

对 NP0532 引力辐射的尝试性观测^{* 1)}

吕大炯 高建国
(中国科学院物理研究所)

提 要

本文采用同步积累技术,使激光干涉仪对于微小振动振幅的检测能力达到 10^{-13} 厘米的水平;运用这一技术对蟹状星云中的 NP0532 脉冲星可能存在的 60.4 赫兹引力辐射进行了观测,实验表明:未收到这一信息。

一、引 言

引力波天文学至今尚停留在只有理论推测,缺乏实验验证的阶段。当前,引力波实验证实是这门学科的当务之急。

目前关于探测引力波的装置大多仍属韦伯类型,这自然是由于韦伯首先宣称收到引力波信号所引起的。但韦伯的结论,在原有的精度上,现在已被否定^[1]。当然,把韦伯实验做得更精细,例如在 3×10^{-3} K 的极低温度下进行,还是必要的。然而,还应该探索不同的实验途径,选择不同的观测对象,使用不同的检测手段,从较为广泛的角度进行研究,以期突破。

就观测对象而言,韦伯型实验的频率大多选择在 1—2 千赫兹的范围。诚然,在这个频段上的引力波可能是存在的。但是,发射源到底在哪里,有什么特征等问题,至今尚无明确的理论预言。所以,韦伯型观测只能是巡天式的搜索。即使观测到可疑信号,也难以对其中的非引力波所致信号进行排除。

相反,如果选取理论预言比较清楚的发射源作为观测的对象,就便于进行观测与理论之间的对证,从而得到明确的结论。已预言的单色稳定源,有密近双星及脉冲星等天体。这些源的空间位置、运动方式、特征频率以及发射强度等都已较好的估计。虽然它们发射的引力波都相当弱,与现在可能观测的能力还有距离,但存在这样多的标志,可供设计实验时充分利用,的确是有利的一面。所以,选择它们作为观测对象,是个值得努力的方向。另外,就引力辐射的强弱而言,不同的引力理论估计也存在差异。因此,究竟要多高的灵敏度才能观测到引力辐射,这要由实验来决定。

我们选择 NP0532 作为观测对象,除了上述理由之外,还有两点:

1. NP0532 的辐射强度,在这类源中是比较强的一个;
2. 在已知的单色源中,它的引力辐射频率最高(达 60.4 赫兹)。其他脉冲星大多在 1 赫兹以下。双星源的频率就更低了。频率太低在探测技术上会有困难。

* 1975 年 8 月 25 日收到; 1976 年 1 月 30 日收到修改稿。

1) 于景波、方励之、邹振隆、陈一询等同志参加了部分工作。

如所周知, NP0532 是蟹状星云中心的一颗脉冲星, 它是公元 1054 年我国宋朝天文学家记载的一颗超新星爆发的产物¹⁾, 从发现到现在尚不及千年. 现射电辐射脉冲周期为 33.09 毫秒, 即频率 $\nu = 30.2$ 赫芝. 在红外光、可见光、X 射线及 γ 射线等波段也观测到同样周期的辐射. 转动的磁化中子星是它的较好的模型. 如果它有一定的椭率, 则将发生引力四极矩辐射, 辐射频率为 $2\nu = 60.4$ 赫芝, 辐射强度的理论估计是^[2]

$$P = \frac{32G(2\pi\nu)^6 I^2 e^2}{5C^3} \cong 10^{45} e^2 \text{ 尔格/秒}.$$

其中, G 为引力常数, I 为星的转动惯量, e 为椭率, 其具体数值按不同理论计算有所差别. 但注意到, NP0532 的脉冲周期有跃变 (glitch), 说明它还处在较活跃的不断变动状态, 其椭率应是较大的, 估计在 10^{-4} 左右. 因蟹状星云距地球约七千光年, 所以它的引力波在地球处的能流大约为 10^{-8} 尔格/秒·厘米². 最高的估计达到 10^{-5} 尔格/秒·厘米², 经过努力, 探测这种强度的信息, 并不是不可能的.

二、探测原理及方法

我们采用的是激光引力波探测器^[3]. 它的基本原理就是使用激光干涉方法度量两个分离物体因引力波所引起的相对位移.

在垂直于引力波传播方向上, 两个物体的距离受到频率为 ν 的单色平面引力波的作用后, 也将以频率 ν 随时间变化. 变化的幅度比例于入射波的振幅, 利用干涉测距方法来检测这种位置的变化.

这里可能会引起一个问题, 按照广义相对论的观点, 引力波所导致的位置变化, 是描写引力波的时空度规变化的结果. 这种度规变化不仅会影响待测物体的尺度, 而且要影响探测物体的尺度. 这样, 是否由于两者尺度的一起变化, 而使引力波的光学干涉测量方法在广义相对论的体系内原则上失效呢?

情况并非如此. 首先, 按照广义相对论的测量理论^[4], 无论在怎样的度规下, 两个邻近物体的距离, 原则上就是依靠光信号在两物体间往返一次的手续来规定的. 所以, 在引力波作用下用光信号测量距离, 不仅是可以的, 而且是一种最接近理论要求的方法. 它的测量方法与理论原则之间的关系最为简单直接. 就这一点说, 与韦伯的压电换能方法相比, 可以说是光学测量方法的一个优点.

进一步分析, 设想两个相邻近的物体 A 及 B , 处在引力波范围中, 都作自由运动, 即沿测地线运动. 如果观测者在 A 上测量 B 的运动, 他取跟随 A 的局部惯性系坐标, 则 AB 的相对位置坐标 ξ^α 满足测地偏离方程

$$\frac{d^2 \xi^\alpha}{ds^2} = R_{00\beta}^\alpha \xi^\beta,$$

其中 $R_{00\beta}^\alpha$ 是黎曼曲率张量. 当有引力波时, 曲率张量不为零. 这个方程就描写了 AB 间

1) 关于这颗超新星的爆发, 我国古代史料中有多次详细的记载. 其中记载最早的是北宋元丰四年(公元 1081 年)成书的《宋会要》, 该书中说: “嘉祐元年三月(公元 1056 年 5 月), 司天监言: ‘客星没, 客去之兆也.’” 初, 至和元年五月(公元 1054 年 7 月)晨出东方, 守天关. 昼见如太白, 芒角四出, 色赤白. 凡见二十三日”.

的距离在引力波作用下的变化。另一方面,在 A 的局部惯性系中,光的运动性质仍与狭义相对论中全同。所以,通常光的传播性质或相干性质仍然保持。干涉测距方法的根据并不因引力波的出现而失效。

这说明,使用通常的干涉测距概念要注意两个条件: 1. 跟随 A 的参考系,应取惯性系,例如不能取转动系; 2. 测量范围应限于 A 的邻域,即应比时空弯曲的特征尺度小得多的范围。这两点在观测弱引力波时都能很好地满足。当然,上述讨论中,假定了 AB 二者作自由运动。这在地球实验室中是达不到的(在空间实验室中较好,如以地月系统作为 AB 二物,就较接近假定的条件), A 及 B 总要受到某些外力,这就使问题的定量分析变得复杂一些。尽管如此,就干涉测量是否原则上可用这一点来说,结论仍然不变。

本实验的具体探测方法如下。

把激光直角干涉仪放在一个五吨重的减震转台上,对此转台上的干涉仪臂的方位用经纬仪通过观测北极星并使用天文年历校正而进行定位。

NP0532 的“升”、“落”位置由南点计算分别为 $\pm 119^{\circ}15'36''$, 1975 年 6 月 1 日其“升”起时间为凌晨 5 时 36 分 45 秒(北京时间),以后每天提前 3 分 56 秒。

在进行观测时,把激光干涉仪的一个臂转向“升”(或“落”)的方位。这个方位也即引力波入射的方向,则另一个臂与此方位垂直。观测时间取当天“升”(或“落”)在地平线上的时刻的前后 1 小时,也即引力波入射方向与激光干涉仪所在平面的夹角不大于 $\pm 15^{\circ}$ 。

由于引力波具有横波的特征,因此垂直于引力波入射方向的那一个干涉仪臂的程长就被引力波的频率所调制,而沿着引力波入射方向的那一个干涉仪臂的程长并不发生变化。由这两臂的干涉所形成的干涉条纹也作相应频率的振动。这振动信息叠加在涨落噪声上,通过选频及检波变为噪声的直流成份、信号的直流成份与剩余涨落叠加的输出,经过采样及累加,予以记录。

然后,把减震转台旋转 45° , 此时干涉仪两臂上引力波所产生的振动分量相等,干涉条纹并不发生相应的振动,只有涨落噪声本身,通过选频及检波变为噪声的直流成份与剩余涨落叠加的输出,同样经过采样及累加后予以记录。

为了克服仪器的慢漂移,上述两个方位的数字记录交替进行。如果用某种方法把噪声的直流成份除去,则这样的系统可以看作是一个具有两通道的空间分隔的同步积累器: 其中一个通道只具有随机涨落噪声; 另一个通道,则在随机涨落噪声上叠加了一个信号。根据同步积累法^[5], 可以从噪声中检测出弱小信号。

三、探 测 装 置

本实验用的探测装置如图 1 所示。激光器是腔长为 150 毫米半内腔式带有压电陶瓷稳频的氩-氖激光管; 干涉仪为改进式的迈克耳逊干涉仪; 光电接收采用两个 3DU5C 型硅光敏三极管,它们组成直流电桥的两个臂。以上这些设备均放在减震转台上。

电桥的输出同时供给三路: 第一路是平衡电桥的直流零点,由数字电压表指示; 第二路供给控制电桥直流零点漂移的伺服系统。这种漂移是由于温度变化、减震转台转动及其他原因所引起的。通过装在一臂上的压电陶瓷加以补偿; 第三路是电桥交流输出,经低

噪声前置放大器(它紧接着电桥的输出,也被放在减震转台上)、选频放大器(由中心频率为 60.4 赫芝、带宽为 1 赫芝的音叉滤波器及宽带放大器组成)、检波器,到数字电压表。经数字电压表采样,由电压转换成脉冲串,输出给十进制制计数器,数字电压表的复位指令脉冲驱动五十进制制的计数器,并进而控制十进制制计数器的闸门,使其在累计五十个脉冲串后,关闭闸门,停止计数,同时显示数字。在闸门关闭期间,缓慢转动减震台。

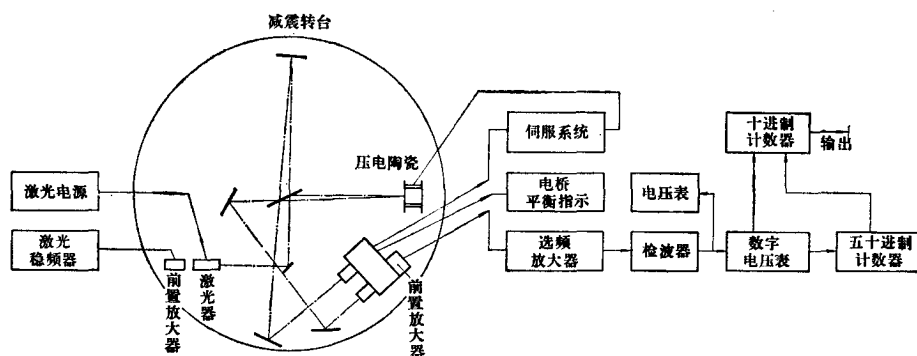


图 1 激光引力波探测器装置示意图

四、观测结果及数据处理

对 NP0532 的 60.4 赫芝引力辐射进行了观测。共进行了七天,每天获得一组数据。

1. 每天的数据处理

首先,对每组数据进行舍弃检验和相关系数分析。

舍弃检验 在实验中有时出现偏离均值较大的数据,对这些个别数据进行了应有的舍弃^[6]。我们认为在本实验中“舍弃”所对应的物理内容为:偶然的外界干扰。数据的测量是在电桥平衡零点指示处于极性为正负相间的情况下取得的。我们的伺服系统只能补偿慢变化,对于较快的变化,补偿不完全,结果就会明显变坏。

相关系数检验 用电子计算机对数据的相关系数进行了计算。结果表明,数据可以近似地认为是独立随机变量。

根据上述结果,我们采用以下简单模型:

$$y_i = x_i + a_i + e_i \quad (\text{指向蟹状星云的方向}),$$

$$y_i^* = x_i^* + e_i^* \quad (\text{偏转 } 45^\circ \text{ 的方向}),$$

其中 y_i 和 y_i^* 分别表示对应于某一方位的观测数据, x_i 和 x_i^* 表示仪器的慢漂移。在此,可以认为它们是同一个随时间缓慢变化的随机过程,即有 $x_i \approx x_i^*$ 。 a_i 表示信号(对应于小于 5% 的错误概率)或者伪信号(对应于大于 5% 的错误概率)的大小,它可以是一个随时间具有微小变化的量。 e_i 和 e_i^* 表示其他的涨落(即相应于 x_i 而言是频率较高的随机噪声)。

由于两个方位的测量不是同时进行的,所以我们将数据进行内插修正。计算公式为

(1) 差值均值的估计(即信号或伪信号,单位是伏)为

$$\bar{a} = V_i - V_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*),$$

其中 V_i 和 V_n 分别为指向蟹状星云和偏转 45° 方位的观察数据的均值。

(2) 差值均值估计的均方误差(单位是伏):

$$S_{\bar{a}} = \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad \text{其中 } S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^* - \bar{a})^2.$$

由于不同天的等效噪声位移 $\Delta\chi$ 也有所不同, 为了便于比较, 对这样的非等精度数据进行变换。

$\bar{a}^* = \bar{a} \cdot \Delta\chi / V_n$ (米), $S_{\bar{a}}^* = S_{\bar{a}} \cdot \Delta\chi / V_n$ (米)。结果如下表:

编 号	伪信号($\times 10^{-15}$ 米)	均方误差($\times 10^{-15}$ 米)
No. 4010	-1.5	15
No. 4020	-1.2	23
No. 4030	+3.0	14
No. 4040	+0.2	18
No. 4050	+1.5	12
No. 4060	+2.8	11
No. 4070	+4.4	15

2. 七天的数据处理

对这些数据进行符合检验^[6], 结果表明它们是符合的。

然后, 求这些值的总平均值的估计及其均方误差。计算公式为

$$\bar{a} = \frac{\sum(\bar{a}^* / S_{\bar{a}}^{*2})}{\sum(1 / S_{\bar{a}}^{*2})}, \quad S_{\bar{a}} = \frac{1}{\sqrt{\sum(1 / S_{\bar{a}}^{*2})}}$$

我们所获得的实际结果为

$$\bar{a} = 1.8 \times 10^{-15} \text{ 米}, \quad S_{\bar{a}} = 5.4 \times 10^{-15} \text{ 米}.$$

因此, 从七天的数据中表明, 在仪器检测能力范围内, 没有发现频率为 60.4 赫芝的连续引力波。

五、结果及讨论

在已发表的探测引力波的实验工作中, 据我们所知使用激光干涉法的只有 Moss 等人的工作^[7], 他们的精度达到 $\delta l \approx 10^{-13}$ 厘米^[8]。但是他们的目的是为了验证韦伯所观测的脉冲引力波, 没有进行 60.4 赫芝引力波的探测。对于连续引力波, 本文使用激光干涉仪采用同步积累技术可达到 10^{-13} 厘米的检测能力。观测表明, 没有发现与蟹状星云有关的这一信息。另外, Levine^[9] 曾经利用激光拍频方法对 NP0532 的 60.4 赫芝信号进行过观测, 也没有发现信号。这与本文的结果一致。

现作以下三点讨论。

1. 与 Moss 或 Levine 相比, 本文的特点在于: 如果观测结果表明出现可疑信号, 本实验装置可以进行一系列的排除性实验, 以鉴别是否为引力波所致。

(1) 关于时间信息排除 我们可以在蟹状星云中心残核 NP0532 不处在地平线上,而处于子午面附近时,作同样的这两个方位的实验.

(2) 关于空间信息排除 我们可以在 NP0532 处于地平线上时,选取另外两个互成 45° 的方位,作同样的实验.

(3) 关于频率信息排除 我们还可以通过改变接收机的频率,而时间与方位仍按照观测的要求再作实验.

如果在时间、空间及频率这三个主要信息量上均作了排除,并且观测数据又能够较好地重复,则可以较肯定地说,在现有灵敏度下,基本上有或基本上无. 因此,本实验方法具有较好的排除性效果,即它可对最终检验是否引力波提供较为可靠的判据.

2. 关于量子涨落噪声问题, Moss 给出了一个等效噪声位移的公式. 实际上这是光电元件散粒噪声的公式. 在我们的实验中它的等效位移量级为 10^{-12} 米.

真正的光量子性质的起伏噪声表现为激光相角上的涨落. 对于单模激光,在 t 时间内相角涨落^[10]为

$$\sqrt{\delta\varphi^2} = \frac{2\pi\nu}{Q} \sqrt{\frac{h\nu t}{P}},$$

其中 Q 为激光腔模的品质因子,其值约为 10^7 , ν 为激光频率, $h\nu$ 为光子能量, P 为激光功率. 所以量子噪声引起的等效位移为

$$(\Delta\chi)_Q = \lambda \frac{\delta\varphi}{\varphi} = \lambda \frac{1}{Q} \left(\frac{h\nu}{P\tau}\right)^{1/2} \approx 10^{-20} \text{ 米},$$

其中 λ 为激光波长.

激光腔的热噪声(短期稳定性)反映在激光频率的稳定性上,由于 $\Delta\lambda/\lambda < 10^{-8}$, 所以它的等效噪声位移(考虑干涉仪的作用)为 $(\Delta\chi)_1 \lesssim 10^{-16}$ 米.

而对于温度变化及其他慢漂移(长期稳定性)引起激光功率的慢漂移,反映在输出中则为直流成分的慢变化.

以上讨论了装置本身的各种主要噪声来源. 可以看出,散粒噪声是主要的. 而它正是能用积累或增加激光功率的方法加以克服.

关于探测装置的灵敏度问题. 如果把灵敏度定义为一次采样(时间常数为 τ)时探测器可感知的最小位移 $(\Delta\chi)_s$, 那么它就是在 τ 时间内能产生一个光敏电子的位移,即

$$(\Delta\chi)_s \cong \frac{hc}{\eta P\tau} \cong 10^{-19} \text{ 米},$$

其中 $\eta \cong 10^{-3}$, 即光敏三极管的量子效率, $P \cong 0.24$ 毫瓦即激光功率, $\tau \cong 1$ 秒.

当 10^{-12} 米的等效噪声水平在数字电压表上相当于几百毫伏的输出时,上述信号位移相当于几十毫微伏的输出. 因此,实际信号灵敏度受数字电压表有效位数(及实际允许的累积次数)的限制. 在我们的仪器中其等效位移为 10^{-15} 米量级. 这和一般仪器的精度概念不同,它是随激光功率的增加而成反比例的减小.

除了上述噪声及仪器“最小刻度”之外,还可能有系统误差及干扰. 例如,两个方位上的系统误差,未知的固定外源的干扰及不固定的干扰. 为了排除系统误差或固定外源干扰,可以采用前面所述的排除性实验的方法. 为了排除不固定的干扰,可以采用重复性实

验的方法。

3. 对于本实验结果, 自然与理论没有任何矛盾, 但是为了得到更有理论意义的结果, 还得大大提高仪器的灵敏度。在我们的这项初步工作中, 通过改进可以继续提高精度。例如, 提高激光器单纵横模输出功率; 增加干涉臂长; 使用碘吸收稳频, 以进一步降低频率漂移; 采用真空密封, 以消除气流扰动及外界干扰; 预先寻找引力波的相位以进行同步检波等。特别是, 对于单频引力波, 采用高 Q 值共振天线将显著提高天线截面。对于 60.4 赫芝的频率, 如果使用韦伯型天线, 则约需 42 米之长, 将带来一些技术上的困难。但如果使用音叉状的结构, 就有可能减小尺寸, 以克服某些困难。

参 考 文 献

- [1] *Nature*, **243**-5402 (1973), 61.
- [2] S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology* (1972).
- [3] 吕大炯、王国宗、高建国, *物理*, **4** (1975), 221.
- [4] B. Bertotti, D. Brill, R. Krolkov, *Gravitation: An Introduction to Current Research*, ed. by L. Witten.
- [5] 蔡长年、汪润生, 《信息论》, 人民邮电出版社 (1962), 302 页。
- [6] 冯师颜, 《误差理论与实验数据处理》, 科学出版社 (1964), 36, 66 页。
- [7] G. E. Moss, L. R. Miller, R. L. Farward, *Appl. Opt.*, **10** (1971), 2495.
- [8] T. J. Sejnewshi, *Phys. Today*, **27** (1974), 40.
- [9] T. Levine, R. Slebbins *Phys. Rev.*, **D6** (1972), 1465.
- [10] 方励之、罗一祖, *物理学报*, **20** (1964), 1079.

TENTATIVE OBSERVATIONS ON GRAVITATIONAL RADIATION FROM NP 0532

LU DA-JIONG GAO JIAN-GUO

(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

A synchronised accumulation technique is used to achieve a resolution of up to 10^{-13} cm for the oscillating amplitude of a laser interferometer. Such a technique is applied to observe the 60.4 Hz gravitational radiation which is possibly emitted from the pulsar NP 0532 of the Crab Nebula. Present experiments show that no such signal is received.