

## 脉冲星和中子星

1967年,英国剑桥大学的天文学家安东尼·休伊什(Antony Hewish)和他的一位年轻女研究生乔斯林·贝尔(Jocelyn Bell)一起,用他们的射电望远镜偶然记录到一种来自某个天体的射电脉冲信号。这些信号极有规律:每个脉冲仅持续约1/30秒,脉冲周期则为1.33730109秒——精确到一亿分之一秒!

不久,休伊什和贝尔又找到3个发来类似射电脉冲的天体。1968年初,他们重新检查了长达5000米的观测记录纸,最终断定脉冲的来源乃是某种前所未有的新型天体——即日后所称的“脉冲星”。迄今所知的脉冲星已逾550颗。

脉冲星究系何物?这曾使天文学家们深感困惑。有人甚至设想:这些奇特的脉冲信号会不会是其他星球上的智慧生物发来的电码?然而,更深入的分析否定了这种想法。后来查明,脉冲星其实就是人们早在20世纪30年代已从理论上预言的“中子星”——一种几乎完全由中子构成的天体,其主要特征是:密度特大、体积特小、自转特快、可以拥有特强的磁场。

中子星是某些恒星演化到晚期的产物。1934年,美国天文学家巴德(Walter Baade)和瑞士天文学家兹维基(Fritz Zwicky)提出:超新星爆发后,恒星中

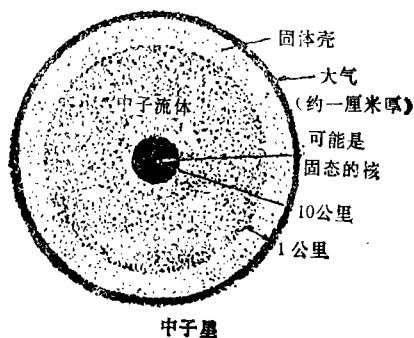


图1 中子星的直径仅约一、二十千米,质量却大于太阳,其物质密度可高达每立方厘米10亿吨以上。中子星有一层厚约1千米的固态铁外壳。再往里是由中子组成的流体,其密度虽然极高,却具有超流的特性。中子星核心部分的情况目前尚不很清楚,那里的物质也许由比中子更重的超子构成,密度也可能更高。

的残留物质在向内的强大压力作用下,其原子核外的电子全都被“压入”原子核

## 1993年诺贝尔物理学获奖项目 脉冲双星与引力波



· 下 每流 鹿 湾 ·

内,与质子结合而形成大量的中子,结果,恒星除了外壳部分主要就是由紧密地挤在一起的中子组成,故名“中子星”(图1)。

中子星的直径仅约10~20千米,却包含了大于太阳的质量,因而其物质密度可高达 $10^{14} \sim 10^{15}$ 克/厘米<sup>3</sup>。中子星的表面磁场强度可达 $10^{12}$ 高斯以上。当带电粒子在中子星的强磁场中运动时,顺着中子星的两个磁极方向就各发出一束射电波。随着中子星快速自转,这两束射电波就周而复始地在空间扫射;当它扫到地球上时,天文学家就会接收到一次射电脉冲(图2)。

中子星的存在是现代物理学的重要预言,脉冲星的发现则为此提供了有力的证据。1974年,休伊什因“对射电天文学的开拓性研究和在发现脉冲星方面的决定性作用”而荣获诺贝尔物理学奖。乔斯林·贝尔虽未分享这项科学上的最高荣誉,人们却并未忘怀她的功绩。在一本名为《脉冲星》的学术专著扉页上就



灯塔

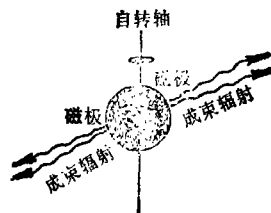


图2 如果中子星的磁轴和自转轴不重合,那么从两个磁极发出的束状射电辐射就会随中子星的自转而在太空中扫射。这种波束每扫过地球一次,我们就可以记录到一个射电脉冲。这种情形很像大海上的灯塔发出的光束扫过远方的船只,所以常被称作“灯塔效应”

卞毓麟,中科院北京天文台,邮编:100080

有这样的题词：“献给乔斯林·贝尔，没有她的聪明和百折不挠，我们就分享不到研究脉冲星的幸运。”

### 脉冲双星

彼此间在引力作用下相互绕转的两颗恒星称为“双星”。双星中的每一颗恒星都称为该双星系统的一个“子星”。有时，人们也把双星中质量较大、或因其他缘故而居主导地位的那颗子星称为“主星”，另一颗子星则称为它的“伴星”。

如果双星中有一颗子星是脉冲星，那么它就叫做“脉冲双星”。虽然普通的双星比比皆是，脉冲双星却非常罕见。直到1974年——正是休伊什获得诺贝尔奖的那一年，才由美国天文学家小约瑟夫·胡顿·泰勒（Joseph Hooten Taylor, Jr.）和他的研究生拉塞尔·艾伦·赫尔斯（Russell Alan Hulse）发现了第一个脉冲双星，它的名字叫PSR1913+16，位于天鹰座内；这里PSR是“脉冲星”的标识符，1913表示它的赤经近似为19小时13分，+16表示其赤纬近似为+16°。用赤经和赤纬标记一个天体在天球上的坐标，其方法与用地理经纬度标记一个地点在地球上的坐标几乎完全相同。

泰勒和他的同事们测出PSR1913+16的脉冲周期约为0.059秒，两颗子星互相绕转的轨道运动周期则为0.32天。正是由于这项发现，以及由此引发的有关研究成果，使得1993年的诺贝尔物理学奖再次颁给了研究脉冲星的天文学家。

然而，脉冲双星的重要意义究竟何在呢？

### 引力波

泰勒和赫尔斯是因“共同发现脉冲双星从而为有关引力的研究提供了新的机会”而获奖的。这里，更具体地说，“新的机会”是指引力波的探测。

早在1918年，爱因斯坦就基于他本人不久前创立的广义相对论预言了引力波的存在。正如带电物体作加速运动时会辐射电磁波那样，具有质量的物体作加速运动时也应该辐射引力波。广义相对论预言的引力波的主要特征为：它也象电磁波那样是横波，远离波源处为平面波，在真空中以光速传播；辐射强度极弱，贯穿性极强；有两个独立的偏振态，最低级次为四极辐射等。

由于引力波与物质的相互作用极弱，因而极难探测。及至20世纪70年代，在非量子物理领域内，可以说几乎所有最重要的理论预言均已被证实，唯独引力波依然“逍遥法外”。在地球上不可能建造供实验用的引力波源，因为即使把整个地球的质量都用上也还是无济于事。

然而，在地球实验室中无法施行的实验，在天然的“宇宙实验室”中却有可能实现。宇宙间大致有三种类型的引力波。第一种是引力波背景辐射，它由整个宇宙史、特别是包括极早期宇宙在内的各个时期中的各

种物理过程遗留下来的引力辐射迭加而成。这种引力波的作用有如一种“噪声”，它与其他噪声极难区分，因而几乎无从测量。

第二种是脉冲式或扰动式的引力波。例如超新星爆发，致密天体的坍缩，活动星系核中的剧烈扰动等，都可以发出这种引力波。其特征是强度较大，有利于探测；但时间短暂、频带很宽，又使探测变得十分困难。1987年2月23日，在离我们最近的河外星系“大麦哲伦云”中出现了一颗超新星（SN1987A）。它距离地球16万光年，其内核坍缩时发出的引力辐射理应被人们探测到。国外有一个研究小组确曾在1987年宣称接收到了来自SN1987A的引力辐射；可惜，当时世界上为数不多的引力波探测器均未处于理想的工作状态，因而无法对该小组宣布的结果作出旁证。总之，对于此类引力波的探测，至今尚未获得任何明确的结果。

第三种是稳定的、频率确定的引力波，例如双星的两颗子星互相绕转时发出的引力辐射。倘若双星的两颗子星质量都足够大，彼此之间的距离又足够近，那么它们互相绕转的速度和加速度就很大，由于辐射引力波而失去能量、从而使轨道缩小、周期变短的效果就会相当明显。观测此类双星的轨道周期变化率，将能间接、然而定量地检验引力波之存在与特征。

正是在这件事上，PSR1913+16作出了特殊的贡献。

### PSR1913+16

有许多因素——例如两子星间的潮汐相互作用、物质交流等——都可以引起双星轨道运动周期的变化。只有那些以引力辐射作用为主的双星系统才适合于用来检验引力波。PSR1913+16是迄本世纪70年代为止满足如上节所述的那些条件的唯一目标。泰勒等人从1974年到1978年用著名的阿雷西博天文台305米直径的巨型射电望远镜，对PSR1913+16进行了上千次观测，使许多数据的观测精度达到了百分之几，并推算出其轨道运动周期缩短的变化情况。在排除了其他因素之后，该双星系统每转一周，其周期大约减小原来值的万亿分之三。这在观测精度范围内正好与广义相对论预期的理论值相符。因此人们常说，自从引力波理论提出以来，经过整整60年才终于获得了第一个定量证据——尽管是间接的证据。

翌年，相对论的缔造者爱因斯坦百年诞辰，各国科学家纷纷聚会纪念。在回顾相对论的发展历程时，人们不约而同地都推许PSR1913+16间接定量证实引力波的存在乃是晚近相对论物理学中最重要的事件之一，也是对爱因斯坦本人的特殊纪念。

此后，泰勒等人继续对PSR1913+16进行观测。及至90年代初，对这个脉冲双星的了解又较前大有进步，下面列出它的一些主要特征：

两子星的质量均约为太阳质量的1.4倍；

轨道运动周期  $P_b = 27906.9807804$  秒;  
轨道运动周期变率  $\dot{P}_b = -2.422 \times 10^{-12}$ ;  
广义相对论预言的轨道运动周期变率  
 $\dot{P}_b' = -2.402 \times 10^{-12}$ ;

实测和理论轨道周期变率符合精度  
已明显优于  $10^{-2}$ ;

脉冲周期  $P = 0.059029997929613$  秒

到 1993 年为止,已发现的脉冲双星约有 30 个。除 PSR1913+16 外,两子星相距甚近,故轨道运动周期甚短者尚有数例;但是,在那些事例中,脉冲星的伴星都不是致密天体,这时很难将由引力辐射造成的轨道周期变化与由两子星间的潮汐相互作用或物质交流导致的轨道周期变化区分开来,因而不适合于检验引力波理论。另一方面,有些脉冲双星的两个子星确有可能都是致密星,因而引力辐射相对于其他效应占压倒优势,但是两子星互相绕转的轨道运动周期太长,也就是说它们彼此离得太远,因而同样不利于对引力波理论作出有效的检验。

时至今日,PSR1913+16 依然得天独厚:它的两颗子星都是致密天体——中子星,而且彼此非常靠近——两子星间的平均距离尚不足 200 万千米。因此,对定量检验引力波而言,它依然居于“舍我其谁”的特殊地位。

然而,近年来在这场竞赛中,又出现了一位“新秀”,它就是 1990 年才被发现的 PSR1534+12。这个脉冲双星的轨道周期是 36351.70270 秒(仅约 0.42 天),可见两子星彼此也很靠近;两子星的质量均约为太阳质量的 1.3 倍。这些都与 PSR1913+16 相当接近。眼下尚需进一步积累观测资料,方能较为准确地推算出 PSR1534+12 的轨道运动周期变率。预期其前景也是相当引人注目的。

#### 泰勒和赫尔斯

泰勒和赫尔斯这两位 1993 年度诺贝尔物理学奖得主都不是那种特别富于戏剧性的人物,他们那种典型的科学家生涯也表明了这一点。

泰勒 1941 年 3 月 29 日生于美国费城,1963 年毕业于宾夕法尼亚州的哈弗福德学院;1968 年在哈佛大学获博士学位(天文学)。1968—69 年在哈佛大学哈佛学院天文台任天文学讲师并从事研究工作;1969—1976 年在马萨诸塞大学任天文学助理教授和副教授,1976—81 年任教授。1981 年至今任普林斯顿大学物理学教授,研究领域是射电天文学,设计和发展射电望远镜与信息处理系统,对脉冲星研究造诣尤深。

赫尔斯 1950 年 11 月 28 日生于纽约城。1972 年毕业于马萨诸塞大学;1975 年在马萨诸塞大学获博士学位,其导师正是泰勒,他们当时的研究课题最终导致了荣膺诺贝尔奖。赫尔斯于 1975—1977 年在美国国家射电天文台从事研究工作;1977 年赴普林斯顿大学,先担任技术人员,1980 年始转任研究物理学家,1984 年至今为该校等离子体物理实验室的研究物理学家,主要工作领域是托卡马克受控热核聚变等离子体中的粒子迁移和原子过程的计算机模型研究。因此,他早已离开了脉冲星研究,而且事实上也是离开了整个天文学研究。

诺贝尔物理学奖的评审工作是非常慎重、非常严格的。尽管多年来时有对该奖评选结果的种种议论甚至厚非,但是整个评选过程的保密工作却几乎无瑕可击;难怪有的获奖人在正式得到获奖通知时竟然惊愕得不知所措。这一次,泰勒和赫尔斯也不例外。1993 年 10 月 13 日泰勒获悉得奖后,在接受路透社记者的电话采访时说,“这件事简直让人惊讶得目瞪口呆”,赫尔斯则觉得此奖仿佛自天而降,这尤其是因为他记忆犹新的这项发现经过了漫长的 19 年,却忽然“一步登天”。

愿当代天体物理学为整个物理科学作出更多的贡献;愿更多的天文学家荣获今后的诺贝尔物理学奖。我总是在想,倘若诺贝尔九泉有知,那么当他看到今日天体物理学如此辉煌的成就时,会不会在兴奋与激动之余,决定再次另立遗嘱,而专为天文学设立一份单独的奖金?

## 我国物理学有关领域的发展趋势

在“21 世纪中国物理学”系列研讨会上,与会专家分析了物理学研究现状,预测了未来的发展趋势。

在等离子体物理研究中,核聚变研究将具有重要的科学价值,在 21 世纪中叶可能应用于能源方面;激光聚变将有重要的军事应用;建立等离子体的基本理论框架;计算等离子体将与基础等离子体并重。原子分子物理在 21 世纪的主要前沿将是原子分子高分辨激发态和电离态结构及动力学;原子分子团簇;原子分子工程和单原子操作。核自旋体系从方法到原理上仍是一个值得深入研究的物理体系。

大科学方面,我国重离子加速器、正负电子对撞机、同步

辐射装置将会升级并有发展潜力;在交叉科学和应用科学研究中大科学设施将得到充分利用。

在凝聚态物理中,计算凝聚态物理及其与材料科学的关系将得到重视;单电子隧道效应、纳米材料发光、纳米流变学这些前沿领域将对发展超微器件有重要的意义;“有机超导体”将成为高温超导的研究方向;非周期系统和蓝移现象等也将成为重要的研究方向;重费米子、电荷密度波、高温超导体的正常态反常机制尚待突破。

(欣悦 编)