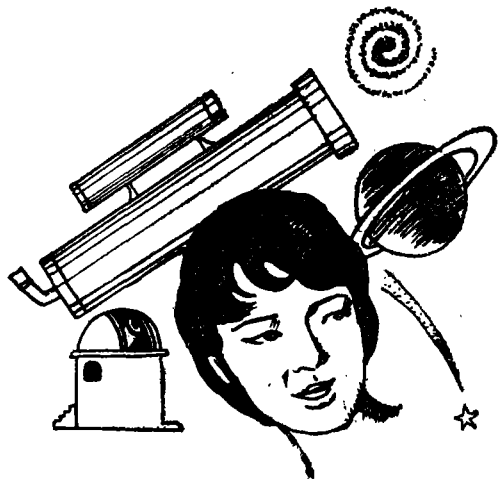


已获辉煌 继续辉煌

——脉冲星研究的科学意义

温学诗 吴鑫基



脉冲星是 20 世纪 60 年代轰动全球的天文学四大发现之一。它是由英国剑桥大学射电天文台的休伊什教授和他的学生贝尔于 1967 年在研究“行星际闪烁”时偶然发现的。休伊什并因此而获得了 1974 年度的诺贝尔物理学奖。也就在休伊什获得诺贝尔奖的同一个年头里，美国的天体物理学家泰勒和他的研究生赫尔斯又发现了第一个脉冲双星 PSR1913+16，他们也因此而荣获 1993 年度的诺贝尔物理学奖。

在不到 20 年的时间里，仅脉冲星这一个课题就接连两次摘取了诺贝尔物理学奖的桂冠，这不能不引起全世界各国各界人士对脉冲星的广泛注意，同时也足以说明脉冲星研究的意义之重大及它所获得的成就之辉煌。

自 1967 年至今，陆陆续续发现的脉冲星总数已超过 550 颗。其中有不少具有特殊意义的脉冲星，如图 1 所示。第一颗脉冲星和第一个脉冲双星都是在射电波段（即无线电波段）发现的，人们对脉冲星的观测研究也主要集中在射电波段，故又称之为射电脉冲星。只有少数射电脉冲星在光学、X 射线和 γ 射线波段有脉冲形式的辐射。脉冲星的研究涉及到许多学科的一系列重要理论问题，它与现代物理中的等离子体物理、广义相对论、基本粒子，致密态物理等密切相关。另外，脉冲星在天体演化学的研究中也占有特殊的地位。脉冲星在天文学和物理学上的重大意义使它的研究成为当今天体物理学最活跃的领域之一。

对于脉冲星的研究成就及其重大的科学意义，我们可以大致总结归纳为以下八个方面：

（一）脉冲星与中子星物理

中子星是早在 1932 年就由科学家从理论上预言的一种致密天体，那时人类刚刚发现中子不久，但是从 30 年代到 60 年代中期这 30 多年的漫长岁月中，人们始终没有找到中子星究竟在哪里，也不敢确认宇宙中究竟存在不存在中子星。射电脉冲星于 1967 年被发现之后，很快就被论证为是快速自转的中子星。脉冲星的发现解开了长期未解的中子星之谜。

与一般恒星相比，中子星的性质非常独特。它的质量大约相当于一个太阳的质量，但它的半径只有 10 公里，磁场可高达 10^{12} 高斯。中子星集超高密、超高压、超强磁场、超强辐射、超高温等极端物理条件于一身，为人类提供了一个研究这些现代物理问题的天然的、理想的天空实验室。

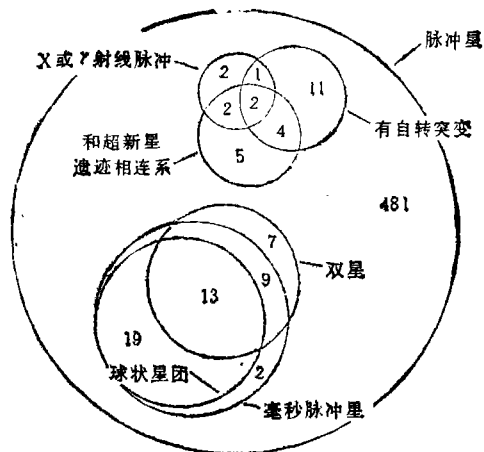


图 1 1993 年统计的 558 颗脉冲星的分类情况

中子星是正常恒星走向“死亡”时的产物。恒星演化末期,按其质量可演化为三类天体:白矮星、中子星和黑洞。超新星爆发可形成中子星。爆发时,外部的物质被炸出去,形成星云,内部坍缩,形成中子星。中子星也可由白矮星吸积物质后引起的坍缩而宁静地产生。

中子星已不再像正常恒星一样燃烧核燃料,只能靠消耗其自转能维持其辐射。因此,中子星的自转是逐渐变慢的。但是目前人们也观测到一些偶发的自转加快的现象,英文中把这种现象称为 Glitches,中文则叫“(脉冲星)自转突变”。已在18颗脉冲星中观测到自转突变(见图1),而船帆座星云中的脉冲星则在23年中观测到8次,表明在这里这种现象是重复出现的。人们分析这种现象是中子星内部结构发生了某种突然变化,如角动量的转移等。“自转突变”现象为人们提供了一个有价值的工具去研究极端高密的简并物质的特性。

(二) 射电脉冲双星和引力波的验证

爱因斯坦1916年在他的广义相对论中预言宇宙空间中可能有引力场及引力波的存在。引力波的探测引起了许多科学家的兴趣,然而,由于引力辐射极弱,人们在地球上的实验室中无法发射可供探测和研究的引力波,同时也没探测到宇宙空间中的引力波。因此,半个多世纪以来引力波一直是令科学家们深感困惑的难题。脉冲双星的发现为引力波的探测带来了新的希望。

自1974年泰勒和赫尔斯发现第一个射电脉冲双星系统 PSR1913+16 以来,新发现的双星系统与日俱增。1993年公布的资料是29个(见图1),而至1994年则已达35个。这35个脉冲双星中的28个双星都是两个中子星中只有一个是中子星,其伴星为白矮星;有2个脉冲双星,中子星的伴星为大质量的主序星;只有5个是双中子星系统。泰勒和赫尔斯发现的第一个脉冲双星 PSR1913+16 就是一个双中子星系统,它的轨道周期很短,仅7.75小时,轨道偏率很大,达到0.617。PSR1913+16的短周期和大偏率导致其轨道速度很高,可达十分之一光

速;两个中子星很近,其引力效应十分强,使之成为检验是否存在引力波的有效实验对象。

引力辐射可以导致双星系统轨道周期的变化,这可以由广义相对论理论精确计算出来。因此要检测引力波的存在,最重要的是需要通过观测精确地测量出脉冲双星轨道周期的变化。泰勒等人在他们发现了 PSR1913+16 之后利用世界上最大的口径为305米的射电望远镜进行了上千次的观测,以极高的精度获得 PSR1913+16 的轨道周期的变化率。他们的观测值正好和理论预期值相符,最新的观测数据表明,其误差不超过千分之四。图2给出观测值(黑点)和理论预期值(实线)的比较。这是一个具有历史性的研究成果,是人类第一次获得引力辐射存在的观测证据,证明了爱因斯坦广义相对论预言的正确。泰勒和赫尔斯因此而获得1993年诺贝尔物理学奖是当之无愧的。

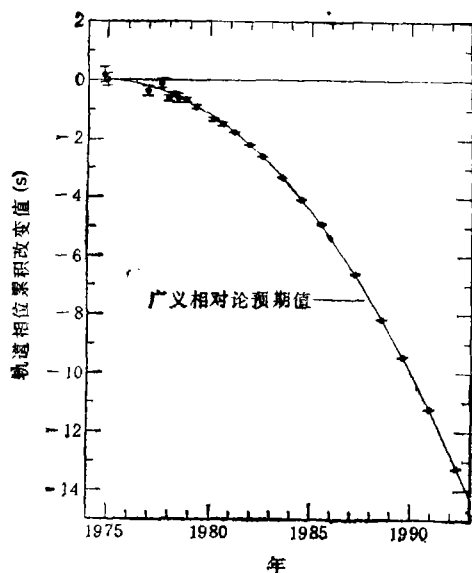


图2 PSR1913+16 双星系统轨道周期相位累积变化的观测值和广义相对论理论预期值的比较

1991年发现的脉冲双星 PSR1534+12,也是双中子星系统,其轨道周期为10.1小时,轨道偏率为0.27。它与 PSR1913+16 相比另有独特的优点,即脉冲信号强,脉冲宽度窄,这可以保证脉冲到达时间的测量达到更高的精度。其不确定性在5分钟内只有3微秒。现已测出

它的大部分参数包括轨道周期的变化。这又是一颗意义重大的脉冲星，一当观测资料积累充分之后，将会更严格地检验广义相对论的预言。

(三) 脉冲星与超新星和超新星遗迹

超新星是最激烈、最壮观的天体物理现象之一。超新星是正常恒星演化的终点，又是中子星诞生的起点。早在1932年科学家预言了中子星的存在之后不久，即1934年，就又有人指出中子星可能产生于超新星爆发。

果然，在脉冲星发现之后不久，就在两个超新星遗迹：蟹状星云和船帆座星云中发现了脉冲星。目前已确认有13颗脉冲星和超新星遗迹相联系（见图1）。由于超新星遗迹的寿命远比脉冲星短和脉冲星自行速度非常大，导致脉冲星不可能和超新星遗迹一一对应。

脉冲星在银河系中的分布是集中于银道面附近，但是其离开银道面的程度比其前身星高得多。其原因就是在形成中子星时的超新星爆发的不对称给予脉冲星以很高的速度，导致脉冲星远离其前身星。脉冲星的典型速度是200~300千米/秒，个别的还可大于1000千米/秒。脉冲星自行速度的观测和它们与超新星遗迹关系的研究，成为超新星爆发物理学的有用的探针。

(四) 脉冲星的磁层和辐射机理

高速自转的脉冲星有一个与它一起共转的磁层，如图3所示。在线速度达到光速的地方（ r_c ）所构成的光速圆柱，成为磁层的边界。在磁层里面充满了电荷分离的高能等离子体。辐射区是在由两个磁极冠的开放磁力线所包围的区域中。高能粒子沿开放磁力线运动所发射的电磁波具有高度的方向性。脉冲星每自转一周辐射束就扫过观测者一次，给出一个脉冲。

半径只有10千米的脉冲星，不可能由现阶段的望远镜直接观测出其空间结构。然而，通过对脉冲星的脉冲形状、强度和偏振的观测，可以分析得出脉冲星辐射区的形状、大小、结构和高度以及辐射机制和磁层结构特点等。

脉冲星的辐射强度随频率的增加而迅速减

小，是典型的幂律谱。高时间分辨率的观测常常显示单个脉冲具有微结构，其时间尺度为几十微秒，具有几百兆赫带宽和非常高的亮温度（ 10^{28}K ），这一特性和幂律谱都表明脉冲星的辐射是非热的。

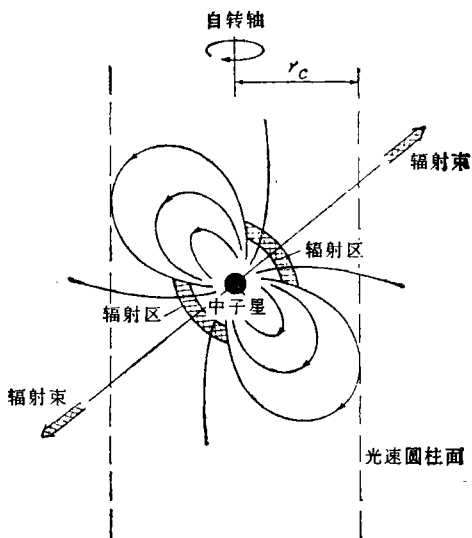


图3 脉冲星磁层和辐射区示意图

在目前已发现的500多颗脉冲星中，绝大部分只观测到射电脉冲，而在蟹状星云脉冲星、船帆座星云脉冲星以及一些年青的脉冲星中，除了射电脉冲之外同时也观测到光学、X射线和 γ 射线脉冲。另外还有一颗十分特殊的脉冲星，只有 γ 射线脉冲而无射电脉冲辐射，这个特殊的脉冲星被称作“Geminga”。这些高能脉冲辐射表明脉冲星是高度相对论性带电粒子的有效提供者。

脉冲星磁层是一个包含了极端相对论性带电粒子、超强的等离子体波和极强的磁场的奇异的混合物。这些条件其他天体所不具备的，因此为等离子体物理的研究提供了一个极好的机会。

(五) 脉冲星——星际介质的探针

天体的辐射经过星际空间到达地球的传播过程中受到星际介质中的电离气体的影响，会产生诸如色散、法拉弟旋转等效应，但是一般天体辐射的这种效应，人们尚无法观测到。幸运的是，脉冲星辐射的脉冲特性使我们可以观测

到这些效应。因此，脉冲星成为研究星际介质的有力工具，被誉为“星际介质的探针”。

脉冲星的脉冲辐射经过星际介质时，其群速度要发生变化，这种变化因频率而异。很容易测得同一个脉冲的不同频率的能流到达观测者的时间差，给出一个极为有用的观测量，称为色散量(DM)。色散量正比于脉冲星和观测者之间的自由电子的含量。因此，知道脉冲星的距离就能知道自由电子的体密度。由一批已知距离的脉冲星的色散测量导出了重要的星际空间自由电子分布的经验模型。反过来，对于脉冲星的色散量测量又成为估计脉冲星距离的主要方法。

线偏振信号通过星际磁场时其偏振面会产生法拉弟旋转。脉冲星信号高度线偏振使我们能够测量同一个脉冲的两个频率的信号所产生的法拉弟旋转量的差别，称为旋转量(RM)。根据旋转量的测量可以导出视线方向的平均磁场约为2~5微高斯。对不同方向的脉冲星的旋转量的测量，得出了星际空间磁场结构的经验模型。

脉冲星具有极小的角径，离我们最近的脉冲星也只有 10^{-10} 弧秒。星际电子密度分布尺度的不规则性可以导致脉冲辐射的闪烁。星际闪烁已被观测到。通过这类观测可以了解星际介质电子密度分布尺度的不均匀性。

对几个食变脉冲星双星来说，掩食的持续时间大于由星体大小所预言的值，特别是PSR 1744-24A，其掩食的持续时间是变化的。这表明掩食的持续时间是由伴星发出的星风所决定。但比通常的双星系统的伴星星风密度和范围要大得多。这就得到一个重要的结论：脉冲星辐射可以驱动星风。这些观测为研究恒星周围等离子体的密度及其均匀性提供了一种有效的方法。

(六) 脉冲星和X射线双星

1982年发现的毫秒脉冲星PSR1937+214，其自转周期非常短，只有1.56毫秒。也就是说，它每秒钟要自转600多圈。然而它却是一颗老年脉冲星，年龄已达 10^8 年以上，磁场则已

衰减至 10^9 高斯。一般脉冲星的自转是愈来愈慢的，到了老年阶段自然不能具有如此短的周期。可以断定毫秒脉冲星不能由正常的脉冲星演化而来。

目前已观测到40多颗毫秒脉冲星(见图1)，其中大部分属于双星系统。在此之前人们已经观测到X射线脉冲星，均为双星系统，它们的自转是愈来愈快的。这是由于吸积了伴星提供的物质和角动量。人们自然想到，毫秒脉冲星的自转如此之快，年龄却如此之大，是由于其演化历史上有过吸积伴星物质的长期过程。这一看法已经得到公认。原来被认为是两种毫无关系的射电脉冲星和X射线脉冲星，由于毫秒脉冲星的发现而联系在一起了。毫秒脉冲星应是X射线双星演化而来。

在球状星团中，X射线脉冲双星的数目比较多，是超丰度的。射电脉冲星的巡天观测已表明在球状星团中普遍存在毫秒脉冲星。有2/3以上已知的毫秒脉冲星是在球状星团中发现的(见图1)。这些毫秒脉冲星和X射线源的观测研究为我们提供了关于恒星、双星以及球状星团演化的新信息。

(七) 脉冲星的行星系统

寻找太阳系外的行星系统是人们十分关注的一个研究课题。有人估计，银河系上千亿颗恒星中约10%有行星系统，其中有的还可能存在智能生命。然而，人们始料未及的是，此类观测研究最成功的例子却属于脉冲星。

脉冲星辐射的脉冲特征使我们能够测量脉冲到达观测者时间的变化情况。脉冲到达时间不仅取决于脉冲星的距离，还和地球绕太阳的轨道运动有关，也和脉冲星双星轨道运动有关。如果脉冲星有行星系统，行星系统的作用也将对脉冲星的运动速度产生影响，进而对脉冲到达时间产生影响，但这种影响很小，只有高精度的测量才能发现。

目前，某些脉冲星脉冲到达时间的测量已可检测到脉冲量速度1毫米/秒的变化，这意味着脉冲到达时间的测量可以检验毫秒脉冲星是否具有围绕它旋转的行星系统。已发现PSR

向'94增刊的读者致谢

本刊1994年增刊——《现代物理知识与教学现代化》出版后，已经引起不少读者的兴趣。很多热心读者来信，对这期增刊的较大的作者（120名）阵容；对以“教学现代化”为中心的增刊主题，对收纳的知识覆盖面较广的上百篇文章，对中国科学院印刷厂的印刷、装订质量，都给以充分的肯定和真挚的赞许。截至今日止，邮购这期增刊的订户，不仅超出了增刊和正刊的作者群，而且超出了多年来本刊编辑部记录在案的读者群。订阅10本以上的读者有：福建龙岩市龙门中学的陈协洋（102本）；河北师范学院物理系的张书敏（53）；北京理工大学湛江教学处的陈有恒（40）；广西大学物理系的谢宝凤（35）；清华大学物理系的汪荣宝（26）；上海华东师范大学物理系资料室的周丽英（24）；沈阳炮兵学院物理教研室的马居安和刘洪义（20）；北京工业大学应用物理系的严隽霖等（17）；河北煤炭建工学院基础部物理室的张永照（15）；安徽淮南师范专科学校物理系的杜建明（13）；华北工学院理学院的刘兴来（12）；扬州师范学校物理组的朱海星（12）；河北衡水师范专科学校物理系的陈均田（12）；宁夏大学物理系资料室的赵慧萍（11）；河北工学院物理系的魏安赐（10）；唐山师范专科学校的李海门（10）；湖南大学物理教研室的邓明成（10）；北京杜家坝19号理化室的张建祥（10）；苏州大学物理系的徐载通和董业民（10）；厦门大学物理系的林秀华（10）。订阅5—9本的读者有：林万荣（8）；孙芳赠（8）；常青梅（6）；余官清（6）；和琴堂（6）；徐行可（6）；谢常清（5）；庄淑华（5）；王胜刚（5）；潘宁（5）；陈征（5）；陶绪德（5）；范宏根（5）；韩素芹（5）；杨柳青（5）；张业仕（5）；沈林（5）。

我们谨向上述订户和广大读者表示衷心的感谢！感谢大家对本刊的兴趣和支持！同时，我们殷切希望广大读者能继续踊跃地订阅这期增刊（单价6.50元，含邮资）和1995年《现代物理知识》（全年11.00元，半年5.50元）。

《现代物理知识》编辑部 1995. 4. 10

1257+12是有两个行星的系统。这一重大发现是太阳系之外存在行星系统的直接观测证据。目前还只有毫秒脉冲星的脉冲到达时间测量能达到如此高的精度，因此更多毫秒脉冲星的发现将会为我们提供进一步的检测样品。

（八）一种新的天文标准钟

目前我们所使用的协调世界时是以铯原子基态的超精细能级跃迁频率为基础，规定一个原子“秒”的长度，作为目前时间计量的标准。

1982年发现了毫秒脉冲星以后，人们测知这类脉冲星的自转具有极高的稳定性。对最强的一颗毫秒脉冲星脉冲到达时间的测量发现，脉冲到达时间的不确定性在三年多时间中不超

过1微秒，精度达到 10^{-14} 。由多颗毫秒脉冲星的长时间观测可以组合成一个“平稳的脉冲星钟”，并且有可能成为一种新的天文标准钟，从而进一步改善目前的世界时。

综上所述，脉冲星自1967年发现以来，在不到30年期间取得了令世人瞩目的巨大成就。天文学是以观测为基础的学科，脉冲星的观测至今已积累了一大批宝贵的资料，其中不少现象和问题，目前仍是没有得到答案的谜。随着大型射电望远镜和其它观测手段的进一步发展，人类必将逐步揭示脉冲星更多的新现象、新课题。

脉冲星的研究已获辉煌，还将继续辉煌。