

脉冲星的起源

脉冲星和超新星遗迹的关系

陈浩 吴鑫基

(北京大学地球物理系)

提 要

现在,脉冲星被普遍认为是在超新星爆发中产生的中子星,本文就此观点综述了超新星遗迹和脉冲星关系的研究状况。观测资料表明,流行的观点不足以解释脉冲星和超新星遗迹在成协性、诞生率和分布上的分歧。文中对这些分歧的各种可能的解释作了讨论。

引 言

如果说Hewish和Bell从观测上发现脉冲星出乎意料之外,那么可以认为Baade和Zwicky^[1]从理论上预言中子星起源于超新星爆发实属情理之中。当中子刚刚被发现, Landau 就提出了中子星的概念;不久, Baade 和 Zwicky 就指出中子星可来源于超新星爆发。近十多年天体物理学的发展证实了这一预言。

1967年脉冲星被观测发现前, Pacini^[2]已经猜想到中子星的一种可能表现方式:带强偶极磁场的快速自转中子星象发电机一样给周围星云的辐射提供能量,使星云周期闪烁。他甚至指出闪烁周期在秒的量级,即中子星自转周期在秒的量级。1968年 Gold^[3]确认脉冲星即是具有强磁场的、快速自转的中子星。脉冲星都是中子星。

的确,观测上也给出了超新星爆发产生脉冲星的例子,这就是1054超新星爆发(天关客星)产生蟹状星云脉冲星(PSR0531+21)。但是脉冲星的起源问题并未解决好,我们还不知道超新星爆发是否是脉冲星的唯一起源。这里综述的即是有关这个问题的研究进展,特别是观测资料的积累状况。

一、超新星爆发和脉冲星起源的关系

如上所述,超新星爆发可以产生脉冲星。但这一过程至今还未被观测到,原因是银河系超新星爆发现象太罕见了,河外星系中脉冲星又不易观测到。但是,要产生脉冲星这样极端

1984年10月19日收到。

1985年2月7日收到修改稿。

致密的星体, 必须通过很强的暴力事件, 这种物理过程应当伴随着大量物质和能量的抛射, 如此剧烈的活动作为脉冲星的起源, 大大地缩小了脉冲星起源的范围, 这又迫使人们尽力研究超新星爆发现象, 阐述超新星爆发产生脉冲星的过程, 寻求彻底解决脉冲星起源问题。

超新星爆发现象是恒星世界中已知的最激烈的活动现象。历史上曾有过多次银河系超新星记录^[4], 最著名的是1054超新星(天关客星)、1572超新星(Tycho)和1604超新星(Kep-ler), 它们都在望远镜观天之前被发现, 记录当然不会很准确。

1885年Hartwig在仙女座大星云中发现亮度比新星高千倍的天体爆发现象, 随后在河外星系中再三发现这一现象, 现代的超新星研究就这样开始了。

从爆发期的光谱和光度上分析, 超新星至少存在两种不同的类型, 分别称为I型和II型超新星(SN I和SN II)。SN I中氢元素含量少, 它的光谱中无氢, SN II的氢线明显。两类超新星最大光变都很大, 比如光学波段的光变可以达到17个星等, 但两者的光变曲线是不同的。

从两类超新星的光谱分析, 超新星的前身星很可能分属两个星族, 即富氢的星族I(Pop I)恒星是SN II的前身星, 星族II(Pop II)恒星是SN I的前身星。对河外星系超新星位置的观测也说明了上面的结论。

观测上仅仅给出这些例证, 理论上却给出了超新星爆发产生脉冲星的比较细致的方案。按照前身星质量的不同, 爆发机制也不同。一般认为 $1.5M_{\odot}$ 到 $3M_{\odot}$ 的吸积型白矮星被爆炸撕碎而不留下任何致密物质遗迹, 同时产生大量的 Ni^{56} ^[5]; 在 $3M_{\odot}$ 到 $8M_{\odot}$ 之间的恒星发生爆炸的机制还没有定论, 可能是碳闪爆燃(carbon flash detonation); $8M_{\odot}$ 以上的恒星发生星核铁光致裂变坍缩^[6]。这里的后一种爆发现象肯定产生中子星或黑洞这样大质量的致密天体, 因此对应于观测上的SN II现象。 $1.5M_{\odot}$ 到 $3M_{\odot}$ 的吸积爆发属于SN I现象^[7]。碳闪爆燃很可能也属于SN I, 它也不留下中子星这样的大质量致密天体。这些由计算物理给出的结果同观测事实既有一致, 又有矛盾。比如光变曲线两者比较一致。但蟹状星云似应属于SN I爆发的遗迹, 然而却留下了中子星。仙后座A(Cas A)超新星遗迹属于SN II爆发的遗迹, 但却找不到脉冲星。这些问题促使人们继续研究脉冲星的起源, 特别是关注超新星遗迹和脉冲星妥协性的观测结果。

二、脉冲星和超新星遗迹的妥协性

超新星遗迹是亮射电源, 从观测上容易被发现; 脉冲星虽然在总数上超过超新星遗迹, 但与超新星遗迹比较而言, 并不容易被发现。所以, 一般用在超新星遗迹区域搜寻脉冲星的方法找两者妥协的例子。

超新星遗迹的辐射机制具有非热性质。射电波段主要是同步加速辐射, 即是相对论性高速电子在绕磁力线运动中辐射能量。Shklovskii计算了超新星遗迹同步加速辐射的能量损失, 还在此基础上给出了它们的亮度 Σ 和直径 D 的关系, 这些都与实际观测结果吻合。当Vela脉冲星和蟹状星云脉冲星被发现后, 很快就由它们的周期 p 和周期随时间的变率 \dot{p} 得到了各自的自转能量损失率, 这部分能量提供给脉冲星周围星云物质, 维持星云的辐射。Richards

等人确证了这两者相等,即在 Vela-X 和蟹状星云中脉冲星自转能不断转化成为辐射能,上述两个成协的例子不仅仅是位置各自重合,距离也各自一致。

确认脉冲星和超新星遗迹成协,还不能说它们是同起源的,必须证实它们年龄相等,才能说它们是同一次超新星爆发的产物。脉冲星和超新星遗迹年龄都有办法估计。对 Vela-X 和蟹状星云及其脉冲星的估计表明,这两者各自的年龄基本相等。由于 Vela-X 年龄大些,计算误差也大些,不如蟹状星云那样更为准确和肯定。最近由 Einstein 卫星 X 射线望远镜发现的新的成协例子,很可能是位置上的巧合。从年龄上分析,超新星遗迹 MSH15-52 应当比脉冲星 PSR1509-58 大很多。数理统计结果表明,它们年龄相同的可能性很小,而它们随机分布正好位置重合的概率却不小^[9]。

当年龄也比较确定时,还有人从超新星遗迹形态上分析的。比如蟹状星云和与它成协的脉冲星,犹如外壳和核心,从形态上一看便能使人相信它们同起源。在脉冲星周围,星云物质也很亮,说明脉冲星对星云的作用较强。其他脉冲星和超新星遗迹之间则还未发现这样形态的例子。

论证脉冲星和超新星遗迹的关系,即是从位置、距离、年龄、形态四个方面考查,寻找成协的例证,说明脉冲星和成协的超新星遗迹同一起源。图1给出的即是可能成协的脉冲星和超新星遗迹的位置以及脉冲星运动在天球面上的投影^[10]。

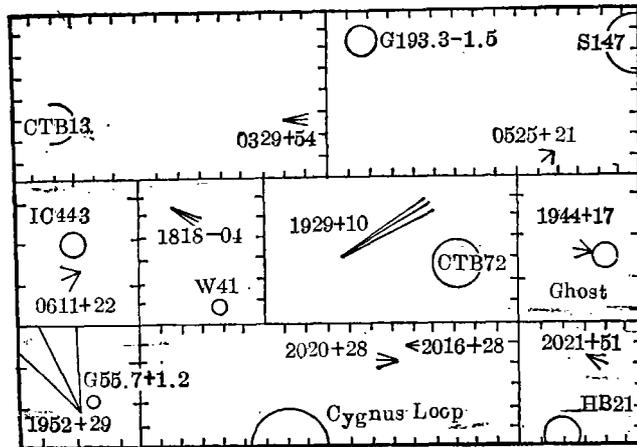


图1. PSRs 与 SNRs 成协性(其中每格 1° ,箭头是脉冲星,箭杆是脉冲星20万年运动径迹)。

IC443是距脉冲星 PSR0611+22 很近的超新星遗迹,两者相距 $0^\circ.6$,但这颗脉冲星自行很小,移动 $0^\circ.6$ 要用20万年,这大大超过了超新星遗迹的估算年龄。又因为脉冲星与超新星遗迹中心连线到脉冲星自行方向有 72° 夹角,所以两者成协的可能性更小了。

PSR0525+21和SNRG193.3-1.5的角距是 12° ,这段距离需要脉冲星自行二百万年,刚好这颗脉冲星的特征年龄与此接近,可以认为脉冲星是从超新星遗迹所在位置自行到现在所处位置的。但是关键的问题是超新星遗迹不可能有如此高寿,所以仍然不能认为它们成协。

PSR1952+29和SNR G55.7+1.2也是如此。

至于 PSR0329+54和 CTB13, PSR1818-04和 W41, PSR1944+17 和 Ghost 星云, PSR

2021 + 51 和 HB21, 它们的成协性还存在许多问题, 图 1 所示是脉冲星自行方向偏离超新星遗迹, 使成协可能性大大降低。

由上面的讨论可知, 脉冲星和超新星遗迹成协的例子很少, 这就是成协性疑难。笔者认为这个疑难是客观存在的, 并不是观测效应造成的。当然, 有很多因素会影响成协性的观测, 诸如脉冲星的自行, 脉冲星辐射的方向性, 超新星遗迹较短的寿命以及观测手段和选择效应的限制, 都会给观测上考察成协问题带来巨大的困难。但即使考虑这些后, 疑难仍然存在。

当超新星爆发后, 被抛射的物质以 10,000km/s 速度离散, 微小的非中心对称爆炸就可以将脉冲星加速; 脉冲星是致密天体, 几乎不受星际介质的减速作用。当超新星遗迹的星云物质被减速后, 它主要靠激波加热而辐射。典型的星际磁流体力学波速度为 50km/s, 而脉冲星的运动速度大部分不低于 100km/s, 经过一段时间脉冲星就可能与超新星遗迹相脱离^[6], 给观测上寻找成协带来困难, 但在观测时这一点已予以重视。

脉冲星的辐射区仅局限于一个很小范围。多数人认为是在磁极冠区中由开放磁力线所决定的一个辐射锥。由于这种几何效应, 仅有一部分脉冲星辐射束扫过地球。考虑这种效应后就知尚有许多脉冲星存在, 只是观测不到。观测到的几率应是辐射束旋转一周后切下的立体角与空间总立体角的比值。Gunn 和 Ostriker 给出观测到的几率 f 是 $\beta \cdot \sin\varphi$, 其中 β 是辐射锥角, φ 是磁倾角。脉冲星数和辐射束扫过地球的脉冲星数之比称为束因子。显然束因子与上述几率互为倒数。目前几乎所有讨论脉冲星诞生率的工作都取束因子 B_0 为 5。这个束因子值是有争议的, Guseinov 指出: 脉冲星束因子因年龄而变化, 年轻的只能取 3, 年老的可取 70, 平均而言大于 5^[12]。辐射锥角 β 和磁倾角 φ 因脉冲星而异, 文[11]求出 27 颗有偏振资料的脉冲星的平均束因子值是 38, 远大于流行的值, 这说明现存超新星遗迹中即使有脉冲星, 被观测到的可能性也比较小, 但这加重了诞生率疑难。

脉冲星寿命是 10^6 到 10^7 年, 比超新星遗迹寿命高百倍, 这也造成了脉冲星周围对应的超新星遗迹弥散消逝, 绝大多数脉冲星不大可能与现存超新星遗迹相关, 这点不足以消除疑难。

脉冲星是闪烁的点源, 超新星遗迹是亮的展源, 它们的观测难易有别, 已观测到的脉冲星大多距我们 3 kpc 远, 而超新星遗迹则大多距我们达 10 kpc。可以说, 观测手段的限制也是很少得到成协观测资料的重要原因。不过应当提到: 既然在超新星遗迹中找不到更多的脉冲星, 人们就在银道面天区寻找超新星遗迹, 对年轻的银道区脉冲星, 用排除法说明它们无对应的超新星遗迹。如: PSR0329 + 54、PSR 0823 + 26、PSR0950 + 08、PSR1237 + 25、PSR1541 + 09、PSR2016 + 28、PSR2020 + 28、PSR2303 + 30^[13], 在现有精度下给出与超新星遗迹成协的零结果。

归纳起来, 成协性研究可用下表说明:

成协性	SNR	PSR	角距离
已经肯定的	Crab Nebula	0531 + 21	0°.0
几乎肯定的	Vela-X	0833 - 45	0°.6
很有可能的	MSH15-52	1509 - 58	0°.0
有些可能的	IC443	0611 + 22	0°.6
略有可能的	W51	1154 - 62	0°.2
很少可能的	HB21	2021 + 51	3°.9

三、脉冲星和超新星遗迹的空间分布

现已发现银河系内脉冲星和超新星遗迹的数目估计分别是400颗和150个，仅收集成表正式发表的即有330颗^[14]和135个^[15]。这样多的样本有利于统计研究它们之间的关系。

1. 银道径向上的分布

超新星遗迹银道径向分布的特点是：在8kpc内面密度在 0.3 到 0.4kpc^{-2} 间，在此之外密度急剧下降，10kpc处仅为8kpc处的一半，16kpc外分布就很少了。

脉冲星的分布是：在银道径向6kpc至8kpc处有一个面密度的峰值^[11]。由于银心方向电背景很强，脉冲星不易被发现，所以应当引入选择因子估计这一方向的脉冲星数；超新星遗迹也存在类似困难，不过并不严重，而且还有河外星系如大小麦哲伦云的超新星遗迹作为借鉴^[16]，可以认为它在5kpc处有一峰值。这样，脉冲星、超新星遗迹、 γ 辐射、H II区、CO气体的径向分布相似，都与H I分布不同。

2. 垂直于银道的分布

在这一方向上，脉冲星分布很特殊，它既不同于星族 I 那样近靠银道，也区别于星族 II 那样远离银道。它的标高是 400 pc，而超新星遗迹和星族 I 的标高都是 70pc，这又如何解释呢？

前面已经提到过：星族分类可以对应超新星分类，这就不难想到超新星遗迹的分布和它的前身星的分布相类似。在银河系这样的旋涡星系中，太阳周围 Pop I 为主，大量出现 SN II，从而超新星遗迹标高与星族 I 相同。至于脉冲星相对较高的标高，被人们解释成脉冲星的高速自行造成的。这里解释的关键在于脉冲星何以获得和保持这一高速。Arnoud 和 Rothenflug 计算出在银河系平均引力场下，脉冲星至少在被抛出的时刻应当有一个 270km/s 的速度，才足以达到现在的标高^[17]。观测上给出的脉冲星速度是 210km/s ，不能满足要求。图 2 给出的是20颗脉冲星自行的观测结果，与脉冲星的标记相连的直线是将脉冲星按自行速度反推回一百万年

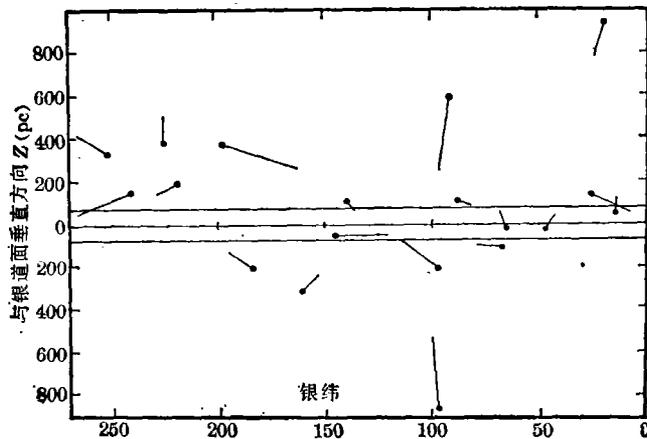


图2. 20颗脉冲星的自行。

的轨迹, 显然脉冲星的自行导致绝大部分脉冲星远离银道面。可是定量的分析仍不够圆满^[19]。

3. 脉冲星与银河系H II 区的关系

H II 区是旋涡星系中最好的旋臂示踪物了。以不同方式对脉冲星和 H II 区成协性进行研究, 都给出了肯定的结果^[18]。研究脉冲星与H II 区成协性, 还可以帮助人们正确地测定脉冲星距离, 这对深入研究脉冲星与超新星遗迹的关系很重要。比如 Vela-X 脉冲星刚发现时测距不准, 与对应的星云距离不一致, 现在已知道这是H II 区所致。超新星遗迹与H II 区成协, 以此可以推测它们与旋臂的关系, 直接的观测也给出相类似的结论^[19]。现在超新星遗迹和脉冲星都归入了旋臂物质, 而且超新星爆发要对星的形成和其他超新星的前身星产生影响, 这种影响和旋臂物质特别是H II 区很有关系^[7]。现在的超新星理论一再说明H II 区的重要性, 看来它对脉冲星起源的探讨也将是重要的。

四、诞生率疑难

上面提到的脉冲星和超新星遗迹的成协性, 都是从空间分布上考查两者的关系。从时间这一角度讲, 超新星遗迹和脉冲星都有生有灭, 两者寿命相差很大。按照现有的观点, 即脉冲星是在SN II 中产生的, 则脉冲星诞生率不应比 SN II 诞生率高, 更不能比超新星遗迹诞生率高。由于现存超新星遗迹大部分无法判别是 I 型还是 II 型, 所以研究诞生率时并不对超新星分类, 一般就以超新星诞生率与脉冲星诞生率直接比较。

超新星诞生率研究开展得较早, 方法也比较多。常常采用的三种方法是: 历史上的银河系超新星爆发记录, 对河外星系中超新星的观测和对超新星遗迹的巡天观测。前两种方法大致给出几十年一个的估计值, 如 Tamman 从 58 个 Sb 星系中的 16 个超新星和 180 个 Sc 星系中的 50 个超新星分析, 得出 70 年一个的结论^[20]; 而 Caswell 等人对银河系超新星遗迹的观测则给出 80 年一个的结论^[21]。从不同的人所做的工作来看, 银河系超新星诞生率在 30 年到 100 年一个的范围内。

脉冲星的诞生率不大容易估计。人们常用脉冲星总数除以寿命的方法求得。而脉冲星总数的估计取决于对脉冲星的空间分布、光度函数和束因子的估计。目前对脉冲星诞生率的估计虽然不同, 但多集中在 10 年一颗。Narayan 给出较低的估计值, 将近 20 年一颗^[22]。所有这些值都是取束因子为 5 得到的, 当采用较大的束因子时, 诞生率要提高很多倍。不妨将各家的诞生率估计值列成一个表:

研究者	样品	极限光度	脉冲星数	诞生率(yr)
Davies 等人(1977)	51(J)	$1.6 \text{ mJy} \cdot \text{kpc}^{-2}$	4×10^5	2—18
Taylor 等人(1977)	90(A+J)	3	10^5	6
Guseinov 等人(1978)	105(A)	6	6×10^5	40
Gailly 等人(1978)	224(M)	—	0.8×10^5	24—74
Manchester (1979)	224(M)	0.3	约 5×10^5	5
Arnoud 等人(1980)	116(M)	3	0.6×10^5	70—160
Phinney 等人(1981)	328(A+J+M)	—	5×10^5	8

注: 取自 IAU Symposium 95, Pulsars, p.430 和 MNRAS, 194 (1981), 137。A 是 Aricebo 射电望远镜巡天, J 是 Jodrell Bank, M 是第二次 Molongio 巡天。

脉冲星诞生率比超新星遗迹高，这就是诞生率疑难。这一疑难和成协性疑难共同构成了脉冲星起源问题中最为迫切需要解决的问题，它们是脉冲星和超新星遗迹关系中必须排除的疑难。不少人试图以提高脉冲星诞生率的方式缓解这一疑难，如有人提出脉冲星寿命比流行的寿命值(1.6×10^6 年)要长，达到 5×10^6 年甚至 10^7 年。辐射锥可能是椭圆，即在脉冲星经向拉长几倍，使束因子下降。还有人认为超新星遗迹诞生率应该是20年产生一颗，这也缓解了诞生率方面的矛盾。Radhakrishnan采用了一种更新奇的解释：超新星爆发都产生中子星，但中子星并不一定成为脉冲星，只有处于一定磁场强度和自转速度范围以内的中子星才能成为脉冲星^[3]。按照这一理论，蟹状星云脉冲星实在是巧合，绝大部分中子星是在它们对应的超新星遗迹弥散后才演化成脉冲星的，至于脉冲星的束因子，那倒是很低，足以低到使脉冲星诞生率低于超新星遗迹的诞生率。

在诞生率疑难得以解释的同时，成协性疑难往往会更加严重。Radhakrishnan虽然将这两者一并考虑加以解释，但却很难为观测所证实。现在人们求得脉冲星年龄的方法不少，由蟹状星云脉冲星验证也是吻合的；脉冲星的周期、磁场强度差异也很大，这些都说明上述解决疑难的方法必须进行修改。

一个全面而彻底的解决方案，应当不拘泥于脉冲星的研究现状，而是应当为将来的发展留有余地。比如双星系统在恒星世界中为数不少，而它们形成脉冲星的机制还不甚清楚，也许它们产生脉冲星的方式不同于单星，这样当然就会给研究脉冲星的起源，特别是脉冲星和超新星遗迹的关系带来疑难。

脉冲星起源问题是一个重大的天文课题，研究脉冲星和超新星遗迹的关系只是对起源问题研究的一种方法，这里存在着疑难就说明起源问题没有解决好，就要继续地探索下去。至于脉冲星起源问题研究的现状，可以说还是比较成熟的，而存在着疑难又说明此问题还没有最终的结论。脉冲星确实是一种相当普遍而又特殊的天体。从普遍性这一方面讲，已发现的脉冲星在数量上和白矮星差不多，更不用提尚未定论的黑洞了；从特殊性这一方面讲，脉冲星辐射强，磁场强；白矮星辐射很弱，其磁场也不能与脉冲星的相比；黑洞自身根本不会辐射也不会带磁场。从脉冲双星的资料分析可知，单个脉冲星的质量集中在 Chandrasekhar 极限 $1.4M_{\odot}$ 附近，这也从侧面说明脉冲星是很特殊的，有很强的单一性。

脉冲星本身虽有很多相当一致的物理性质，但它的起源却可能是多样的。不同的起源产生性质相同的脉冲星，这就掩盖了起源的多样性，给起源问题的解决带来麻烦。现在人们正是利用脉冲星的共同性质，尽量得到准确的脉冲星束因子值、寿命和总数，同时寻找、观测脉冲星和超新星爆发以及超新星遗迹，企图从中得到脉冲星起源问题的答案。

参 考 文 献

- [1] Baade, W. and Zwicky, F., *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 20 (1934), 254.
- [2] Pacini, F., *Nature*, 216 (1967), 567.
- [3] Gold, T., *Nature*, 218 (1968), 731.
- [4] Clark, J. H. et al., *MNRAS*, 179 (1977), 89.
- [5] Chevalier, R., *Ap. J.*, 246 (1981), 267.
- [6] 林忠四郎, 星の進化, p. 114, 岩波出版株式会社, (1978).

- [7] Trimble, V., *Rev. Mod. Phys.*, **54** (1982), 1183; **55** (1983), 510.
- [8] Seward, F. D., in *Supernova Remnants and Their X-ray Emission*, 405, ed. by J. Danziger & P. Gorenstein, (1983).
- [9] van den Bergh, S., *Ap. J.*, **280** (1984), L51.
- [10] Lyne, A. G. et al., *MNRAS*, **201** (1982), 503.
- [11] 吴鑫基, 乔国俊等, 北京天文台台刊, 1984年第7期, 第6页.
- [12] Guseinov, O. H. et al., *Astrophys. Space Sci.*, **94** (1983), 249.
- [13] Cohen, N. L. et al., *Ap. J.*, **264** (1983), 273.
- [14] Manchester, R. N. et al., *MNRAS*, **185** (1978), 409.
- [15] van den Bergh, S., in *Supernova Remnants and Their X-ray Emission*, p. 597, (1983).
- [16] Mathewson, D. S. et al., *Ap. J. Suppl.*, **55** (1984), 189.
- [17] Arnoud, M. et al., *Astron. Astrophys.*, **87** (1980), 196.
- [18] Wheeler, J. C., Li Zong-wei and Bash, F. N., *BAAS*, **16** (1984), 348.
- [19] 宫本昌典, 银河系, p. 201, 恒星社, (1980).
- [20] Tammann, G. A., in *Supernovae*, p. 115, ed. by D. N. Schramm, (1977).
- [21] Caswell, J. L. et al., *MNRAS*, **187** (1979), 201.
- [22] Narayan, R. et al., *Nature*, **290** (1981), 571.
- [23] Radhakrishnan, V. et al., in *Supernova Remnants and Their X-ray Emission*, p. 487, (1983).

(责任编辑 刘金铭)

The Origin of Pulsars

Chen Hao Wu Xinji

(Department of Geophysics, Beijing University)

Abstract

This paper reviews the general study made on the relationship between pulsars (PSRs) and supernova remnants (SNRs) as the pulsars are widely believed to be neutron stars born only in supernova explosions. Still, observations suggest that current scenarios fail to explain the discrepancies in associations, birthrates and distributions of the PSRs and SNRs. Attempt has been made to dig into other possibilities in explanation of the discrepancies.