

神秘不减当初的脉冲星

□ 文 何锐思 (Richard de Grijs) / 翻译 程思淼



何锐思
(Richard de Grijs)

北京大学科维理天文与天体物理研究所 (KIAA) 教授, 国际天文学联合会天文发展办公室东亚分站负责人。

一颗出生时超过20倍太阳质量的恒星, 最终将爆发为一颗超新星; 而它那大约有地球质量50万倍的核心, 则坍缩成了一颗直径只有30千米左右的“中子星”。

中子星自转很快。这是一条基本的自然律——角动量守恒的结果。由于大质量前身恒星的核心(质量当然也很大)坍缩到了极小的体积之内, 为了系统总角动量的守恒, 这个坍缩后的核心必须大幅加快自转的速率。这一过程, 从能量的角度说, 则相当于把系统的引力势能转化为转动动能。

高速的自转使带电粒子从中子星的磁极沿着磁轴流出来。这些粒子流主要在X射线波段被观测到, 虽然偶尔也有可见光或伽马射线的报告。由于中子星的磁轴不一定与自转轴重合, 这些辐射束有时就会以脉冲信号的形式被我们看到。

“脉冲星”(pulsating star, 简称 pulsar) 由此得名。

脉冲星像灯塔一样在宇宙中闪烁。自首次发现已过去了50年, 脉冲星引起了天文学家极大的兴趣,

也使他们困惑不已。尽管人们早在1967年就发现了第一颗脉冲星, 这些天体至今却依然披着神秘的面纱; 新的发现总是一次又一次令我们惊讶。

就在2017年1月, 一项新发表的研究颠覆了我们一直以来认为脉冲星可算是宇宙中一种走时最准的钟的看法。研究者在位于波多黎各的阿雷西博天文台进行的一项巡天

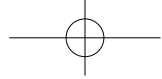
中, 偶然发现了两个非常奇怪的脉冲星: 它们会不时来一次“失踪”。之前它明明就在那儿, 但在随后的很长一段时间里, 在同样的地方却找不到它了。

发现这一奇特行为的存在完全是偶然的。但是确证这些大多数时候都不可见的脉冲星的存在, 却耗费了焦德雷班克射电天文台 (Jodrell Bank Observatory) 一支由英国曼彻斯特大学安德鲁·林恩 (Andrew Lyne) 教授领导的研究团队极大的耐心。

这种“间歇脉冲星”很少被观测到。它们有两个状态: 在一个状态下, 它们像正常的脉冲星一样发出脉冲信号 (“开启”), 而在另一个状态下, 它们却神秘地停止工作, 不再产生任何射电波 (“关闭”)。

在这幅“钱德拉”拍摄的图像中央, 一颗直径只有20千米的脉冲星激起一片横跨150光年的星云发出X射线。这颗脉冲星自转速率将近每秒7周, 表面磁场强度是地球的15万亿倍。快速自转与超强磁场相结合, 使脉冲星发出由高能带电粒子组成的星风, 最终造就了“钱德拉”记录下的巧夺天工的星云。图片来源: NASA/CXC/SAO/P. Slane et al. ▶





▲ 位于波多黎各阿雷西博天文台的世界上第二大射电望远镜（航拍）。摄于2006年3月26日。图片来源：AP Photo/Tomas van Houtryve

“两个状态之间的切换非常迅速，”林恩说，“刚才还开着，说关就关了，没有任何明显的预兆。”

发现奇怪脉冲星的项目，是由34名成员组成的脉冲星研究团队使用阿雷西博天文台七束接收器进行的“脉冲星阿雷西博L波段馈源阵”（PALFA）巡天。最近发现的两颗间歇脉冲星在大多数的时间里处于关闭的状态。另外还已知有三颗类似的脉冲星，不过它们在大多数时间的状态则是开。

2012年9月20日，他们观测到其中的一个正发出明亮的脉冲信号，于是把它标记为PSR J1929+1357。至此，该项目发现的一共169颗脉冲星中，已经有超过一半由焦德雷班克天文台开始了后续的观测。2013年2月8日，这个候选者也由该台口径250英尺（约76米）的洛弗尔

（Lovell）望远镜在第二次尝试时得到了确认（当天的第一次观测没有发现任何脉冲信号）。

“在接下来的9个月里，它在累计100小时里被观测到不下650次。”焦德雷班克天体物理中心的本杰明·斯台珀斯（Benjamin Stappers）教授说。他也是这项新发表的研究的合作者。“其中只有5次是开的状态，只占总时间的0.8%。”

这项发现最重要的推论是，这类“玩失踪”的脉冲星数量必定极大。以阿雷西博望远镜所能看到的部分银河区域（阿雷西博望远镜的镜面是固定不动的）为目标的PALFA巡天，对每个位置只进行了一次观测。它大概巡过了130颗类似的脉冲星，但只有这一颗刚好在它观测的时候处于“开”的状态。

而且，如果不是有焦德雷班克天文台观测重复观测到的信号，这颗脉冲星很可能就被当作一个由“射频干扰”（radio-frequency interference，指射电波段来自天空以外的干扰信号）引起的坏数据而丢掉了。据PALFA团队估计，在项目覆盖的天区中大约有3000个这样的间歇脉冲星，比正常脉冲星的数量要多得多。

“这些隐身的脉冲星的数量可能远超正常的脉冲星，”PALFA项目首席研究员、来自加拿大麦克吉尔大

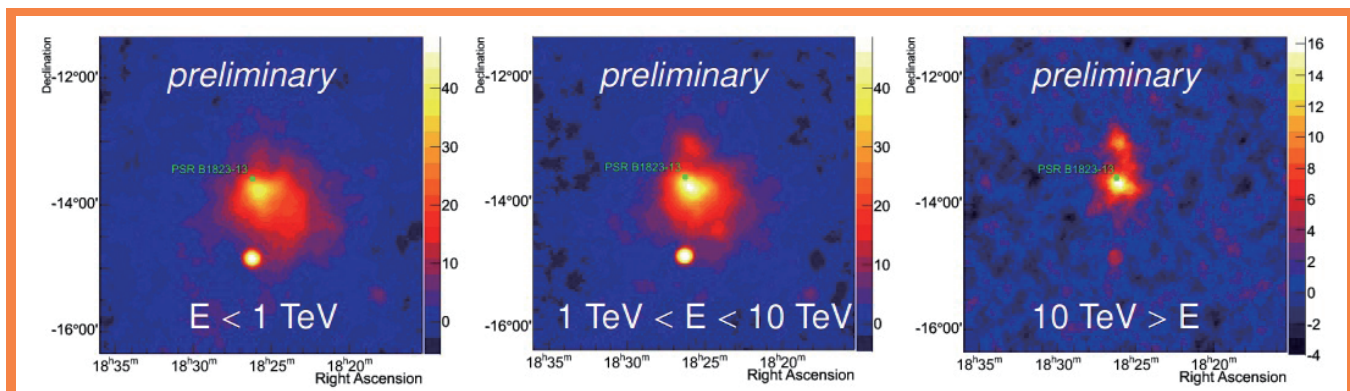
学（McGill University）的维多利亚·卡斯皮（Victoria Kaspi）说。“事实上，它们会重新定义何为正常。”

它们为什么会有这种奇怪的行为？毕竟自发现以来，脉冲星一直被看作是宇宙中出奇精确的时钟，比我们实验室里最好的钟还要稳定，而且能走上几百万年。但是，这些在长时段表现出间歇性的脉冲星，我们在大多数时间里看不见它们，那岂不是像把一座好钟放在窗帘后面吗？

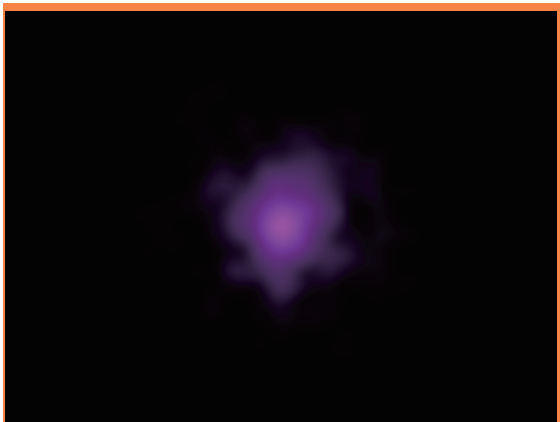
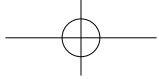
“现在我们对这种开关的行为仍无法解释，”塞莫尔（A. Seymour，阿雷西博天文台研究员，该研究的共同作者）说，“可以确定的是脉冲星周围的环境在变化，但是具体怎样变化，大家的意见仍有分歧。”

“正常的”脉冲星有这样一性质：它们的脉冲周期会随着时间非常缓慢而有规律地增加。而最近对这些奇怪脉冲星的观测表明，它们自转变慢的速率在“关”态明显要比“开”态低。PALFA团队猜测，这是由于发射射电波束的带电粒子流同时也会使脉冲星的自转变得更慢。

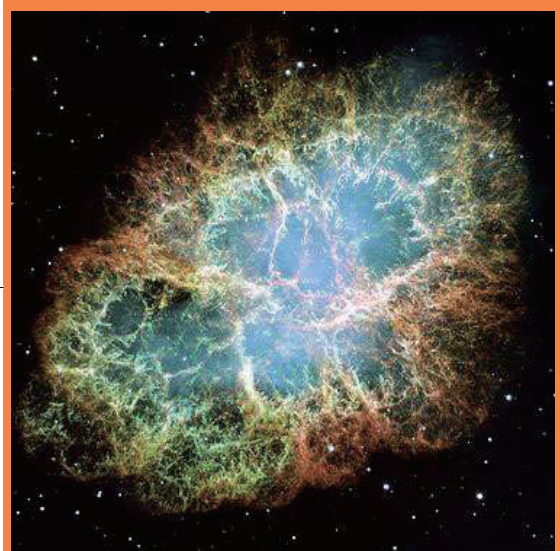
当脉冲星“关闭”时，带电粒子流由于某种原因无法维持了，因而星体的自转速率下降得就不再那么快。但是，正如塞莫尔指出的，对于这个开关的机制，目前脉冲星研究界还没有达成共识。自转速率的变化是通过



▲ 脉冲星星云HESS J1825-137所在天区在三个不同波段下的辐射强度分布图。辐射源的范围随着光子能量的提高明显缩小。视野中的其他辐射源包括双星系统LS 5039和硬谱源HESS J1826-130。图片来源：Mitchell et al., 2016



▲ 图中的脉冲星位于河外星系M82，距我们1200万光年，发出的X射线束每1.37秒扫过地球一次。科学家当初用高能X射线望远镜“核分光望远镜阵”（NuSTAR）对它进行研究时，曾认为它是一个大质量黑洞。但后来发现了它的X射线脉冲，这表明它是一颗脉冲星。图片来源：NASA/JPL-Caltech



▲ 哈勃太空望远镜拍摄的蟹状星云可见光图像。蟹状星云是脉冲星风星云的一个实例。图片来源：NASA/ESA-Hubble Space Telescope

计算脉冲星在不可见的阶段错过了多少次脉冲而得出的。

目前PALFA巡天仍在进行中。将来是否会发现更多这样有趣的新现象？如果有，会在什么时候？没有谁知道。要捕获另一颗正在开启状态的间歇脉冲星，只能靠运气。会有一个候选者主动站到台前揭示自己的秘密吗？还是说它将永远潜伏在未知的黑暗当中？林恩希望，对PSR J1929+1357的后续观测能够为脉冲星发光机制和自转变慢现象提供一个难得的新视角。

最近发表的另外两项研究则对射电和X射线脉冲星的有趣性质予以了关注。这两个国际研究团队的工作表明，美国宇航局钱德拉X射线天文台最近拍摄的双子座伽马源“Geminga”和B0355+54两颗脉冲星的图像，或许有助于勾勒出脉冲星发射的显著特征，以及它们那经常令人困惑的几何形状。

有意思的是，脉冲星的光束在不同波段下并不吻合。美国宾夕法尼亚大学的贝蒂娜·波塞特（Bettina Posselt）说。在射电波段和伽马射线波段观测到的脉冲形状常常区别很大，而且有的脉冲星只发射其中的一种。这些区别引起了人们对于脉冲星模型的争论。

“不同的脉冲星之间为什么会有差异，目前还没有圆满的解释，”波塞特说，“不过有一点是很重要的：我们探测到的脉冲的差别跟几何形态有密切的关系。你能否看到以及看到怎样的脉冲星，这取决于脉冲星自转轴和磁轴跟我们视线之间的关系。”

波塞特表示，“钱德拉”的图像使天文学家有了前所未有的切近视角，得以一览带电粒子流的几何

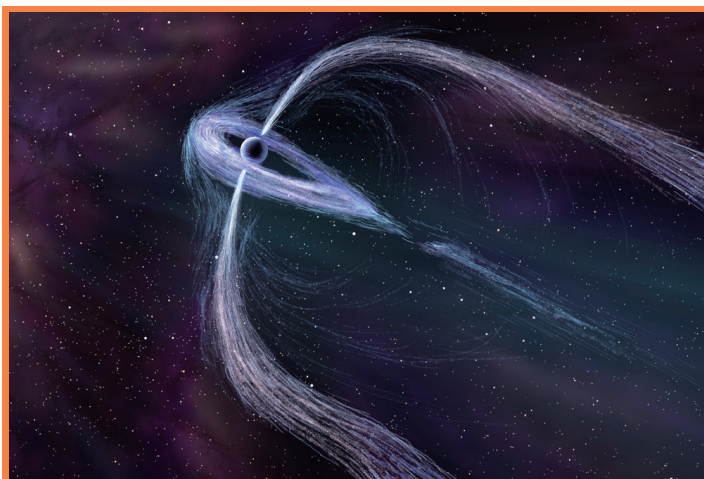
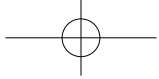
形状。正是这些粒子流发射出X射线和其他波段的电磁波。这些从脉冲星流出的高能粒子沿着磁场线飞出，就形成了“脉冲星风星云”（PWN）。它包括两部分：围绕脉冲星赤道的一个封闭环面，以及沿自转轴方向的开放的喷流。由于脉冲星在星际介质中的运动速度高达数百千米/秒，这开放的第二部分通常会拖出一条长长的尾迹。

“这是我们对脉冲星风星云所做的大量研究得出的最棒的结果之一。”“钱德拉”脉冲星风星云项目首席研究员、美国斯坦福大学物理学教授罗杰·罗曼尼（Roger Romani）说。“我们模拟了这个星云的三维结构，这样就可以一直追溯到那些刚从中央脉冲星发出的等离子物质。这项研究多亏了‘钱德拉’对X射线惊人的灵敏，才能够通过深度曝光看到这些暗弱的结构，我们感到非常高兴。”

波塞特介绍说，在双子座伽马源脉冲星的周围，我们看到了一片壮观的脉冲星星云。双子座伽马源是我们最近的脉冲星之一，距地球只有800光年。它拖着三条不同寻常的尾

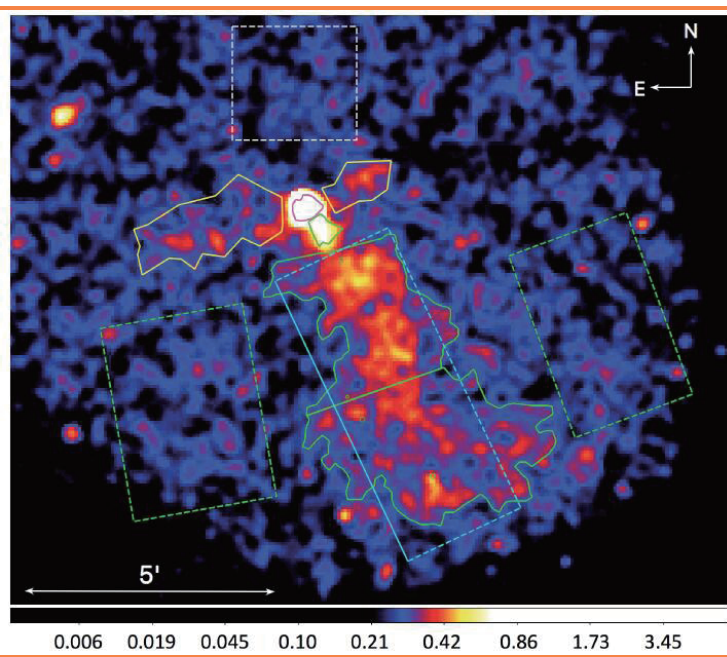
本图叠加了脉冲星PSR B1509-58在红外、X射线和射电三个波段的数据。图中显示了脉冲星星云在其中扩张的环境。图片来源：X射线：NASA/CXC/SAO/P. Slane et al.；红外：2MASS/UMass/IPAC-Caltech；射电：Molonglo Observatory Synthesis Telescope ▶





▲ 艺术家想象的双子座伽马源脉冲星三条不同寻常的尾巴的近距离特写。图片来源：Nahks Tr'Ehnl

脉冲星B0355+54在X射线波段的辐射强度示意图。其中绿线标示出的就是其“尾巴”结构。图片来源：arXiv:1610.06167v1 [astro-ph. HE]▶



巴。从双子座伽马源两极喷出的粒子流横跨了超过半光年，也就是从太阳到冥王星距离的1000多倍远。除此之外，这颗脉冲星还有另一条稍短的尾巴。

而另一颗脉冲星B0355+54周围的脉冲星星云在X波段下的图像则大相径庭。这颗脉冲星离我们约3300光年远。在它周围是一团蘑菇状的强辐射区，后面拖着一条长达5光年细长而分叉的尾巴。

双子座伽马源发射出伽马射线脉冲，但在射电波段是安静的。而B0355+54则相反：它是明亮的射电脉冲星，但不发射伽马射线。

“它们的尾巴似乎透露出其中的原因，”波塞特说。据她介绍，脉冲星自转轴和磁轴的指向会影响到我们在地球上观测到辐射的类型。双子座伽马源的磁极大概跟自转轴非常接近，就像地球一样。而B0355+54的一个磁极则能够在某个时候横扫过地球。由于射电辐射是在脉冲星表面磁极附近产生的，它的传播会沿着喷流的方向。而伽马辐射则不然，它是在离脉冲星表面更远的一大片区域产生的，因此伽马脉冲在天空中扫过的范围要更大。

“在双子座伽马源那里，我们看到的是明亮的伽马脉冲和脉冲星环形星云的边缘，而在喷流附近发出的射电波束则指向旁边，并不能被我们看到。”波塞特说。

这些尾巴的弯曲则为研究脉冲星的几何形态提供了线索。它们可能是脉冲星喷流产生的余迹，也可能是像子弹穿过空气时所留下的那种弓形激波。

参与了B0355+54研究的奥列克·卡尔戈切夫（Oleg Kargaltsev，美国乔治·华盛顿大学）说，天体在空间中的指向对天文学家观测到的结果有重要的影响，这一点在脉冲星身上同样适用。

“B0355+54的情况是，它有一条几乎冲着我们的喷流，因此我们在射电波段看到了明亮的脉冲；而它的大部分伽马辐射则与我们的视线方向垂直，不能到达地球。”他说，“可以推论的是，这颗脉冲星的自转轴与我们视线方向只有很小的夹角，而且它在空间中的运动方向几乎与自转轴垂直。”

这项研究的第一作者、乔治·华盛顿大学的研究生诺埃尔·克林格（Noel Klinger）补充说，对于不同

的脉冲星来说，自转轴、视线与速度三者相互的夹角也是不同的，这也影响了它们星云的外观。

“尤其当脉冲星几乎沿着我们的视线运动，而且自转轴与视线夹角也很小的时候，对星云的观测就会变得很棘手。”克林格说。

按照对双子座射电伽马源数据的弓形激波解释，脉冲星的两条长尾巴和它们不同寻常的光谱可能意味着这些粒子由于“费米加速”过程被加速到了接近光速。所谓费米加速，是指高速带电粒子流与低速运动的星际气体相遇时，从星际气体的磁场中获得能量的一种统计加速过程。

当然，对双子座伽马源的几何形态还有其他解释的可能。不过波塞特表示，说“钱德拉”拍摄的图像使这些脉冲星变成了宇宙中的粒子物理实验室，这是毫不为过的。通过对这些天体的研究，天体物理学家有机会考察各种粒子在地球加速器达不到的极端条件下的行为。

“无论最终解释如何，双子座伽马源都为脉冲星星云加速物理及其与周围星际物质的相互作用提供了激动人心的新证据。”波塞特说。■

（责任编辑 冯翀）