

热辐射主导的脉冲星

全 号

(广州大学 510006)

通常脉冲星的辐射以非热辐射为主,比如说:射电脉冲星(参见本期卢吉光的文章《射电脉冲星》)和伽马射线脉冲星(参见本期葛明玉的文章《高能脉冲星》)。XDINS(X射线暗孤立中子星)与CCO(超新星遗迹中心致密天体)都是特殊品种的脉冲星。它们的辐射是热辐射主导,主要集中在软X射线波段。如果我们认为脉冲星为转动的中子星,在中子星的壳层、大气和磁层中会有各种复杂的物理过程,此时要产生一个简单热辐射主导的能谱,反而是一件困难的事情,这就是“简单”带来的挑战。让我们首先从热辐射谈起。

1. 从热辐射谈起

经典电动力学的知识告诉人们,当一个带电粒子做加速运动时,它会向外发出电磁辐射。粒子加速的原因可能是外界存在电场或磁场。对于一团带电粒子而言,比如说等量正电荷和负电荷组成的等离子体,如果粒子系统处在热平衡状态,则称此时粒子系统的辐射为热辐射。否则,则称粒子系统的辐射为非热辐射。

处在热平衡状态的物体,它的发射本领正比于它的吸收本领:吸收得越多,也就意味着发射得越多,从而才有可能保持热平衡。这样的物体可以吸收所有照射到它上面的辐射(“黑体”),也就是说它的吸收本领最强,从而也就意味着它的发射本领也最强。人们称这种特殊的热辐射为“黑体辐射”。1900年,普朗克在对黑体辐射的研究过程中,提出了能量子(即后来的光子)的概念,从而开启了微观量子物理的大门。黑体辐射的辐射强度是已知的,就是1900年普朗克得到的普朗克函数。在宇宙中

最简单的黑体辐射可能是宇宙微波背景辐射。恒星的辐射,也可以用黑体辐射来近似,比如:太阳的辐射就可以近似认为表面温度为6000度的黑体辐射。恒星晚期演化的产物共三种:白矮星、中子星、黑洞。白矮星表面的辐射也可以用黑体辐射近似。和太阳的辐射类似,更精确的描述要考虑到太阳或白矮星表面的大气影响。

中子星和黑洞是比白矮星更致密的天体。和黑洞不同,中子星具有一个通常物质组成的表面,因此人们有可能从观测上直接看到中子星,比如说:看到来自中子星表面的热辐射。如果测到中子星表面的热辐射,就可以定出中子星的表面温度和热辐射区域的大小。有了中子星的表面温度,就可以研究中子星的冷却历史、内部结构(参见本期高勇的文章《中子星内部结构》)和中微子过程等。热辐射区域的大小可以对中子星半径给出限制。更进一步,如果考虑到中子星大气的存在,这时中子星的辐射会是一个连续的热谱和大气中若干金属元素的谱线的叠加。谱线的中心能量在中子星引力场下,会有广义相对论的引力红移。考虑到大气原子的运动,谱线也会有展宽。如果可以同时得到谱线的红移和展宽,则可以联立得到中子星的质量和半径这两个中子星基本物理量。20世纪90年代末,Chandra, XMM-Newton等X射线望远镜准备开始工作,利用谱线测量中子星的质量和半径曾是当时的主要目标之一。但是最终观测得到的结果却出乎大家的意料之外。

2. XDINS及其光学紫外超

XDINS总光度约为 10^{33} erg s^{-1} ,和其他品种的

脉冲星相比(比如说和磁星相比,参见本期林琳的文章《磁星》),总光度比较低。XDINS周期比较长,由周期和周期导数推算得到脉冲星单位时间的转动动能小于它们的X射线光度。因此它们的X射线辐射不可能来自转动动能,有可能来自中子星诞生后残余的热能。中子星强磁场的衰减也有可能贡献X射线的光度。人们目前关注的几颗源都是距离地球比较近的源(比如:100 pc左右)。因此,它们的X射线流量比较高。这也是它们能够成为Chandra、XMM-Newton卫星的观测目标的原因。不论是Chandra卫星还是XMM-Newton卫星,都没有看到预期的中子星大气的谱线,观测的数据是简单的黑体谱^①。黑体的温度约为0.1 keV,黑体辐射的半径大小约为2~3千米。而各种物态方程告诉人们,中子星的典型半径应该是10千米左右(参见本期高勇的文章《中子星内部结构》)。为什么来自中子星表面的热辐射是简单的黑体谱(没有谱线,没有非热成分)?为什么辐射区域远小于中子星的典型半径?

一种可能的原因是,中子星内部的物质并不是我们通常想象的以中子为主导的物质,而是中子、质子等解禁之后的夸克组成的夸克物质。在这种观点下,脉冲星中心的天体是夸克星,而不是中子星。中子星具有壳层和大气,不容易产生简单的黑体谱。夸克星可以具有自束缚的表面,可以没有壳层和大气,因此可以自然得到简单的黑体谱,这就是裸奇异星的观点^②。一般认为,小质量的中子星其半径会比典型中子星的半径更大,而小质量的夸克星则可以具有更小的半径。因此,用小质量的夸克星可以理解观测上小的黑体辐射半径。

也有观点认为,考虑到中子星表面的强磁场(例如:磁场强度为 10^{13} G,甚至更高),则中子星大气物质的凝聚状态会改变,变成一个类似固体的形式,从而使得中子星表面具有类似裸奇异星的情况。此时的中子星也被称为裸中子星^③。

XDINS简单的能谱带来的挑战还不止于此。多波段的观测表明,它们没有射电辐射,没有非热

的X射线辐射,也没有高能的伽马射线辐射。但是在光学和紫外波段它们是有辐射的,而且也可以用黑体谱拟合。而且光学和紫外辐射超出X射线黑体谱的理论外推。这就是XDINS的光学和紫外超问题^④。目前所有的七颗XDINS都有了光学和紫外的测量,都有类似的光学和紫外超现象^⑤。

对于XDINS的光学和紫外超,它们的解释肯定是和X射线的能谱一起来做(图1)。一种观点认为,在裸的中子星表面,考虑强磁场下大气的辐射转移,有可能解释XDINS的光学/紫外和X射线能谱^⑥。如果考虑到中子星磁层中的电子对光子的散射,则也有可能同时解释XDINS从光学到X射线的辐射^{⑦⑧}。如果考虑到中子星周围的回落盘(超新星爆发时抛出的物质,部分可能落回中子星表面,并在角动量影响下以盘的形式存在),或星际介质(星际介质也有可能被中子星的引力捕获到中子星表面),则这些通常物质也会在裸的奇异星表面形成类似大气的一层物质。来自这一层物质的辐射也有可能解释XDINS的光学和紫外超^{⑨⑩}。

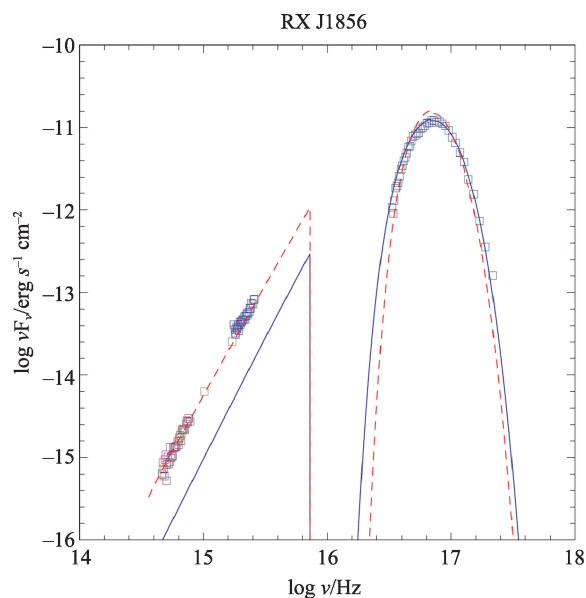


图1 一颗XDINS(RX J1856.5-3754)的光学/紫外和X射线能谱^⑦。在 10^{17} Hz附近的数据点是X射线的观测,在 10^{15} Hz附近的数据点是光学和紫外的观测,光学和紫外的光度在X射线黑体谱的外延(实线)之上,这就光学和紫外超。红色的虚线是磁层散射的计算结果

3. CCO: 年轻的热辐射中子星

在蟹状星云超新星遗迹内找到脉冲星,在船帆座超新星遗迹内找到脉冲星,这些在脉冲星刚发现时,都是脉冲星被证认为中子星的证据(脉冲星诞生于超新星爆发,参见本期王维扬的文章《中子星相关的暂现事件》)。后来磁星(magnetar)被认为是年轻的强磁场的中子星,丰富了人们对年轻中子星的认识(参见本期林琳的文章《磁星》)。在若干超新星遗迹内,人们看到一些X射线的点源,虽然没有找到所有源的周期,但人们猜测它们也应该是中子星。因为对它们物理本质不确定,所以给它们一个笼统的名字:(超新星遗迹)中心致密天体,简称CCO。

CCO的辐射也是热成分主导。因此,类似XDINS,它们也有可能告诉人们中子星其实是夸克星。特别的,考虑到观测上2~3千米的热斑,它们也有可能是小质量的夸克星。在CCO上看到若干吸收线的特征,它们可能是电子在强磁场下的回旋吸收线^⑩,从而意味着CCO具有较弱的磁场。这点被后来CCO的计时进一步证明。

目前人们测得了三颗CCO的周期和周期导数,它们的周期在0.1秒左右,周期导数很小,对应的特征年龄在百万年甚至更高,特征磁场在 10^{10} G左右^⑪。而CCO的超新星遗迹年龄一般是万年量级,特征年龄显然和超新星遗迹的年龄有矛盾。因此,观测上提出了一个很显然的问题:为什么年轻中子星可以的观测表现可以差别如此之大?为什么有些年轻中子星是通常脉冲星,有些是磁星,有些则表现为CCO?

对于CCO的种种问题有许多可能性。CCO的特征年龄远大于它的超新星遗迹的年龄,这可能是由于CCO诞生时周期就和现在差不多。通常用的特征年龄的表达式在现在情形下不再成立。它们的特征磁场强度比较低,可能也和它们诞生时周期就比较大(自转比较慢)有关。中子星诞生时转动比较慢,因此可以利用的转动能有限。把转动能转变为磁能的物理机制(比如说:等离子体发电机),只能得到比较弱的磁场。在这个框架下,年轻中子星的不同表现,原因是它们诞生时周期和磁场不同。现在

观测上看到越来越多的脉冲星品种,从而要求超新星爆发时诞生的中子星也各不相同。计算表明,不同的脉冲星品种要求的中子星诞生率有可能要高于银河系的超新星爆发率。这就促使人们考虑其他的可能性,比如:不同品种的脉冲星之间有演化关系。

一种设想的图像是,中子星诞生时均具有很强的磁场,在中子星刚诞生不久,会有不同数量的物质回落。如果回落的物质多,则中子星磁场可能被回落的物质掩埋,从而造成中子星磁场的降低。如果回落的物质可以高达0.1倍的太阳质量,则有可能造成中子星磁场有几个数量级的降低,比如:从 10^{14} G降到 10^{10} G,到达CCO的水平。回落物质携带的角动量也会造成中子星的自转变到一个比较慢的水平上。在后来中子星漫长的一生中,最初被掩埋的磁场会逐步扩散到中子星表面,因此预期CCO的磁场是不断增强的。CCO有可能从它现在的状态,逐步演化到通常脉冲星,甚至演化到磁星。最终的磁场依赖它初始诞生时的磁场强度。因此,人们预期Calvera脉冲星(一颗没有射电也没有伽马射线辐射的脉冲星)有可能是CCO和通常脉冲星的过渡源^⑫。在这个图像下,CCO的弱偶极磁场用来解释它们的周期和周期导数。同时要求,CCO具有强的壳层磁场,壳层磁场导致了中子星具有2~3千米的热斑,并有可能提供额外的加热能源。这就是“反磁星”的图像^⑬。在反磁星的图像中,关键要求是强的壳层磁场,因此所谓反磁星就是磁星,和低磁场磁星的物理图像非常相像。

类似前面XDINS,也可以从外部原因的角度去理解CCO。一颗年轻的中子星,如果存在回落盘的作用,则回落盘的力矩有可能解释CCO的周期和周期导数。回落盘也有可能贡献了星体的X射线光度。对CCO和Calvera的具体的计算表明,回落盘的想法是有可能的^{⑭⑮}。

4. 超新星遗迹 RCW 103 的 CCO: 磁星

现在我们可以对磁星、XDINS、CCO做一个小

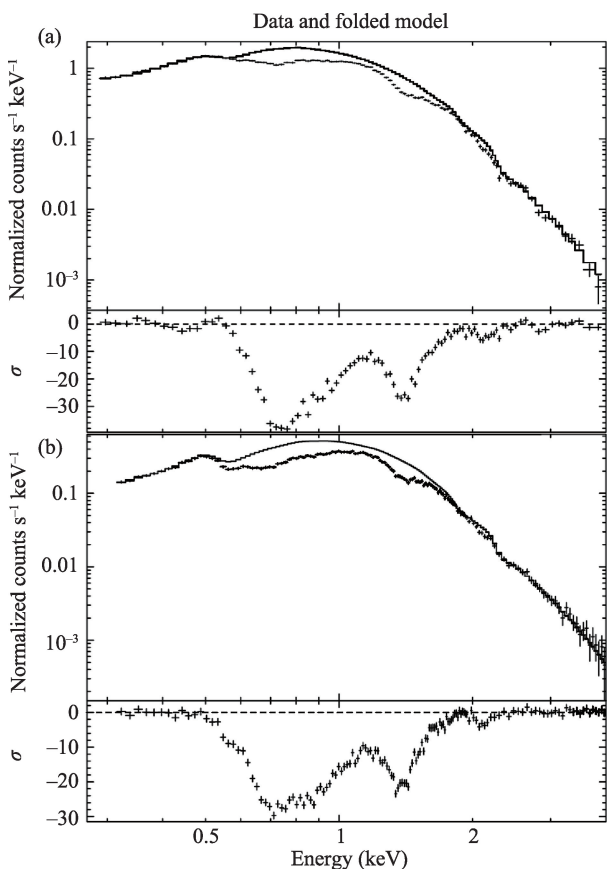


图2 一颗CCO (1E 1207-5209)的X射线能谱^⑧。图(a)和(b)是两个不同探测器的数据,以(a)为例,上面的图是观测数据点和能谱拟合(只拟合了连续谱,为黑体谱),下面一幅图是观测数据点和模型的残差,吸收线的特征清晰可见

结。当人们在观测上发现一些表现比较特殊的脉冲星时(不同于通常的转动供能的脉冲星和双星系统中吸积供能的脉冲星),这时人们倾向于认为:(1)从物态方程的角度,提出中子星的本质可能是夸克星,(2)用星体的强磁场来解释不同脉冲星的观测,(3)用中子星周围的环境,比如说:回落盘,来解释不同源的观测现象。物态方程和磁场可以称之为内因,回落盘可以称之为外因,而物态方程则又是内因中的内因。超新星遗迹RCW 103的CCO(图3)则告诉人们:它是一颗在回落盘作用下自转减慢的磁星,在这里内因和外因结合起来。

超新星遗迹RCW 103内的CCO,一方面和其他CCO一样是年轻的热辐射的中子星,另一方它也有自己的特点^⑨。一个特点是,它的光度有变化,可能来自中心天体的活动性。二是,它的X射线光度

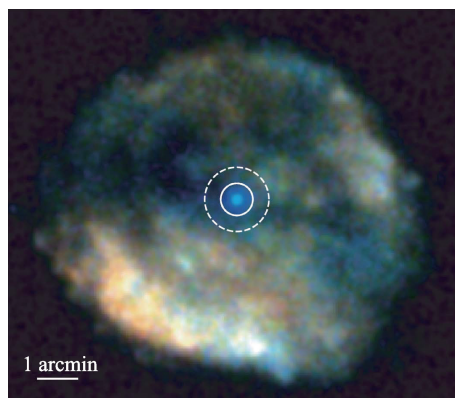


图3 这里展示的是超新星遗迹RCW 103(弥漫的面源)的CCO(中心点源)^⑩,后来它被证认为是一颗磁星

可能具有6.6小时的周期性。人们不太确定这个周期性是中子星的自转周期还是公转周期。2016年,RCW 103的CCO突然有爆发现象,而且伴随着星体X射线光度的增量,和短暂的硬X射线辐射成分的出现。所有的这些观测方面都和磁星的爆发活动类似,因此人们确认RCW 103的CCO应该是磁星^{⑪⑫}。而且,在爆发时期的观测也倾向于支持6.6小时的周期是中子星的自转周期。接下来的问题就是:一颗磁星为何能具有6.6小时的周期?

通常磁星的周期为10秒左右,在两颗磁星周围也看到了回落盘的可能证据^⑬。一种可能性是,一颗强磁场的磁星(磁场高达几倍的 10^{15}G)伴随着超新星爆发时产生的回落盘,盘的质量也比较大。强磁场和比较多的回落盘物质,在二者的共同作用下,最后吸积平衡时的周期有可能为观测上的几个小时^{⑭⑮}。而且如果磁星磁场稍弱,或者回落盘质量较小,则这时的磁星可能是一颗通常的磁星。用磁星加回落盘的图像,从而统一解释了不同品种的磁星(通常磁星,有回落盘的通常磁星,和周期为6.6小时的磁星)。

5. 结论:简单带来的挑战

脉冲星作为高能天体物理的研究对象之一,有着从射电到伽马射线全波段的辐射。在软X射线波段,若干脉冲星展现出一个热辐射主导的能谱。对于一个复杂的壳层、大气和磁层系统,要想产生一个简单的热谱主导反而是件有困难的事情。因此,

XDINS 和 CCO 的问题,可以概括为:简单带来的挑战。在之前的研究过程中,这些来自中子星表面的热辐射告诉人们,所谓的中子星可能不是中子星,而是夸克星,而且是没有壳层的裸的夸克星。在强磁场作用下,中子星壳层和大气的凝聚状态可能会有质的改变,变成裸的中子星。中子星周围的回落盘也有可能造成观测上中子星不同的表现形式。

目前观测比较多的几颗 XDINS 和 CCO 都是离地球比较近的源,因此可以预期,未来更灵敏的观测肯定会发现数目更多的 XDINS 和 CCO^②。中国的五百米口径射电望远镜 FAST 未来会发现更多的脉冲星,这其中也会有更多特殊品种的脉冲星。中国的慧眼 HXMT 卫星和未来的 eXTP 卫星则会给出更多 X 射线脉冲星更精确的能谱和计时,从而有可能分辨它们究竟是裸的夸克星,还是裸的中子星。中国的空间站 2 米光学望远镜, JWST 等下一代的光学和红外设备,则有可能观测到更多中子星回落盘的辐射,从而确定回落盘在中子星系统的作用究竟有多大。对 XDINS 和 CCO 这些简单脉冲星的研究,有望给脉冲星若干基本问题以明确回答。

参考文献

① Burwitz, V., Zavlin, V. E., Neuhauser, B., et al., 2001, A&A, 379, L35.

- ② Xu, R. X., 2002, ApJL, 570, L65.
 ③ Turolla, R., Zane, S., Drake, J. J., 2004, ApJ, 603, 265.
 ④ van Kerkwijk, M. H., & Kaplan, D. L. 2007, ApSS, 308, 191.
 ⑤ Kaplan, D. L., Kamble, A., van Kerkwijk, M. H., & Ho, W. C. G. 2011, ApJ, 736, 117.
 ⑥ Ho, W. C. G., Kaplan, D. L., Chang, P., et al., 2007, MNRAS, 375, 821.
 ⑦ Tong, H., Xu, R. X., Peng, Q. H., & Song, L. M. 2010, RAA, 10, 553.
 ⑧ Tong, H., Xu, R. X., Song, L. M., 2011, RAA, 11, 1371.
 ⑨ Wang, W. Y., Lu, J. G., Tong, H., et al., 2017, ApJ, 837, 81.
 ⑩ Wang, W. Y., Feng, Y., Lai, X. Y., et al., 2018, RAA, 18, 82.
 ⑪ Xu, R. X., Wang, H. G., Qiao, G. J., 2003, CPL, 20, 314.
 ⑫ Gotthelf, E. V., Halpern, J. P., Alford, J., 2013, ApJ, 765, 58.
 ⑬ Halpern, J. P., Bogdanov, S., Gotthelf, E. V., 2013, ApJ, 778, 120.
 ⑭ Benli, O., Ertan, U., 2018, MNRAS, 478, 4890.
 ⑮ Li, Y. Y., Wang, W. Y., Ge, M. Y., et al., 2018, ApJ, 854, 165.
 ⑯ Bignami, G. F., Caraveo, P. A., De Luca, A., Mereghetti, S., 2003, Nature, 423, 725.
 ⑰ Esposito, P., Turolla, R., De Luca, A., et al., 2011, MNRAS, 418, 170.
 ⑱ De Luca, A., Caraveo, P. A., Mereghetti, S., et al. 2006, Science, 313, 814.
 ⑲ D' Ai, A., Evans, P. A., Burrows, P. A., et al. 2016, MNRAS, 463, 2394.
 ⑳ Rea, N., Borehese, A., Esposito, P., et al. 2016, ApJL, 828, L13.
 ㉑ Wang, Z., Chakrabarty, D., & Kaplan, D. L. 2006, Natur, 440, 772.
 ㉒ Li, X. D., 2007, ApJL, 666, L81.
 ㉓ Tong, H., Wang, W., Liu, X. W., Xu, R. X., 2016, ApJ, 833, 265.
 ㉔ Rigoselli, M., Mereghetti, S., Tresoldi, C., 2022, MNRAS, 509, 1217.

科苑快讯

木星最大卫星在大红斑上的阴影

在第 40 次飞越木星时,美国宇航局(NASA)的朱诺(Juno)探测器捕捉到独特而壮观的景象:木星最大的卫星木卫三(Ganymede)的阴影就在这颗大理石般的行星上。

美国宇航局的新闻稿称,拍照的那一刻,朱诺正在这个巨大气体行星云层上空约 4.4 万英里(约 7.1 万千米)处盘旋,而木卫三在 66.6 万英里(约 107.2 万千米)外环绕木星运转。

美国宇航局的博客中说,在这些云层的顶部观察木卫三与观看日全食无异,但木星上的这种日全食比地球上更常见。因为木星有 4 颗大卫星,它们的轨道

倾斜度也与这颗巨大的行星相似,导致风暴表面投下巨大的阴影。

这可能不会是你最后一次听到木卫三,欧洲航天局(ESA)新的冰月探测器(JUICE)将于 2023 年 4 月开始为期 8 年的旅程,研究木星及其一些著名的卫星,包括木卫四、木卫二,当然还有木卫三。据 ESApress 在 3 月发布的消息,该航天器将进一步调查这颗最大卫星的内部海洋,它“不仅是一个天体,而且是一个可能的生命栖息地”。

(高凌云编译自 2022 年 4 月 26 日 Popular Science 网站)