

A. Hulse, J. H. Taylor 以脉冲双星 PSR1913+16 的发现获 1993 年诺贝尔物理学奖

邓祖淦

(中国科技大学研究生院, 北京 100039)

PSR 1913 + 16 的发现为我们提供了一个理想的太空实验室, 对它的研究使得我们第一次有机会了解强引力场的性质并与现存理论比较, 它也提供了第一个对引力波存在的定量的证据。爱因斯坦的广义相对论完满地通过了这一系列实验检验。这一获得 1993 年诺贝尔物理学奖的重大成果也提供了一个基础研究与高、新技术结合, 各基础研究领域相互渗透的典型例子。

关键词 脉冲双星, 引力波, 广义相对论

1993 年 10 月 13 日, 瑞典皇家科学院宣布, 将 1993 年诺贝尔物理学奖授予美国普林斯顿大学的天文和物理学家 A. Hulse 和 J. H. Taylor。这是由于他们在 1974 年共同发现了脉冲双星 PSR1913+16, 从而提供了一个检验包括爱因斯坦广义相对论在内的引力理论的理想旋转太空实验室。20 年来, 对这一脉冲双星的监测和研究已提供了迄今唯一的定量证据, 证明了爱因斯坦广义相对论所预言的引力波的存在。

1974 年 9 月, 当时在马萨诸塞大学任教的年仅 33 岁的 Taylor 和他的学生——年仅 23 岁的 Hulse, 在用 Arecibo 305m 口径的大型射电望远镜进行观测时, 发现了一颗脉冲周期约 59ms 的射电脉冲星。根据该脉冲星在空间的方位(赤经: $19^{\text{h}}13^{\text{m}}12^{\text{s}}.47$; 赤纬: $16^{\circ}01'08''.2$) 将其定名为 PSR 1913 + 16^[1]。

脉冲星是一种大质量恒星死亡后所残留下来的遗骸^[2]。大质量恒星演化到晚期时, 会通过剧烈的爆发(超新星爆发)抛掉其外壳。由于遗留下来的核心已没有可供进行核反应的核燃料, 它将在其自身引力作用下塌缩。当其密度达到与原子核密度(约 $10^{14}\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}$) 相当时, 组成它的主要成分变为中子。中子的简并压可以阻止引力塌缩, 最终达到平衡而成为所谓中

子星。一颗质量与太阳相当的中子星的直径只有几公里。Baade 和 Zwicky 早在 30 年代就从理论上预言了可能存在中子星^[3]。

由于中子星已无可供进行反应的核燃料, 它不像通常恒星那样会发出明亮的可见光。因而对中子星的观测成为一个难题。在中子星的存在为理论所预言后的 30 多年里, 人们没有从观测上证实其存在。

后来才知道相当多的中子星还具有极强的磁场, 其表面磁场强度达 $10^{10}-10^{13}\text{Gs}$, 比人类目前能产生的最强的磁场还要强 1 万以上。许多中子星还以非常高的速度转动, 其转动周期在毫秒到十几秒之间。

高速转动着的强电磁场会产生极端相对论性的电子。这些电子在强磁场中运动时会像同步辐射加速器中的高能电子一样辐射电磁波。高能电子发射的这种辐射有很强的方向性。因此, 高速转动的磁化中子星只在沿磁极方向很细的锥内往外发射电磁波。随着中子星的自转, 这一锥形的电磁辐射束就像灯塔发出的光那样绕其自转轴很快地转动。如果在其转动中辐射束正好扫过地球, 地球上的观测者就会接受到一个又一个电磁脉冲。1967 年 7 月, 英国天文学家 A. Hewish 和 J. Bell 第一次发现了这种从太空深处发来的规则脉冲^[4]。观测和

理论上的进一步研究确认这些规则脉冲正是来自一个个高速转动的磁化中子星。根据它们不断发射出周期脉冲这一特点,天文学家把这种星称为脉冲星,其发现者获得1974年诺贝尔物理学奖。

从发现第一颗脉冲星到发现 PSR 1913 + 16 的七年中,天文学家已经对脉冲星进行了大量观测和研究。脉冲星有非常大的转动能量和角动量,因此其转动周期异常稳定。在有的情况下,脉冲星的周期稳定性可以和原子钟相媲美。尽管如此,从长期、准确的测量中人们发现,脉冲星的转动周期随时间仍有微弱的变化。绝大多数脉冲星的周期是缓慢增加的。这表明脉冲星的转动能在减小。计算表明,这种转动能量的减小是与脉冲星由于辐射而损失的能量是一致的。

PSR 1913 + 16 的特别之处在于,在对它的脉冲到达时间进行分析时发现,除了存在着 59ms 的脉冲周期外,还存在着一缓慢变化的周期。这一周期为 0.323 天(或 27906.98s)。Hulse 和 Taylor 立即意识到,他们所发现的这颗脉冲星是处在一个双星系统中^[4]。正是由于脉冲星和它的伴星在相互绕行中径向速度的周期变化,使观测到的脉冲到达时间表现出微弱而缓慢的周期变化。这一缓慢变化的周期也就是脉冲星与其伴星在引力作用下相互绕行的周期。如此大质量的二天体以如此短的周期相互绕行,就构成了一个在地球上(甚至太阳系内)不可能获得的检验引力理论的实验室。

在此之前的广义相对论的验证均是在太阳系内得到的。太阳系中的天体所产生的引力场都非常弱。即使太阳本身,在其表面处表示引力场强弱的量 GM/c^2R 也仅有约 2×10^{-6} 。这使得以前对引力理论进行检验的实验(如水星轨道的进动,光线在太阳附近的弯曲和迟延等)均仅限于检验引力理论在弱场情况下与牛顿引力的微小偏离。这些实验不能提供关于强引力场的情况,因而难以对引力理论提供更严格的限制和判断。在这方面,脉冲双星向我们提供了一个理想的在强引力场下检验引力理论的实

验室^[5]。脉冲星表面处的 GM/c^2R 值约为 0.2,比太阳表面处高约十万倍;脉冲星及其伴星以约 $1,000\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度周而复始地相互绕行,这很适合于利用实验中的平均方法通过长时间观测取得高精度结果;此外,脉冲星所发射的极有规则的脉冲信号为观测该双星系统的运动提供了非常有利的条件。上述一切使得 PSR 1913 + 16 被发现后,立即引起了天文学家和物理学家的密切注意。在我国不少科学家著文对其发现和科学上的意义进行过评述和介绍,例如 1979 年本刊第 2 期^[6]。

图 1 给出了脉冲双星 PSR 1913 + 16 的示意图。图中的脉冲星 PSR 1913 + 16 一方面绕其自转轴以约 0.059s 的周期自转,另一方面又以约 0.323 天的轨道周期与其伴星相互绕行。在自转过程中,每当其辐射锥扫过地球所在方向时,就向地球上的观测者送去一个射电脉冲。

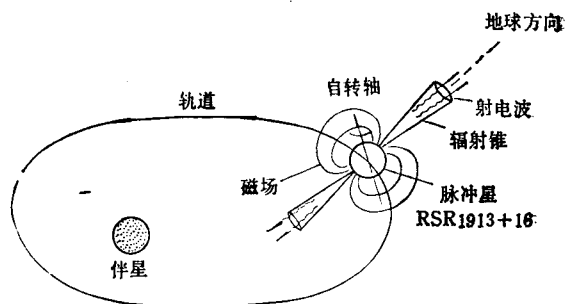


图 1

按照爱因斯坦的广义相对论,这样相互绕行的两个质量应当辐射出引力波。引力波会从双星系统中带走能量,这应导致双星系统中二星相互绕行的周期逐渐减小。比较理论预言的和实验观测的轨道周期的变化,可以检验理论的正确与否。

在实际上进行这一检验无论从理论上和从观测上来看都是极为困难的。地球上的观测者能接受到的只是从脉冲星送来的一个个脉冲信号。科学家必须设法从这些脉冲信号的观测中最终得出轨道周期的变化。为了得到理论上对轨道周期变化的预言,还必须得出关于双星系统的准确的运动学和动力学数据。所有这些都

只能从脉冲到达时间的分析中得出。

为此，天文学家必须首先尽可能准确地确定脉冲周期。要作到这点必须去掉星际介质色散的影响。在此基础上对大量(通常在 10^3 个以上)脉冲同步地平均,可获得高度准确的脉冲周期。但是,所得到的仅仅是地球上测量到的周期。还必须对地球本身运动所产生的影响进行修正。修正后可以得出从脉冲星辐射出的脉冲的到达时间。

从上面得到的脉冲到达时间还必须转换到脉冲星参考系。这一转换除必须考虑脉冲星和其伴星间相互绕行时的轨道运动外,还必须考虑脉冲星的自转以及各种相对论效应。

各种相对论性效应的定量结果应当从双星系统的相对论解来求得^[7,8]。然而,爱因斯坦广义相对论中关于两体运动问题的严格解迄今还未能得出。因此,只能从某种逐级近似解的框架内来进行这种改正并与观测比较。大致说来,两体问题的近似解可以按其运动速度与光速之比, v/c (这是一小量)的不同方秩展开。展开的一阶项相当于牛顿引力下的解;二阶项包括如近星点进动、横向多普勒效应和引力红移等;三阶项包括光传播时间的延迟等;而引力波辐射的效应出现在五阶项中。在太阳系中,由于引力效应非常微弱,即使采用最新的技术也只能检验低阶的效应。PSR1913 + 16 第一次提供我们在更高阶近似下检验引力理论的可能性。

上述各阶相对论效应均与双星系统的轨道和动力学参数(如轨道的偏心率、轨道平面的倾角、脉冲星和其伴星的质量等)有关。从精确测定的脉冲到达时间可以逐个分离出上述效应,从而可以确定这些参数。利用低于五阶的修正可以精确确定上述那些参数。表 1 给出了直到 1992 年为止的这些参数的值^[5,6]。

利用表 1 中的参数值,可以计算出第五阶近似的引力辐射效应和由此引起的双星轨道周期的变化。这一变化可以直接与观测所得出的轨道周期变化比较。图 2 给出了自 1974 年到 1986 年的十余年中理论预期的轨道相移与观

表 1 脉冲双星 1913+16 的观测性质

脉冲发射周期 (s)	$P = 0.059030$
脉冲发射周期变率($s \cdot s^{-1}$)	$\dot{P} = 8.63 \times 10^{-18}$
轨道周期 (s)	$P_b = 27906.98078079$
轨道偏心率	$e = 0.61713096$
轨道偏角	$\sin i = 0.734$
脉冲星质量 (M_\odot)	$m_p = 1.42$
伴星质量 (M_\odot)	$M_c = 1.41$
轨道半长轴 (light sec.)	$a_p = 0.324$

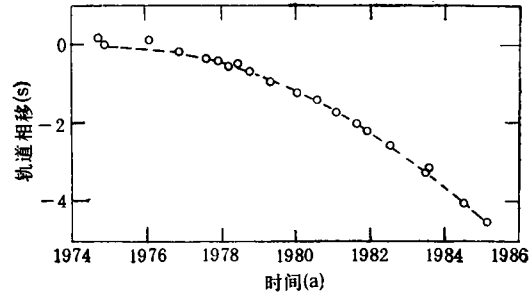


图 2

测结果的比较。二者符合非常之好^[9]。

PSR1913 + 16 的观测结果虽不是对引力波的直接探测,但却为引力波的存在提供了第一个定量的证据。它也提供了第一个对强场下引力理论进行检验的实验室。对它的观测结果对引力理论给出了更强的观测限制。迄今为止,广义相对论通过了所有已知的观测检验,包括对脉冲双星 PSR1913 + 16 的观测检验,而不能给出引力辐射,或引力辐射会使轨道周期增加的所有引力理论则被这一研究所排除。可以通过这一脉冲双星检验的个别其他的非广义相对论引力理论,如 Brans-Dick 理论,也由于要解释 PSR1913 + 16 的观测结果而必须将其中的参数取得使之与广义相对论无太大区别。从这种意义上说,PSR1913 + 16 的发现和其观测结果在引力理论的研究中起了非常重要的作用。

PSR1913 + 16 的观测研究对引力波的存在和引力理论的限制还表明了基础科学的研究与高新技术的发展之间密不可分、相互促进的关系,以及基础研究中不同领域间相互渗透的态势。从中吸取有益的经验对我国科学、技术的发展是很有益处的。

- [1] R. A. Hulse, J. H. Taylor, *ApJ. Lett.*, 195 (1975), L51.
- [2] R. N. Manchester and J. H. Taylor, *Pulsar*, Freeman, San Francisco (1978).
- [3] W. Baade and F. Zwicky, *Phys. Rev.*, 45 (1934), 138.
- [4] A. Hewish et al., *Nature*, 217 (1968), 709.
- [5] J. H. Taylor, et al., *Nature*, 355 (1992), 190.
- [6] 邹振隆, *物理*, 8 (1979), 186.
- [7] G. Börner, *High Energy Astrophysics and Cosmology*, J. Yang et al. (Eds.), Science Press, Beijing, (1983) 175.
- [8] D. C. Backer and R. W. Hellings, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 24 (1986), 537.

无粒子数反转激光研究的进展

高锦岳

(吉林大学物理系, 长春 130023)

概括地介绍了无粒子数反转光放大与无粒子数反转激光的基本概念和原理, 讨论了这种类型的激光对激光科学发展的重要意义, 叙述了自 1962 年以来科学家们所提出的几种实现无粒子数反转光放大及无粒子数反转激光的主要的理论模型和有关的实验进展, 最后介绍了钠原子蒸汽中首次观察到无粒子数反转光放大的实验装置和实验结果。

关键词 无粒子数反转, 原子相干, 光放大, 激光

Abstract

In this paper, a brief introduction to the basic idea and principles of light amplification without population inversion and laser without population inversion is given. The significance of such a kind of laser in the development of laser science is discussed. Several main theoretical models which scientists have suggested since 1962 for the realization of light amplification without population inversion and the related experimental progress on this field are introduced. Finally the experimental set up and the results of the first observation of light amplification without population in sodium are introduced.

key words without population inversion, atomic coherence, light amplification, laser

众所周知, 一个激光器工作时, 要求激光介质在某一频率处的受激发射速率超过受激吸收与腔内损耗的速率, 而受激发射和受激吸收的速率与相应能级粒子数分布成比例。因此, 人们普遍认为, 在谐振腔内产生激光的必要条件就是在介质的激光能级间实现粒子数反转。事实上, 除了同步辐射等少数场合外, 目前正在运转的各种激光器都是在有粒子数反转的条件下工作的。然而, 实现粒子数反转, 对研制激光器来说, 是一个很大的限制。它要求激光上能级必须是一个亚稳态, 具有较长的寿命。在光的

可见区及红外区, 工作物质比较容易找到。而对于短波长区域, 这一条件就很难实现。到目前为止, 短波长激光器甚少的一个重要原因就在于此。如果在无粒子数反转的条件下最终实现光的放大, 乃至研制出无粒子数反转激光器, 那么它将会对激光科学的发展产生巨大的影响。人们就可以按照这一原理制造出目前还没有的新激光器, 从而大大拓宽激光的工作波段和工作物质的选择范围。而且, 它对有关光与物质相互作用的基础科学研究也具有十分重要的意义。