

射电脉冲星

卢吉光

(中国科学院国家天文台 100101)

1. 脉冲星的发现

我们所熟知的有辐射天体大都如太阳一般,持续不断地向四面八方辐射光和热,但并非所有天体的辐射皆是如此。有一类神奇的天体,在天空中如霓虹灯般不断闪烁,它们就是大名鼎鼎的宇宙灯塔——脉冲星。

谈及脉冲星,不得不提及蟹状星云。蟹状星云是中国宋代古籍中记载的1054年超新星爆发的遗留物。天文学家发现蟹状星云在不断加速膨胀,而且还在持续不断地进行相当于几万颗太阳强度的辐射(图1)!然而,它为何能加速膨胀,又为何能产生如此强烈的辐射?1964年,前苏联天文学家Nikolay Kardashev一语道破真相:恒星演化末期塌缩为一

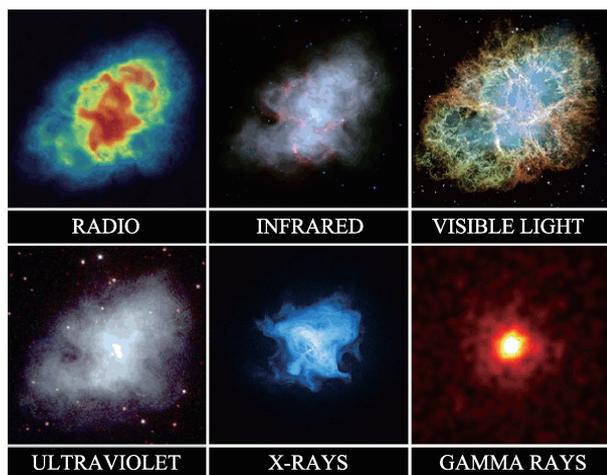


图1 蟹状星云在各个频段的辐射 (图片来源:NRAO/AUI & M. Bietenholz; NRAO/AUI & J.M. Uson, T.J. Cornwell(RADIO); NASA/JPL-Caltech/R. Gehrz / University of Minnesota (INFRARED); NASA, ESA, J. Hester and A. Loll / Arizona State University(VISIBLE LIGHT); NASA/Swift/E. Hoversten, PSU (ULTRAVIOLET); NASA/CXC/SAO/F.Seward et al.(X-RAYS); NASA/DOE/Fermi LAT/R. Buehler(GAMMA RAYS))

颗带有强磁场的高速自转致密天体,蟹状星云的辐射能量来自致密天体的转动能^①。意大利天文学家Franco Pacini更是用鞭辟入里的分析指出,在蟹状星云中存在一颗高速自转的磁化中子星,中子星的转动能或磁能转化为电磁辐射对蟹状星云供能^②(图2)。这一看法已经与当今的射电脉冲星图景别无二致!

不过还没有等到天文学家去验证Pacini的想法,脉冲星就被发现了!同年,英国天文学家Antony Hewish和他的研究生Jocelyn Bell女士在研究行星际闪烁时,接收到了以稳定时间间隔出现的射电脉冲信号^③(图3)。这种极规律的时变辐射显然不是来源于当时已知的任何天体。Hewish等人通过分析信号的色散与周期性,确定它来自于约65秒差距之外的新类型天体,大家将其命名为脉冲星(pulsar)。脉冲星这一名称,已难以确认具体是源于pulsating star的缩写还是pulsating和quasar的结合,众说纷纭,莫衷一是,但它的名字将光辉灿烂,长久流传。

自脉冲星发现以来,天文学家被这种神奇的天体激发出难以阻挡的热情,使用各种方法去搜寻探索。到目前为止,已经搜寻到超过3000颗脉冲星,都位于银河系及附近的矮星系中。这些脉冲星里,周期最长可达23.54秒^④,最短的却只有1.396毫秒^⑤,之间的跨度超过4个数量级!如此大的周期跨度导致了不同脉冲星间巨大的性质差别,研究内容与方式自然也不可等量齐观。天文学家还发现它们的周期并非是一成不变的,而是每颗星的周期以特有的变化率逐渐增加。更进一步的研究表明,脉冲星的周期和周期变化率与各种其他观测性质都有一定关系,因此周期及其变化率也成为脉冲星分类的

ASTRONOMY

Energy Emission from a Neutron Star

ALTHOUGH there are still many problems concerning the supernovae, there is little doubt that a very dense stellar core has to be left behind after the explosion (at least in some cases). During the contraction of this core, inverse β reactions take place and transform most of the nuclei and electrons into neutrons. If the mass of the neutron star does not exceed a critical value of about one or two solar masses, a stable equilibrium situation can be reached with the gas pressure balancing the gravitational force.

A newly formed neutron star is an excited object. Apart from its thermal content (which will be dissipated very fast because of neutrino processes), there will also be much energy stored in vibrational and rotational form. The problem therefore arises of finding out whether the energy stored in the neutron star plays an important part in connexion with the activity observed in some supernova remnants such as the Crab Nebula.

The vibrations of the neutron star, however, do not last long enough for our purposes. The principal reason for this is that the emission of gravitational waves will damp quadrupole and higher order pulsations in a few seconds (ref. 1 and unpublished work of T. A. Wheeler and A. Zee). Moreover, because the stellar rotation will mix the radial modes of vibrations with the non-radial one, all the vibrations are going to disappear very quickly.

From a quantitative point of view, no difficulty arises because of the large amount of energy which can be stored in the neutron star under the rotational and magnetic form. As suggested by Hoyle, Narlikar and Wheeler⁴, generation of high energy electrons can be expected in the region where the electromagnetic waves are reflected and cause a rapid compression of the nebular gas.

It seems therefore that, when the oblique rotator model is realized, it can lead to a release of energy from the neutron star. It is, however, clear that the model is very idealized and requires further investigation. In particular, it would be important to evaluate the emission of gravitational waves from the star. This will depend on the mass distribution in the star as influenced by the rotation and magnetic field and will determine the ability of the gravitational waves to carry out rotational energy and angular momentum from the star.

I thank Dr E. E. Salpeter, Dr E. Schatzman and Dr M. Simon for advice. Part of this work was written while I was participating in the International Research Group on Relativistic Astrophysics at the Institut d'Astrophysique, Paris. I also thank several co-participants, in particular Dr J. Bardeen, Dr C. Chiuderi and Dr K. Thorne, for discussions. This work was supported by the US National Science Foundation.

F. PACINI

Center for Radiophysics and Space Research,
Cornell University,
New York.

Received October 3, 1967.

图2 意大利天文学家Franco Pacini于1967年在Nature发表文章的开篇与结尾^② (该文预言了脉冲星的存在与能量释放)

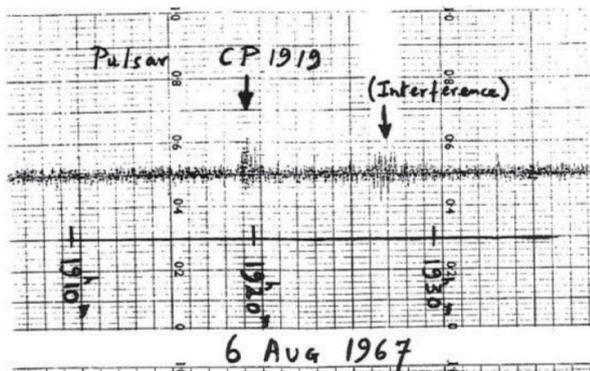


图3 发现脉冲星 PSR B1919+21(CP1919)的原始记录 (脉冲星名的含义:PSR是pulsar的缩写;B是1950年建立的标准历元贝塞耳纪元B1950.0的首字母,而国际天文学会规定从1984年起使用儒略纪元J2000.0,之后发现的脉冲星名以字母J开始;1919+21代表了脉冲星的赤道坐标位置赤经19时19分与赤纬+21度,而在J2000.0历元的脉冲星命名中赤纬的精度会达到角分量级。)

重要参数。图4显示了目前大部分已认证脉冲星的周期和周期导数,在图上可以明显看到几个不同的团块:中间周期大约在0.1秒到1秒之间的团块是普通脉冲星,大部分脉冲星属于这一分类;左下角的团块对应的脉冲星周期短,周期变化率也非常低,它们属于毫秒脉冲星分类;右上角以绿色菱形标注的源周期长,周期变化率大,属于反常X射线脉冲星(AXP)分类(参见本期林琳的文章《磁星》)。当然,

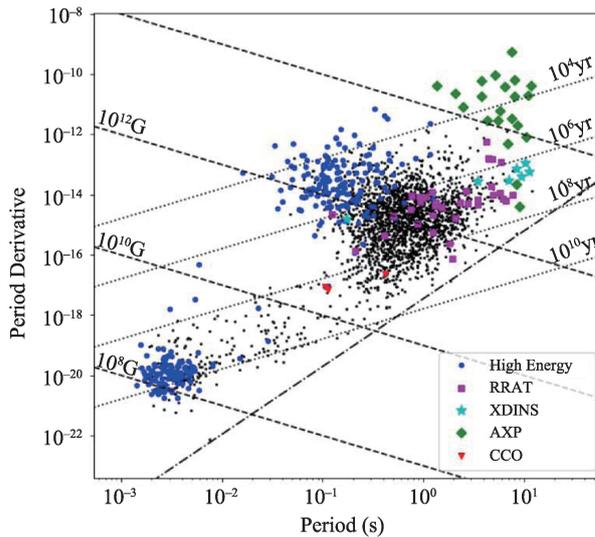


图4 脉冲星周期-周期导数图 (图中标注了脉冲星周期-周期导数图、反常X射线脉冲星 AXP、暗热中子星 XDINS、中心致密天体 CCO 等分类)

脉冲星可并不只有这么三个类别,即使只是图4中标注出来的至少就还包括暗热中子星(XDINS)(参见本期全号的文章《热辐射主导的脉冲星》)。此外,脉冲星还可以按照辐射波段进行分类,分为射电脉冲星和高能脉冲星(参见本期葛明玉的文章《高能脉冲星》)。脉冲星的种种分类不一而足,而本篇将把目光集中在射电脉冲星上(图5)。

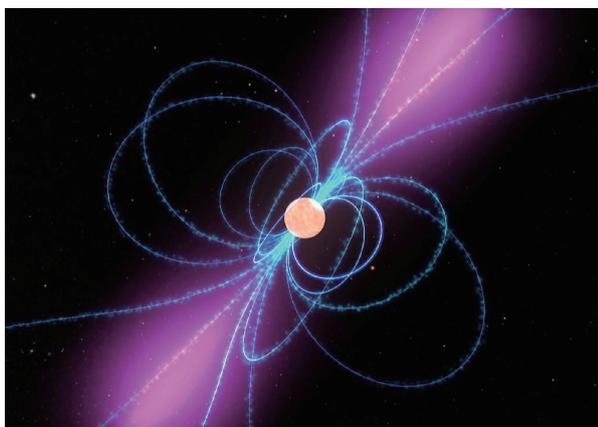


图5 脉冲星的简单辐射图景:辐射由磁极发出(图片来源:NASA)

2. 辐射行为

脉冲星,顾名思义,其辐射以脉冲形式集中发出,而这也是脉冲星发现早期大家对脉冲星的认知。随着已知脉冲星数目日渐增加,关于脉冲星的认知也随之变化。这类天体的辐射并非总是以脉冲形式发出,也存在其他各种形状——比如正弦形(参见本期葛明玉的文章《高能脉冲星》)——的辐射模式。有趣的是,脉冲星辐射在射电波段绝大部分还依然是脉冲形式,某种程度上也算是对脉冲星之

名的一种慰藉吧。目前公认的理论中,脉冲星本质是带有强磁矩的高速旋转的致密星,它的辐射具有各向异性,在它的转动过程中我们接收到周期性的辐射,而射电(或其他波段)脉冲信号正是这些辐射中的一部分^①。

射电辐射起源 脉冲星的辐射是怎么来的呢?这要从脉冲星的强磁场说起。由于脉冲星的辐射及其他因素提取脉冲星自转能量,脉冲星的转动速度逐渐降低。如果假设脉冲星制动的主导机制为磁偶极辐射,再考虑到脉冲星的半径大约为10千米(参见本期高勇的文章《中子星内部结构》),那么可以根据脉冲星的自转减慢速度估算出脉冲星表面的磁偶极场强度大约为 $10^8 \sim 10^{14}$ 高斯。这一计算得到的磁场也被称为脉冲星的特征磁场,在图4中虚线划分的就是它的强度。由于电磁感应原理,星体转动时在脉冲星磁层中会感应产生高强度的电场。对于磁轴与转轴重合的平行转子,极点与赤道之间的电势差甚至可高达 10^6 伏特。若星体外部的磁层中不存在荷电粒子,那么感生电场将驱使星体中的电荷重新分布(图6),最终在极区诱导产生平行于磁场方向的强度高达 10^{11} 伏特每米的电场,而强

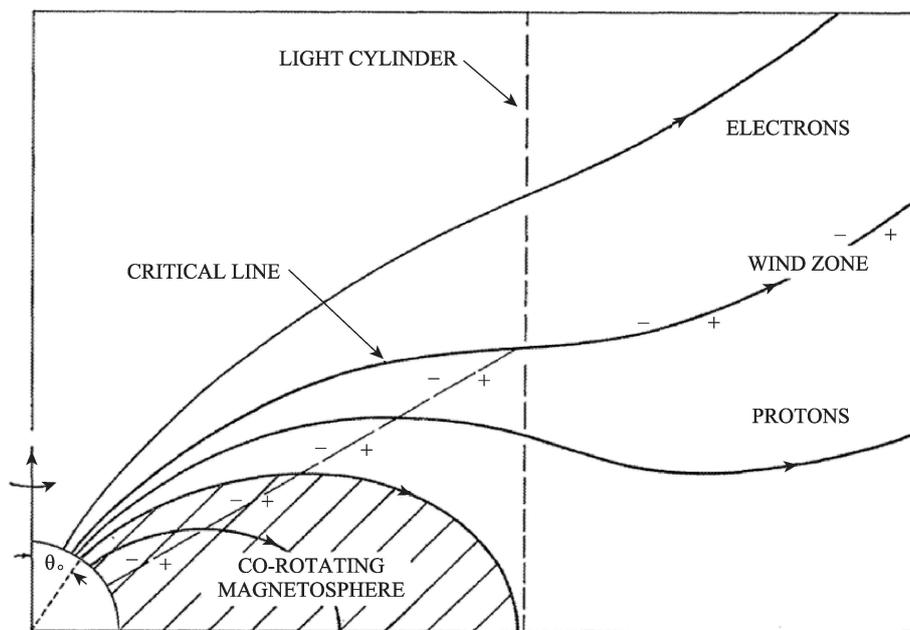


图6 转轴与磁偶极场轴平行脉冲星的磁层示意图 (Goldreich & Julian (1969)^②的计算结果表明,偶极场磁层中电荷密度为正的区与电荷密度为负的区域会分开)

电场则会将星体中的荷电粒子拉入磁层,因此脉冲星磁层中一定存在自由电荷。在磁层中,强磁场作用下的自由电荷难以跨越磁场线,只能沿固定磁场线滑动,故而这些电荷会随星体共转。考虑到粒子运动速度不能超过光速,该类共转只能维持在以脉冲星自转轴为轴线的某个圆柱内部(称为光速圆柱)。理论表明,光速圆柱内的电荷分布满足 Goldreich-Julian 电荷分布时^⑥,平行于磁场方向的电场被屏蔽,共转电荷与电磁场将达成平衡。但实际上,共转电荷会在磁场与感生电场的共同作用下沿磁场线运动而非保持相对静止,因此理论上的平衡条件难以达成,脉冲星磁层中一定会存在不满足 Goldreich-Julian 电荷分布的区域。在这些区域中,电场存在平行于磁场的分量,荷电粒子在其中会被诱导产生与加速,而加速后的粒子则会沿运动方向发出辐射,这便是脉冲星辐射的来源^{⑦⑧⑨}。荷电粒子不断被产生、加速并最终脱离脉冲星磁层,形成了一整套完整的准动态平衡过程。由于产生与加速粒子的区域是相对稳定的,粒子固定在磁场线上运动,而射电辐射又沿粒子运动方向,因此在任意方向的辐射特征都是相对稳定的^{⑩⑪⑫}。辐射集中的区域称为辐射束,当射电辐射束扫过地球时,指向该脉冲星的射电望远镜就有可能接收到一组脉冲信号(图7中展示了一种辐射束几何)。曾经各向同性发光发热的恒星在演化末年暴发后重焕生机(参见本期王维扬的文章《中子星相关的暂现事件》),却摇身一变成为一颗各向异性极强的天体,不得不让

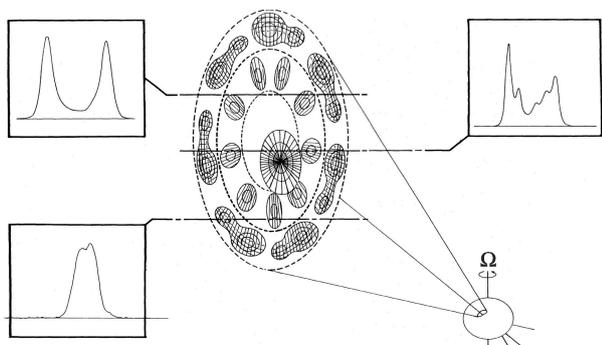


图7 Rankin (1983)^⑩一文对脉冲星辐射束形状的推测
(辐射束可能存在一个核心与两个辐射锥,
视线沿不同位置切过时会导致不同形状的脉冲轮廓)

人感慨大自然的鬼斧神工。值得一提的是,这些辐射束相对较窄,因此并非所有同类天体的射电辐射都能在地球上被探测到,辐射束能够扫过地球的射电脉冲星可谓百里挑一。

射电平均脉冲轮廓 在每一固定方向上稳定的辐射特征带来了稳定的平均脉冲轮廓。尽管在不同时刻的辐射情况存在差异,但其平均值总是趋于定值(图8)。这意味着,对应于脉冲星转动的每一个特定相位,地球接收到的平均辐射能量总是保持稳定。因此,如果把某一脉冲星的观测流量数据在不同相位上分别进行平均,得到的脉冲轮廓将趋于特定形状。从以上推理过程可以看出,平均脉冲轮廓反映的是辐射束与视线相切方向上的辐射情况,所以通过分析平均脉冲轮廓可以管中窥豹,反推出辐射束的某些整体信息。举例来说,若辐射束像是激光笔发出的光束,那么对应的平均脉冲轮廓就只有一个峰;若辐射束是环形光场(从脉冲星的角度看起来像个锥面,也称为辐射锥),那么对应的平均脉冲轮廓就会变成双峰结构。如果各个脉冲星具有类似的辐射束,那么通过比对大量的平均脉冲轮廓就可以获得辐射束形状。然而事实不尽如人意,不同脉冲星的平均脉冲轮廓间有着天壤之别,这使

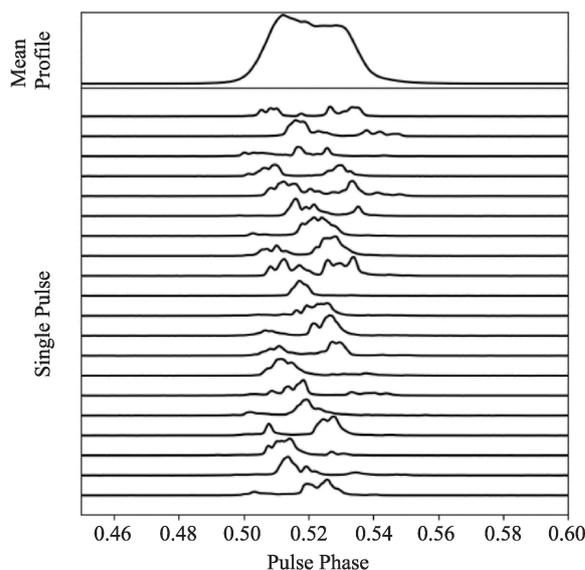


图8 FAST望远镜观测到的脉冲星 PSR B2016+28 的平均脉冲轮廓与单脉冲

得复原辐射束形状几乎成为不可能。种种辐射束几何模型应运而生,有的模型认为辐射束近乎于圆对称^⑧,或者像扇叶样呈放射状^⑨,也有模型认为辐射束可能并没有固定特征^⑩。有趣的是,各种理论都能在不同的脉冲星上找到其相应的证据,令人瞠目结舌。

射电单个脉冲 脉冲星在每个方向上的稳定辐射特征,并不只包括平均特性,其演化特征也是稳定的,而且不同方向辐射的演化特征之间还存在相关性。这意味着,脉冲星的大量单个脉冲的统计特性与相关特性中同样与辐射过程息息相关。脉冲星单脉冲现象中最具特色的是子脉冲漂移现象,不可不提。脉冲星单个脉冲间差异巨大,辐射集中的相位区域参差不齐。对于大部分脉冲星,这种集中辐射(称为子脉冲)区域的位置是难以预测的。但对于某些脉冲星,我们能够看到子脉冲位置以不变的速度地进行移动,从脉冲图上看来这些子脉冲就像是在向某个方向漂(图9)。这一现象称为子脉冲漂移,它意味着脉冲星的辐射区域之间是存在关联的。关于这一现象的解释有多种,其中最经典的图景当属旋转木马模型。当我们从侧面对旋转木马进行录像时,每一帧中的木马位置相比于前一帧都移动了大致相同的距离。如果辐射束中的结构在以某种角速度进行旋转,那么视线切割辐射束得到的子脉冲就会如旋转木马一般移动。如果把子脉

冲漂移作为单脉冲相关特性现象的代表,那么统计特性现象中的代表当属巨脉冲。脉冲星每个周期的辐射差别巨大,辐射流量自然也各不相同,总体上呈现出类似于对数正态分布的特性:流量特别低的周期很少,流量特别高的周期也很少。但有些脉冲星会偶尔发射出流量高于平常辐射十倍以上的单脉冲,这些单脉冲称为巨脉冲(图10^⑪)。显然,巨脉冲与普通脉冲有着不同的辐射过程,种种特性甚至暗示着它可能起源于光速圆柱之外^{⑫⑬⑭}。形形色

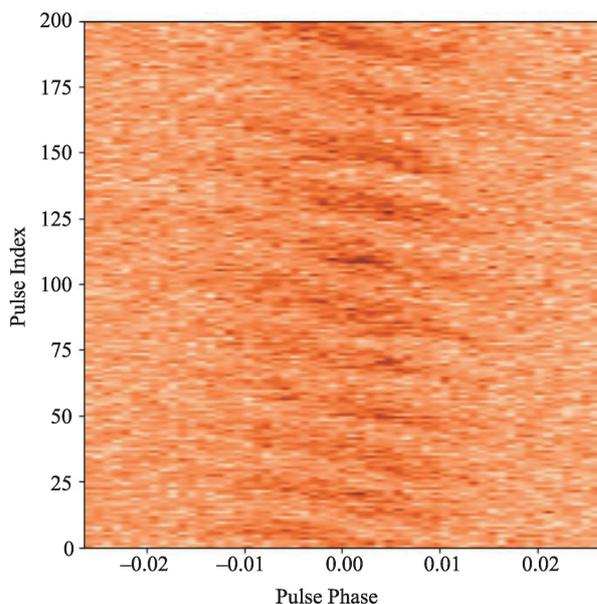


图9 Parkes 望远镜观测到的脉冲星 PSR B1819-22 的单脉冲 (图中可以清晰地看出子脉冲的漂移情况)

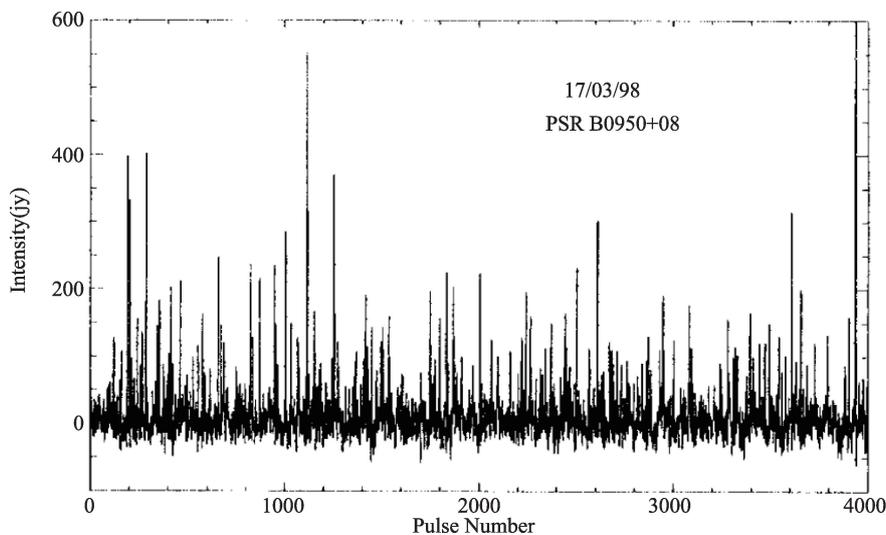


图10 脉冲星 PSR B0950+08 的巨脉冲 (可以看到某些脉冲的流量要远高于其他脉冲。图片来源:Singal (2001)^⑮)

色的脉冲星有着多姿多彩的辐射特征,而相关的单脉冲特性更是不可胜数,相关文献资料卷帙浩繁,这里也只能择其一二来展示冰山一角。

3. 转动行为

脉冲星的辐射提取脉冲星自转能量,导致脉冲星转动逐渐减慢。换句话说,地球上观测到的脉冲星之间的间隔逐渐增长。假如脉冲周期的增加速度遵从某种特定规律,那么就可以预测未来每一个脉冲到达地球的准确时间。然而,我们目前对于脉冲星制动过程的认知有限,尚未总结出普适的自转减速规律。不过这并不妨碍我们构建一些简化模型对脉冲到达时间进行预测,其中一个行之有效的办法是对脉冲周期的变化函数进行级数展开。首先通过初步测量得到该展开式的低阶项,之后随着观测时间的累积会逐渐增加对高阶项的描述,在预测脉冲到达时间时只要将更高阶当作小量即可。这也是当前脉冲到达时间预测算法中广泛使用的方法。显然,这一方法并不精确,因此预测结果与实际情况存在一定偏差。将预测结果与真实的脉冲到达时间进行比对,并对其差别(计时残差)进行研究的这个过程称为脉冲星计时^⑩。

影响计时的因素 尽管脉冲星的转动模型只需要进行简单的级数展开,但脉冲星计时却并不简单,因为信号从脉冲星传播到望远镜的时间并不是固定不变的^⑪。首先,望远镜会随着地球的自转与公转而运动,脉冲星自身也会因为其他天体的引力而发生运动,这导致望远镜与脉冲星间的相对距离会发生变化。实际的计时过程中,由于天体运动而导致的时间延迟是比较容易进行修正的。望远镜的运动导致的延迟时间可以通过加载根据测量与计算获得的太阳系星历进行修正,脉冲星如果处于双星系统中也可以通过测定双星轨道参数(如轨道半径、脉冲星及伴星质量等)获取相应的延迟时间模型。而且,在构建了太阳系星历与双星系统的轨道模型后,与相对论效应相差的坐标系转换及附加的传播延迟时间也可以同时进行修正。影响脉冲

传播时间的因素除了传播距离外,还需要考虑辐射传播速度的变化。由于脉冲星到地球的传播路径上存在星际介质,辐射传播速度会略微小于光速,且波长越长的辐射传播速度越小,这一效应称为色散(图 11^⑫)。每一时刻的色散强度可以通过比对观测数据中长波辐射与短波辐射的脉冲到达时间之差来确定,并将其导致的时间延迟进行修正。

计时与脉冲星物理 脉冲星计时对于研究脉冲星物理举足轻重。首先,脉冲星计时可以对脉冲星质量等参数进行精确测量,进而可以对脉冲星物态进行限制(参见本期高勇的文章《中子星内部结构》)。其次,脉冲星制动是由于脉冲星星体及星周的物理过程提取了星体转动能,通过分析计时残差便可对这些物理过程进行限制。举个例子,使用脉冲星转动的级数展开模型可以拟合计时残差得到脉冲星周期 P 、周期对时间的导数 \dot{P} 及二阶导数 \ddot{P} , 定义制动指数 $n = \dot{P}^2 / P\ddot{P}$ ^{⑬⑭}。理论计算表明,

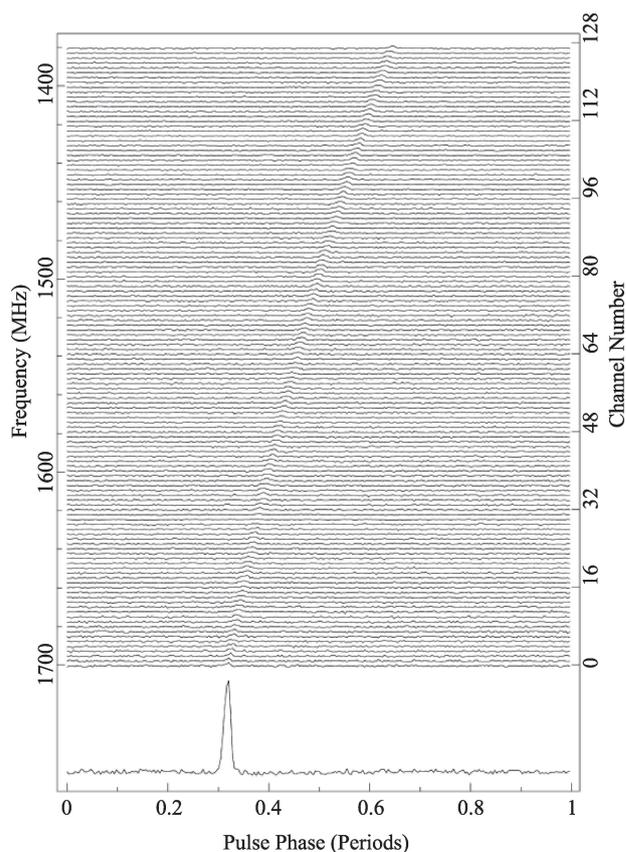


图 11 脉冲星 PSR B1933+16 不同频率的色散情况,低频辐射比高频辐射会更晚被接收到(图片来源:Wang et al. (2000)^⑫)

由磁偶极辐射主导脉冲星制动其制动指数等于3,纯粹引力波制动的天体制动指数为5^③,而星风主导的制动甚至能带来小于1的制动指数^④。分析制动指数便可对脉冲星制动模型进行检验。此外,脉冲星的周期并不总是连续变化的,有的脉冲星的转动速度会突然加快,这种现象称为周期跃变⁽²⁾(glitch,见图12^⑤)。显然,转速增加有两种可能性,一种是角动量突然增加,另一种是转动惯量突然减小,而两者都有相应的模型。前者认为脉冲星内部成分与壳层耦合程度会在某种机制作用下突然增加,使内部角动量转移到壳层^⑥;后者认为脉冲星会发生类似于地震的结构变化,星体几何构型改变导致转动惯量突然减小^⑦。目前观测证据不足,两种模型见仁见智,难有定论。

脉冲星计时应用 高精度的脉冲星计时还可以作为其他科学研究的测量仪器与实验平台。在脉冲星计时过程中需要观测记录脉冲到达时间并在计算过程中加载太阳系星历,此二者分别是基于对时间及太阳系天体位置的测量,而并非颠扑不破的

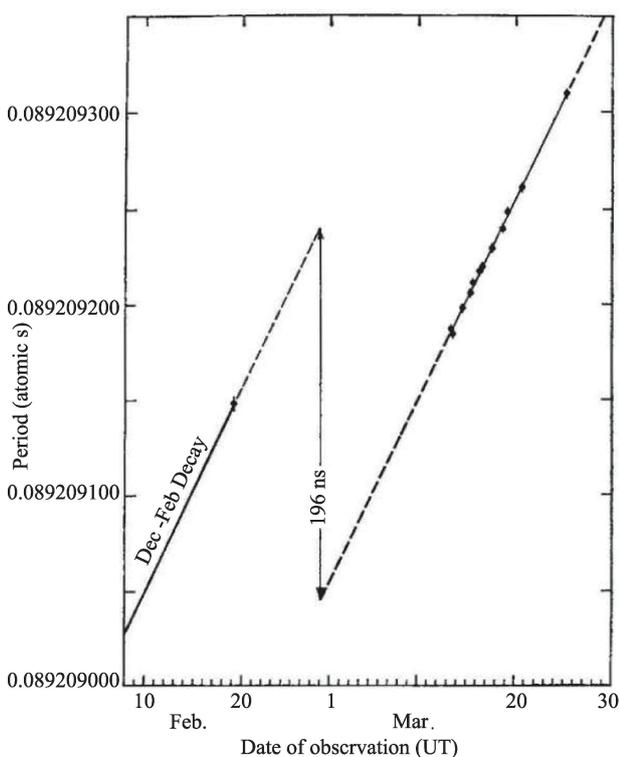


图12 脉冲星 PSR B0833-45(Vela 脉冲星)发生脉冲突跳,周期突然增加(图片来源:Radhakrishnan & Manchester (1969)^⑧)

真理。实际上,脉冲星转动的精度要远远超过测量精度。如果把造父变星比喻成测量宇宙距离的“量天尺”,那脉冲星当可谓之“宇宙之钟”。自转稳定度极高的脉冲星是绝无仅有的天然高精度计时器,其长时标转动精度超过当前任何人工制造的计时系统。目前广泛使用的时间是基于原子超精细结构能级测量得到的原子时,而基于脉冲星计时则可以确定脉冲星时间基准^⑨,而这一基准将拥有更高的时频稳定性与精确性,并能够更方便地在大尺度上进行校对。同时,通过分析脉冲星计时残差可以对太阳系星历进行修正^⑩。利用脉冲星计时不仅可以测量太阳系内的天体参数及时间流动,还可以测量更远距离上的天体运行情况,而这就需要通过分析计时残差中的引力波信号来实现。遥远星系中的天体辐射出引力波,带动空间距离在不同方向上发生不同的变化。当引力波传播到银河系时,脉冲星与地球间的距离就会发生周期性改变,且不同方向脉冲星的距离改变量不同。这一距离上的变化会带来脉冲星计时残差的波动(图13)。测量并比较不同方向脉冲星计时残差中的波动情况,即可推算出引力波的传播方向、振动频率及幅度,进而可分析得到引力波源的运动情况^⑪。此外,高精度脉冲星计时还可作为检验引力理论的实验平台。目前描述引力的理论中受众最广的是广义相对论,然而广义相对论与量子理论之间目前还存在着不可

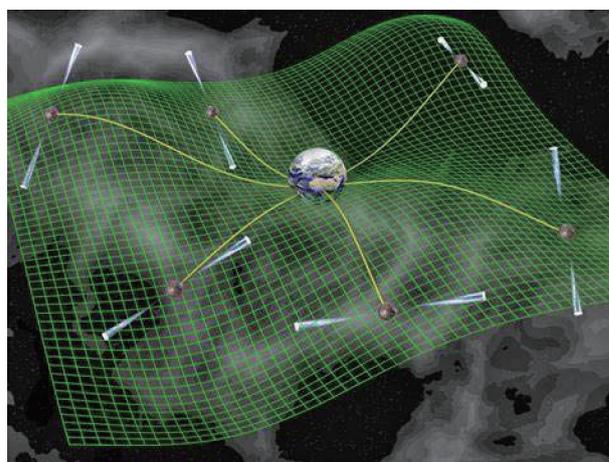


图13 脉冲到达时间受到时空弯曲的影响,因此可以通过脉冲星计时来测量引力波(图片来源:David Champion/NASA/JPL)

调和的冲突,这可能意味着修改引力理论——如标量-张量理论——的合理性。通过测量强引力场中脉冲星(比如双致密星系统中的脉冲星)的轨道演化与广义相对论预言结果的偏差,便可以获得对各类引力理论的限制^⑤。

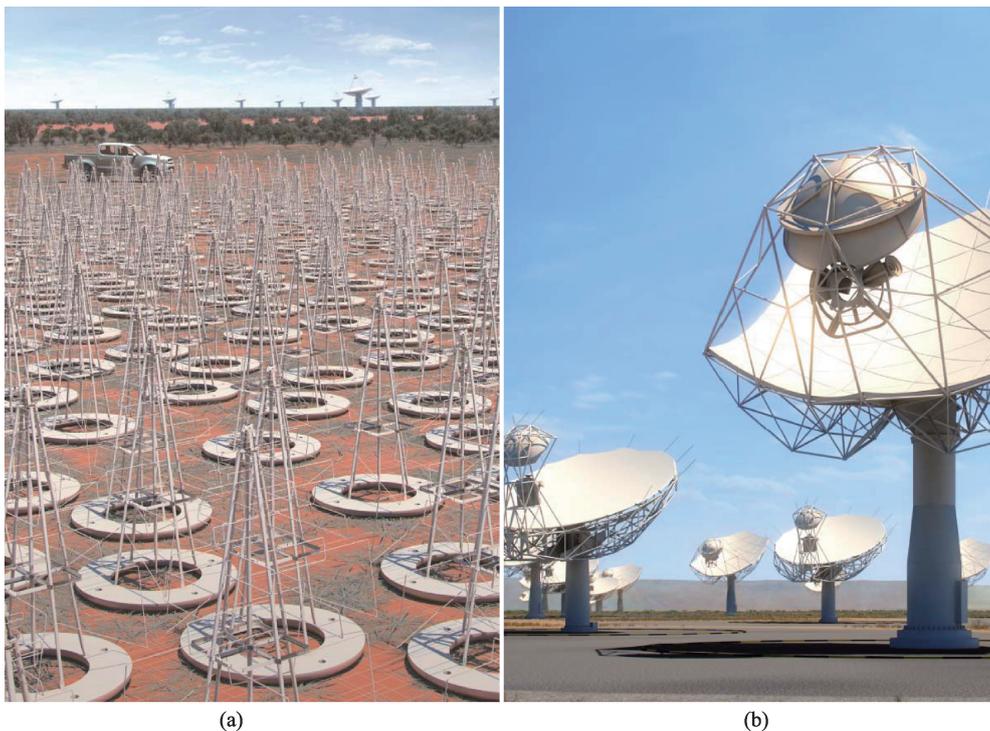
4. 结论与展望

自1967年发现脉冲星以来,已经过去了半个多世纪。我们在脉冲星发现初期构建起了脉冲星辐射图景的整体框架,而后对辐射细节的刻画过程却是举步维艰。关于脉冲星辐射理论的文献林林总总,浩如烟海,涵盖了对脉冲星磁场几何、辐射区域、辐射粒子分布和辐射机制等方方面面的描述。令人遗憾的是,这些理论虽然各有其道理,但绝大部分理论都很难获得广泛认可。不被认可的原因一方面在于某些理论有着固有的瑕疵,比如唯象理论缺乏严格的论证,或者从第一性原理出发的理论难以与观测相匹配,或者只能解释脉冲星中的一部分现象或一部分脉冲星中的现象;另一方面在于没

有足够灵敏的望远镜对脉冲星进行观测,多种理论在当前的观测灵敏度下难以区分。种种原因,使得尽管已经五十多年过去,我们至今却仍未能确定脉冲星辐射过程的任何一点细节。但我们并非原地踏步:我们有了众多的理论等待观测去检验!另一方面,我国设计建设的大型单口径射电望远镜FAST已投入使用(图14^⑥),我国参与建造的平方公里阵也即将建成第一阶段^⑦(SKA1,见图15),它们都



图14 FAST望远镜照片(图片来源:Jiang et al. (2019)^⑥)



(a)

(b)

图15 SKA1 低频(a)与中频(b)望远镜阵概念图(图片来源:SKAO)

具有极高的灵敏度！二者相加意味着我们有望在脉冲星研究方面做出重大突破！这是一个承前启后的时代，正在等待我们继往开来！

参考文献

- ① Kardashev, N. S. 1965, *Sviet Astronomy*, 8, 643
- ② Pacini, F. 1967, *Nature*, 216, 567
- ③ Hewish, A., Bell, S. J., Pilkington, J. D. H., et al. 1968, *Nature*, 217, 709
- ④ Tan, C. M., Bassa, C. G., Cooper, S., et al. 2018, *ApJ*, 866, 54
- ⑤ Hessels, J. W. T., Ransom, S. M., Stairs, I. H., et al. 2006, *Science*, 311, 1901
- ⑥ Goldreich, P. & Julian, W. H. 1969, *ApJ*, 157, 869
- ⑦ Ruderman, M. A. & Sutherland, P. G. 1975, *ApJ*, 196, 51
- ⑧ Arons, J., 1983, *ApJ*, 266, 215
- ⑨ Cheng, K. S., Ho, C., & Ruderman, M., 1986, *ApJ*, 300, 500
- ⑩ Rankin, J. M., 1983, *ApJ*, 274, 333
- ⑪ Manchester, R. N., 1995, *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 16, 107
- ⑫ Wang, H. G., Pi, F. P., Zheng, X. P., et al., 2014, *ApJ*, 789, 73
- ⑬ Singal, A. K. 2001, *Ap&SS*, 278, 61
- ⑭ Wang, W., Lu, J., Zhang, S., et al. 2019, *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, 62, 979511
- ⑮ Lyubarsky, Y. 2019, *MNRAS*, 483, 1731
- ⑯ Philippov, A., Uzdensky, D. A., Spitkovsky, A., et al. 2019, *ApJL*, 876, L6
- ⑰ Nelson, J., Hills, R., Cudaback, D., et al. 1970, *ApJL*, 161, L235
- ⑱ Hobbs, G. B., Edwards, R. T., & Manchester, R. N. 2006, *MNRAS*, 369, 655
- ⑲ Wang, N., Wu, X., Zhang, J., et al. 2000, *IAU Colloq. 177: Pulsar Astronomy - 2000 and Beyond*, 202, 65
- ⑳ Groth, E. J., 1975, *ApJS*, 29, 453
- ㉑ Espinoza, C. M., Lyne, A. G., Kramer, M., et al. 2011, *ApJ*, 741, L13
- ㉒ Livingstone, M. A., Kaspi, V. M., Gavriil, F. P., et al. 2005, *ApJ*, 619, 1046
- ㉓ de Araujo, J. C. N., Coelho, J. G., & Costa, C. A. 2016, *JCAP*, 7, 023
- ㉔ Kou, F. F., & Tong, H. 2015, *MNRAS*, 450, 1990
- ㉕ Radhakrishnan, V. & Manchester, R. N. 1969, *Nature*, 222, 228
- ㉖ Anderson P. W., Itoh N., 1975, *Nature*, 256, 25
- ㉗ Alpar M. A., Cheng K. S., Pines D., Shaham J., 1988, *MNRAS*, 233, 25
- ㉘ Zhou, E. P., Lu, J. G., Tong, H., et al. 2014, *MNRAS*, 443, 2705
- ㉙ Wang, W. H., Lai, X. Y., Zhou, E. P., et al. 2021, *MNRAS*, 500, 5336
- ㉚ Hobbs, G. 2015, *Highlights of Astronomy*, 16, 207
- ㉛ Guo, Y. J., Lee, K. J., & Caballero, R. N. 2018, *MNRAS*, 475, 3644
- ㉜ Guo, Y. J., Li, G. Y., Lee, K. J., et al. 2019, *MNRAS*, 489, 5573
- ㉝ Foster, R. S. & Backer, D. C. 1990, *ApJ*, 361, 300
- ㉞ Hobbs, G., Dai, S., Manchester, R. N., et al. 2019, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 19, 020
- ㉟ Shao, L. 2014, *PRL*, 112, 111103
- ㊱ Jiang, P., Yue, Y., Gan, H. et al. 2019, *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, 62, 959502
- ㊲ Braun, R., Bonaldi, A., Bourke, T., et al. 2019, *arXiv:1912.12699*

(1) 值得注意的是，有少量白矮星也存在类似的脉冲辐射，它们被称为白矮星脉冲星。本文中所提到的脉冲星特指压缩重子物质构成的脉冲星，不包含此类天体。

(2) 有趣的是，在磁星 1E 2259+586 中探测到了令人在意的转动速度突然降低的 anti-glitch 现象，之后，又有研究声称在另外两颗 X 射线源中探测到 anti-glitch (参见本期林琳的文章《磁星》)。但在射电波段至今没有观测到类似现象。

封面说明

宋朝第四位皇帝宋仁宗赵祯在位期间，至和元年（西元 1054 年）上半年，中国人在金牛座（天关）处发现一颗“昼见如太白”的超新星。本期封面设计以那次爆发至今的遗迹——蟹状星云为背景，艺术化地展现了该超新星伴生的残骸：一颗脉冲星！它周围存在强磁场，平均密度高于原子核，但大小仅与北京市区的“四环”相当。脉冲星快速转动，且磁轴一般偏离自转轴。在磁极区往往能够产生大量的高能电子对，它们沿着磁力线加速运动时产生射电辐射束（图中紫色标

识）。随着脉冲星的自转，辐射束周期性地扫过我们地球上的望远镜。

然而，脉冲星的内部结构至今尚未定论。鉴于构成它的物质极端致密，其属性依赖于基本的强相互作用在低能情形下的行为，人们还不能通过严格的理论计算来确定其内部结构。不过，理论物理学家推测：脉冲星可能是“中子星”，也可能是“奇异星”。

（徐仁新）