幅以 h 表示. 引力波所能产生的 h 值很小. 上述超新星双星和中子星所辐射的引力波在地面产生的 h 值分别为 10^{-17} , 10^{-21} 和 10^{-22} 量级. 这反映了引力波对物质作用很微弱. 原因是引力波的吸收也取决于物体的质量四极矩. 通常用有效吸收截面 σ 来表示物体对引力波的吸收能力. 一个三维尺度 L 均为一米的铝块, 吸收截面 $\sigma \approx 10^{-40}$ 厘米², 比一个原子的截面还小. 上述银心超新星事件能在地面产生的引力波能流为 200 瓦/厘米², 作用于人体只使人体尺度发生 10^{-19} 厘米的变化, 对于日常生活来说, 这样的变化是完全可以忽略的.

引力波对物体的作用是潮汐力作用. 图 1(a) 表示两个偏振方向的作用力线. 图 1(b) 表示沿 z 方向

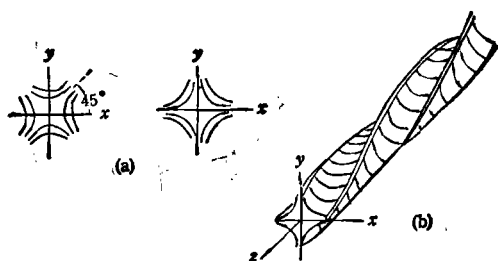


图 1 引力波作用力线

传播的引力波作用力线在空间的分布图. 由于互成 45° 的力伦流消长的结果, 力线的三维分布成麻花形状. 在引力波作用下, 粒子间的相对距离发生变化, 最大相对变化值近似等于引力波振幅 h , 检测这个变化是当前引力波检测的基础.

可以用这样一个例子来说明引力波的作用: 一把直尺, 组成它的粒子是由电磁力结合起来, 在引力场中, 引力和电磁力作用相平衡, 尺表现为一定长度. 当尺被作垂直于地平面的升降运动时, 由于地球表面是一不均匀弱引力场, 场的变化使尺沿长度方向伸缩. 一个在尺上的观察者将认为这是一个变化着的引力场(即引力波)通过尺而产生此效应. 这把尺就是引力波天线, 尺的振动能量由引力波提供. 当然, 由于地球表面引力场不均匀性相应的 h 值十分小, 这个例子所提出的检测实际上是做不到的, 当前的直接检测目标仍然是天体源.

三、共振棒式引力波检测器

韦伯用以接收引力波讯号的天线是一根铝棒, 长 153 厘米, 直径 66 厘米, 在棒的中部用钢丝悬挂在隔振堆上. (此装置已被收入美国国家历史博物馆). 可以证明, 此天线与弹簧振子等效. 引力波产生的潮汐力反抗天线粒子间的电磁力作功, 使天线发生振动. 天线端面有最大的振幅, 利用这一性质在端面安装电容

换能器(如罗马大学, 莫斯科大学), 通过电容量变化来检测引力波讯号. 由于振动天线在中部产生最大的应力, 韦伯采用压电式换能器于天线中部以检测讯号.

中山大学的引力波天线应用同一原理但改进了安装方法, 检测器灵敏度居国际同类天线前列. 图 2 是检测器结构示意图. 为了防止外界机械振动和电磁讯号干扰, 天线、换能器和前置放大器都被安装在高真空的金属容器里, 并在天线与地面间引入多级机械微隔

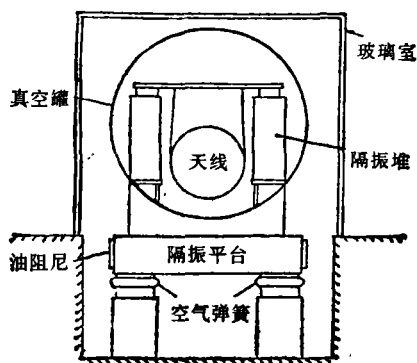


图 2 中山大学引力波检测器

震装置.

一座有完善隔离的天线, 其检测灵敏度首先受天线热噪声所限. 分子物理学指出: 物体分子热运动平均动能 $\approx kT$, k 为玻尔兹曼常数, 等于 1.38×10^{-16} 尔格/ K , T 为物体绝对温度. 常温 (300K) 下, $kT \approx 4 \times 10^{-14}$ 尔格. 这个能量表现为天线的热振动. 引力波入射也使天线产生振动, 假定入射引力波通量为 10^9 尔格/厘米²秒(相应河内超新星爆发, $h \approx 10^{-17}$), 对于韦伯的天线, 吸收截面 $\sigma \approx 10^{-41}$ cm², 超新星辐射引力波的持续时间 $\tau \approx 1$ ms, 那么, 天线吸收引力波能 $\approx 10^{-19}$ 尔格, 小于常温下的 kT 值. 看来似乎连最强的引力波讯号, 也将为天线的热噪声所淹没.

实际情况并不如此, 韦伯天线工作于共振态, 有很高的 Q 值(即振动的机械损耗低). 因而天线的振动状态能维持一定时间, 换句话说, 随着 Q 值的增高, 天线渐近于孤立系统, 与外界能量交换过程变长. 能量起伏时间可用天线振动的弛豫时间 τ_r ($\tau_r \propto Q$) 来衡量. 通常天线的热振动状态围绕平均值 kT 变动, 服从统计分布规律. 如果取时间间隔 τ_m 对天线振动作一系列测量, 得到一连串相继的能量差值, 显然, 这些差值将随 τ_m 的减小而减小, 而且也服从相同的统计分布. 其平均值是 $(\tau_m/\tau_r)kT$. 也就是说, 当测量时间间隔小于 τ_r 时, 热噪声的贡献将减少. 考虑到换能器及后续测量系统的噪声贡献, τ_m 不能随意地减小, 只能选取一定折衷值. 一般引力波检测器使用电感或电容式换能器, 最佳 τ_m 约为 0.1—1 秒. 对于铝棒天线, $\tau_r \approx 10$ 秒, 故最小可检测能量为 $(0.1—0.01)kT$. 即

有可能用常温天线检测河内超新星爆发讯号。新近发展的隧道电子换能器, τ_e 可进一步降至 10^{-3} 秒。最小可检测能量将进一步降低为热噪声的 ($10^{-3}-10^{-4}$) 倍。

降低天线工作温度是提高检测灵敏度的另一方法。热噪声将因 T 的降低而减小, 而且, 低温下天线材料 Q 值提高(如铝, Q 值可提高一个量级以上), 也对灵敏度提供贡献。80 年代已建立工作在液氮温度(4.2 K) 下的天线, 灵敏度达到 $h \approx 5 \times 10^{-19}$ (斯坦福大学)。目前, 正在建造的超低温天线(斯坦福大学, 罗马大学) 预期工作于 40mK 低温, 灵敏度将达 $h \approx 5 \times 10^{-22}$ 。

四、激光干涉式引力波检测器

70 年代兴起的另一种引力波检测器是激光干涉式检测器(简称激光检测器)图 3 是原理图。

决定激光检测器灵敏度主要是激光束的光量子起

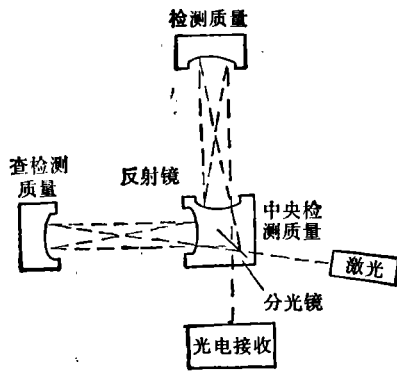


图 3

伏噪声和干涉臂的长度。改善量子噪声的方法是增加激光源输出功率, 但过强的光功率将增加干涉腔的热起伏以及对反射镜的光冲击。目前, 主要问题仍然是得到强的单模激光, 沿用的氩离子 (Ar^+) 激光器将为 Nd·YAG 激光器所取代, 有希望得到光电转换效率达 1% 的有 1kW 连续输出的这种激光光源。

增加光臂长度能有效提高检测灵敏度。最佳臂长为待测引力波波长的 $1/4$, 对于 1kHz 的引力波, L 的最佳长度为 75km。这在实际上是难于做到的。最早的激光检测器 (MIT) 臂长约一米, 采用多次反射方法使等效臂长增加至 150 米, 检测灵敏度为 $h-10^{-16}$ 。第二代激光检测器臂长增加至 10 米量级, 德国马克斯-普朗克量子光学研究所 (MPI) 30 米臂长检测器, 多次反射后等效臂长达 3km, 灵敏度 $h-10^{-18}$ 。美国格拉斯哥 (Glasgow) 大学和美国加州理工学院 (CIT) 应用法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 干涉腔代替多次反射干涉臂, 灵敏度也达同样水平。

CIT 的 R.Drever 指出, 在检测光电管处, 光强被调节为极小值, 绝大部分光能从入射光方向出射而未

加利用。他提出的循环光方案, 只要调节得当, 可使这些出射光反射回来加强入射激光, 光的增强程度决定于反射镜的反射率, 如反射率达 0.9999, 则入射光强在理论上可以增加 10 倍。

建立干涉臂长为数公里的激光检测器计划已在几个国家中进行着, 包括美 (MIT, CIT); 英 (Glasgow), 法 (Orsay); 意 (Pisa), 德国 (MPI) 等, 澳大利亚、日本和苏联也联合规划在澳大利亚共建激光检测器。这些计划将采用多次反射或者 $F-P$ 腔方法使等效干涉臂长达 100km 量级, 并可根据测量对象调整臂长, 这实际上将成为一个引力波天文台, 这种检测器的灵敏度预计可达到 $h-10^{-23}$ 。

根据目前进展情况, 超低温共振式引力波检测器可望于五年内建成。灵敏度达量子极限 ($h-10^{-21}$) 并率先检测到超新星的引力波讯号。大尺度激光引力波检测器预计于 10 年内建成。灵敏度将达 $h-10^{-23}$ (这类检测器有较高的量子极限), 并用于天体物理研究。这一进展, 不仅将掀开物理学史上新的一页, 也将在天体物理研究中开阔新的篇章。由于实验检测将达量子极限, 物理学家已经在考虑着如何在实际上去突破这一检测的限制。一种叫做非破量子 (Quantum Non-Demolition) 测量技术, 已提到实验研究日程上, 这种技术, 将在引力波检测实验中首先实现。

引力波是否存在? 人类能否检测到引力波? 美国的泰勒 (J.Taylor) 等人自 1974 年起对脉冲双星 PSR 1913+16 的轨道周期变率进行观测, 至今已 16 年了, 它以愈来愈精确的结果间接地证实了引力波的存在, 其结果与广义相对论十分符合。但是, 最终证实引力波, 还有赖于在地球上的直接检测, 这是当前引力波研究的方向。斯坦福大学的 P. 迈克尔逊教授是 A. 迈克尔逊的侄儿, 著名的迈克尔逊-莫雷实验否定了以太的存在, 奠定了狭义相对论基础, P. 迈克尔逊 1988 年访华, 他说: “我伯父企图找寻以太, 却证实了以太不存在; 我现在企图找寻引力波, 我相信引力波必将被检测到。”

中国的引力波研究起步较迟, 在困难的条件下发展了一支队伍。中山大学引力物理研究室正在和各国同行一道努力, 以期早日找到引力波。我国曾以最早发现超新星而著名于世界, 我们是否也会最早报道来自超新星的引力波讯号呢?

• 语丝 • 科学家的条件

徐叙瑛

科学家最起码的条件应是言而有信, 而不是信口开河, 实用主义, 用着别人时, 说得什么都好, 用不着时, 什么都不对。