

引力波的探测

(一) 引力波的发射来源于物质源的充分不规则运动

广义相对论将空间的几何性质与引力联系起来。引力是用时空度规 $g_{\mu\nu}$ 来描写的物理对象，所以引力波可以看成是在时空度规 $g_{\mu\nu}$ 上的扰动的传播。引力波的辐射源是物质(更确切地说是协变能量)。正是物质的运动才引起引力场的变化，亦即时空度规 $g_{\mu\nu}$ 的变化。特别是，每当物质经历非常“不规则”的运动时(比如星体轨道运动的变化以及星体内部大规模的运动变化)就会引起引力场的变化，从而产生引力波。正象加速运动的电荷发射电磁波一样，加速运动的物质也能发射引力波。引力场的这个变化我们用 $h_{\mu\nu}$ 来表示，由于 $h_{\mu\nu}$ 是小量，故将新的时空度规代入爱因斯坦场方程时，可保留方程中 $h_{\mu\nu}$ 的线性项，忽略掉高阶项，这样就得到 $h_{\mu\nu}$ 的方程。求解方程可得到 $h_{\mu\nu}$ ，根据 $h_{\mu\nu}$ 所引起的潮汐力作用能使两个相当邻近的检验粒子发生相对运动，这种相对运动就是引力波所产生的真实的物理效应，各种引力波探测器都是设计来探测这种效应的。

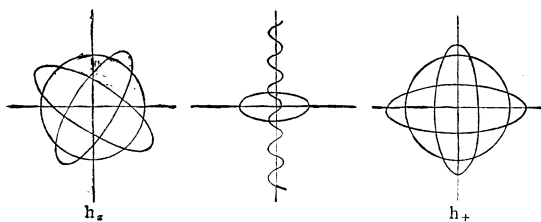


图1 周期引力波(中)沿自由粒子环平面的垂直方向传播时，将在粒子之间引起微小的相对运动。圆环将交替变成扁圆和长扁圆，其振动周期等于通过的引力波的振动周期。左图 h_x 和右图 h_+ 表示引力波引起的两个可能的极化状态，使圆环产生 45° 的转动，两个符号 \times 和 $+$ 表示两种运动方向相差 45° 。一般说，两个模 h_x 和 h_+ 表示波长，净运动是两种运动的迭加。

作为一个例子，我们将一个由许多粒子构成的圆环放入空间。起初每一个粒子相对其他粒子没有运动(图1)。如果没有引力波，圆环将保持形状不变(可不考虑质点之间的相互作用)。当引力波通过时，将改变

圆环的局部几何位形，从而每一个粒子会自然形成一定的几何状态。根据广义相对论，时空几何将决定自由粒子的运动，所以粒子之间的相对运动将使圆环发生变形。

粗略地可以认为粒子的相对位移与环的大小以及引力波的波幅成正比。在图1中可以看到，所有粒子的运动都在垂直于引力波传播的方向上。所以正如电磁波一样，引力波是横向极化的波。

由于引力波携带能量，将能量守恒原理应用于辐射源时，若辐射源的分布质量为 M ，则能量守恒的基本要求就是：如果物质源发射的引力波能量为 ΔE ，则其总能量 $E = MC^2$ 将减少 ΔE ，其质量相应减少 $\Delta M = \Delta E/C^2$ 。若物质源直径为 R ，其特征速度为 v ，则根据广义相对论

$$\Delta E/MC^2 \sim f^2 (R_{sch}/R) (v/C)^4$$

R_{sch} 是物质源的施瓦西半径，它等于 1.5 千米 (M/M_\odot) (M_\odot 为太阳质量)，相应这一辐射源在距离为 D 处观测到的引力波幅(可简写为无量纲量 h) 为：

$$h \sim f (R_{sch}/R) (R_{sch}/D)$$

其中 f 是一个重要因子，它表示物质源经历充分的不规则运动发射引力波的效率。比如，球状星体径向均匀塌缩时，则不发射引力波，这时 $f = 0$ 。所谓“充分的不规则运动”其精确意义是：物质辐射源具有变化的质量四极矩。

(二) 射电脉冲星 PSR 1913 + 16 的观察得到了很有趣的结果

双星系是最常见的发射引力波的天体系统，它发射很强的引力波。由于目前的探测技术尚不能直接探测双星的引力辐射，故而仅能从引力辐射引起的双星各种参数的变化来间接地探知引力波的存在，这就是探测引力辐射阻尼，即双星的能量衰减。为此，可观察双星的周期变率。

1978 年以来公布了第一批这样的间接证据，这就是 Hulse (1974 年) 和 Taylor (1975 年) 先后发现的射电脉冲星 PSR 1913 + 16。直接的观察证明，该星是

双星中的一个成员,同时发现,这颗星以每秒 20 次的频率发射射电。周密的检查还证明该星在其 8 小时的公转周期运行中,脉动频率有微小的周期性变化,并且它的偏心率也很大。因此得知,该星是由两个致密星组成的双星系,其伴星轨道周期也是 8 小时。这样短的轨道周期表明,双星系中的两颗星彼此连系非常紧密,其距离仅为地球与太阳之间距离的 1/100。可以预料,在这种情况下广义相对论的进动现象将非常显著。如果说水星近日点每 100 年大约进动 43",那么对这一双星系的观察证明,其近心点的进动大约为每年 4°,比水星近日点的进动大 30000 倍以上。正是由于这种轨道运动的变化,它应当连续发射引力波,从而引起这一孤立系统的能量损失,因此两星之间的距离将缩小,8 小时的公转轨道周期也将缩短。所以在观察轨道周期的逐渐减小中可以间接地证明引力波的存在。

根据理论分析可以确定出两星的质量分别为 1.41 太阳质量。引力波发射所引起的轨道周期变化理论预言值为 $(-2.403 \pm 0.002) \times 10^{-12}$ 弧秒/秒,观察值为 $(-2.40 \pm 0.09) \times 10^{-12}$ 弧秒/秒,与广义相对论符合得很好。图 2 纵轴表示轨道周期变化,横轴表示观测

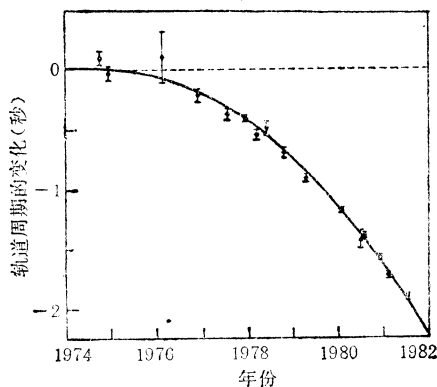


图 2 Hulse 和 Taylor 1974 年发现的脉冲双星 PSR 1513 + 16 发射引力波引起的能量损失,从而导致轨道周期变慢,图中各点表示在七年中观测到的轨道周期减小的情况(每一点的上下间隔表示每次观察的误差范围)。实线表示根据广义相对论所预言的周期的减小,虚线表示没有引力波发射时,其周期应为一不变的水平直线。引力波第一次的间接检测结果表明与理论的符合极佳。

时间。图中的点表示在 7 年中观察到的轨道周期变慢情况(上下两点间隔表示每一观察的误差范围)。虚线表示,如果没有引力辐射阻尼,其周期应为一平行于横轴的直线。实线表示按照广义相对论所预言的变化,形成一条向下弯曲的曲线。从 16 个观察数据看,与理论符合得很好(这是 Taylor, Weisberg 和 Boriakof 等人在 1982 年的观察结果)。利用 Arecibo 射电望远镜在康乃尔工作的天文学家已经独立地证实了 Taylor

小组的观察结果。

(三) 什么样的天体能发射引力波?

上面讨论可以看出,能够成为较强的引力波发射源的天体必须满足下列条件:①必须是致密星体,其尺度应与施瓦西半径 R_{sw} 相比拟,②该天体的物质运动速度必须接近光速,③运动速度必须相当“不规则”,④在质量上至少应象太阳大小的天体才会有足够的自吸引力使其达到施瓦西半径。因此我们不可能在地面实验室制造一个引力波发射源来观察象赫芝那样的电磁波实验。有资格充当引力波发射源的两类致密星体就是中子星和黑洞。

发射引力波的天体主要有三种类型:脉冲源,周期源和随机源(表 1)。

表 1 引力波及其发射源

发射源型式	发射源内部机制	发射频率(赫)
脉冲源	星核塌缩, 黑洞-中子星碰撞, 塌缩为大黑洞。	$10-10^4$ $1-10^4$ $\sim 10^4$
同期源	双星系的轨道运动, 振动的中子星。	$10^{-4}-10^{-11}$ $10^{-2}-10^{-11}$
随机源	宇宙背景辐射 重迭的脉冲源	“噪音” “噪音”

脉冲源产生一次引力波脉冲的持续时间典型值约为几毫秒。这类脉冲源中最重要的一种就是在中子星或黑洞形成时其内部发生的迅变运动,在某些星系或类星体中心形成质量为太阳几十亿的较大黑洞可以成为另一种重要的脉冲源。此外,当一颗中子星或黑洞与另外一个巨星发生碰撞时也能发射脉冲引力波。

周期源能连续发射某一特殊频率的引力波,最重要的一类周期源就是转动星系。因此所有的双星系都是周期源,其中包含致密星体的双星系一般地都是很强的周期源。上面提到的脉冲双星既是一个脉冲源,也是一个周期源。此外,发生某种形变的转动中子星也是周期源。

随机源能够产生引力辐射的不规则背景“噪音”。这种背景“噪音”能够决定引力波的最小振幅,使我们能够在这种背景噪音下讯号无损失地进行引力波检测。如果存在很多彼此间隔遥远的脉冲源,则它们发射的引力波将会重迭一起,也会形成随机信号。另外一个令人迷惑的随机源可能就是宇宙本身。如果说今天的宇宙膨胀十分均匀,而过去它的膨胀可能非常不规则,则整个宇宙正是由于它在极早期的那些不规则运动,才使它在今天浸沐在引力辐射的连续介质中。如果我

们能够确定宇宙年龄仅为 10^{11} 秒时引力辐射的特征,那么对这种引力波的检测和量度我们就能够探索比光学天文学时期早 50 个数量级的宇宙历史,这真是令人惊奇的事情!

在确定能否观测到这些辐射源时,还必须考虑下面两个因素:即探测器对频率分布的灵敏度和探测源的发射率(“事件率”)。检测器的灵敏度每增加一个数量级,能够探测到的辐射源就增加一千倍;而事件率大到每月一次以上,在地球上就可进行实际观测,这将是重要的事情。

研究结果表明,直接观察超新星的引力波须研制灵敏度至少与引力波幅 10^{-22} 相当的检测器。

(四) 理论的计算结果

要对引力波辐射源进行全面的,是一个难于实现的任务。因为求解爱因斯坦引力场非线性偏微分

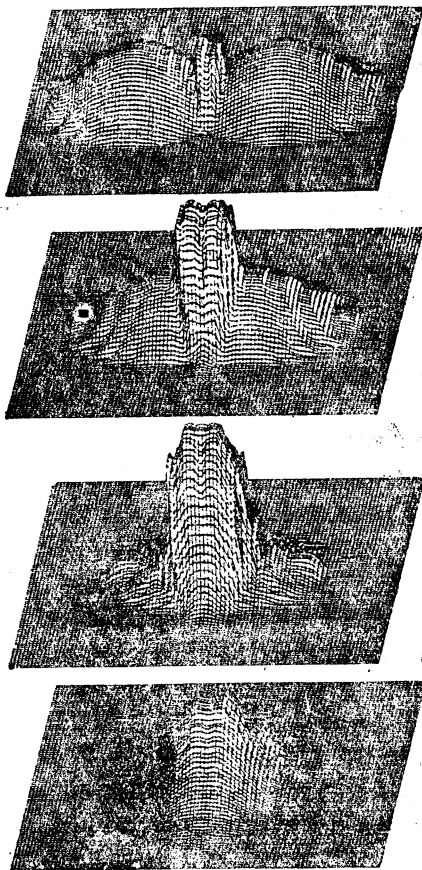


图3 利用牛顿理论所作的近似模拟:质量均为1个太阳质量的两个相同的中子星,相距无限远,由静止释放后发生碰撞。初次接触后,冲击波反向通过两星体,使其减速,但仍能再次发生碰撞,经过几次振荡后,两星最终稳定下来,并结合为两个太阳质量的单一星体。图中所画为星体碰撞结合过程中四个相邻阶段表面密度的变化。

方程(即广义相对论流体动力学方程)非常复杂。只有利用大型电子计算机才能完成这样的数字求解任务。

爱因斯坦方程的第一个数字解是在 60 年代中期(1967 年)由 May 和 White 得到的。他们对于一个正在塌缩的球状星体进行了观察研究。从那时起对于该星的整个塌缩过程以及随后形成的球状黑洞都进行了计算(Shapiro 和 Teukolsky 1980 年的工作)。Smarr 在 1977 年对两个黑洞的对撞进行了计算。这一非球状二维碰撞产生的引力波效率很低,引力辐射能量只有 10^{-3} 。

天体的非球状塌缩(二维问题)只是 80 年代初才开始研究。Wilson 和 Smarr 对轴对称塌缩天体的二维计算,Nakamura 等人对塌缩黑洞转动初期的研究,尽管计算不太精确,但这都是开创性的工作。

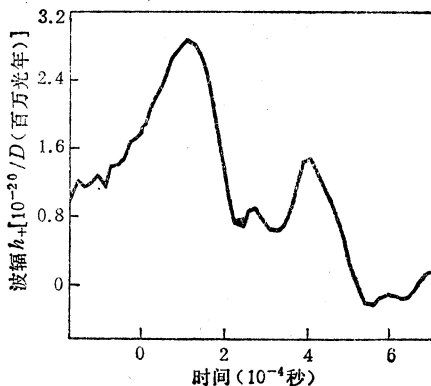


图4 垂直于碰撞轴的引力辐射脉冲群波幅与时间的关系。 $t=0$ 时为第一次碰撞接触的时刻。

在完成了数字求解工作以后,还必须考虑爱因斯坦方程的近似解。利用牛顿理论也可以近似地处理辐射源的流体动力学性质,然后利用广义相对论作适当近似处理,从而导出引力波的发射(图3,图4)。用这种方法和其他近似方法得到的重要结论是,引力波的发射效率通常很小($\Delta E/MC^2 < 10^{-3}$)。在最理想的情况下,发射效率可达 10^{-2} 。

(五) 正在研制中的新型引力波检测器

现在世界上有十几个实验小组正在对引力波进行直接检测。它们已形成一个世界范围的检测网。

为了对引力波进行有效的检测,检测器的灵敏度必须达到 $h \sim 10^{-22}$ 。引力波感应的几何变化近似 h ,因此长度为 1 米的检测器必须能记录 10^{-22} 米(相当原子核直径 10^{-7} 倍)长度的变化。现在有几种仪器正力图达到这样高的灵敏度。如“条状晶体检测器”和“激光干涉仪”。通过人造卫星进行追踪实验,也能获得同样结果。

条形检测器是韦柏(J. Weber)首创的,其原理比较简单。柱形条重约几吨,长有数米,可自由悬挂起

来。引力波通过晶条时，正如前面所讨论的自由粒子环，将在晶条各部分之间引起量级为 h 的相对位移。用一种耦合装置可将晶条的微小位移化为电讯号，再经放大器，由此来确定引力波的强度。

但是测量 10^{-22} 米的位移有某些内在困难。一是晶条必须隔声，第二，还必须使晶条冷却以减少热运动（目前已被冷却到 1°K ，将来可望达到 10^{-3}°K ）第三，还应考虑海森伯测不准关系所附加的限制。这方面在研究量子理论的测量界限中已获重要进展（Thorne 及其他人在 1979 年的工作）。

在 Rochester（美国）和莫斯科所设计的原始韦柏晶条用纯兰宝石水晶充当。它比韦柏晶条质量小，因而吸收引力波能量少，但由于其纯度高，所以能量的损失得到了补偿。同时它的衰减时间较长，从而可能增加测量的灵敏度。东京小组也研制出一种改进了的韦柏晶条，试图对连续周期源（如脉冲源）的引力波进行检测。

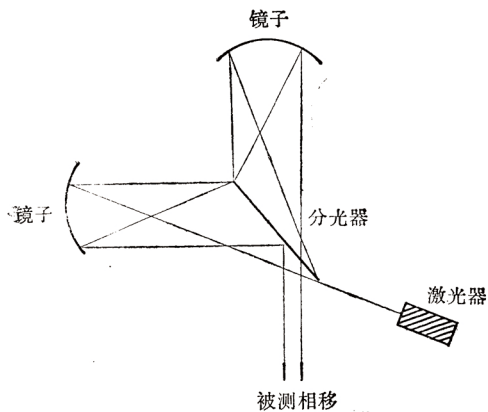


图5 激光干涉仪与两面镜的位置形成一个L形，反射光程越大，引力波检测器的灵敏度就越高，利用多次反射可使光程增大。

已经研制成功的第二种类型的引力波检测器是激光干涉仪。激光干涉仪类似迈克尔逊干涉仪，由两面自由悬挂的镜子和一架分光器组成，分光器放在两面镜形成的正交臂的交叉处，正交臂有几米长（图5）。相干激光在两臂之间分开，从每一面镜子上反射后又经过分光器重新合并，然后进行光电检测。两光束之间的干涉情况取决于两臂间的光程差。引力波通过时将会在两臂上引起不能相消的极小的量级为 h 的相对位移，这样就可以观察到两光束干涉图样的强度变化。

与韦柏晶条不同，激光干涉仪是一种宽频（从 100 至 10,000 赫芝）非共振检测器，其灵敏度较高，此外，相关臂的位移原则上按照引力波波幅随时间而变化，因此可以测量出引力波的整个波形。为了增加引力波通过时所引起的光程差，应使激光束在重新合并前在臂上进行多级反射。这样就提高了检测器的灵敏度。

也许探测引力波的最为雄心勃勃的计划是在

caltech 和麻省理工学院物理系的科学家们共同提出的一个实验。他们设想，将增倍激光干涉仪建在两个地方，每一个装置由长度为 5 公里的 L 型真空系统组成。在每一个真空系统中，同时安装几个激光干涉仪。两地相距 100 多公里，使两架仪器同步进行操作，因而可以互相校正。如果说，以前设想的实验能够检测的引力波幅 h ，对脉冲源来说在 10^{-20} 以下，对周期源来说在 10^{-24} 以下，对随机源来说在 10^{-22} 以下，那么今后的检测精度比上述每一种情况还要小三个数量级。建立真空系统的设想已于 1986 年开始，第一架检测器将于 1988 年投入使用。格拉斯哥科学家提出制造臂长为 1~3 公里的倍增干涉仪。同时运行的全长和半长干涉仪也希望能达到与此相近的灵敏度。西德和法国也正在考虑千米尺度的激光干涉仪。

除了地面上所进行的实验外，科学家们还试图精确地追踪宇宙飞船的运动以检测引力波。这种非谐振方法可作为一种补充手段，因为它的目的是检测低频波（ $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 赫芝）。“旅行考 1 号”在 1979 年完成的实验，灵敏度达到 $h \sim 10^{-14}$ ，将来的实验可望进一步改进，再增加两个数量级。

两类检测器都在不断改进。1970 年第一个检测器的灵敏度低于 $h \sim 10^{-13}$ ，现在已达到 $h \sim 10^{-18}$ ，仅仅 15 年就增加了 1000 倍，现在的目标是达到 $h \sim 10^{-22}$ 。

在引力波天文学世纪即将来临的今天，实现这一目标只是时间问题，而引力波的检测实现将会使广义相对论得到进一步的验证。（陆浩聪 编译）