



彭秋和
卞毓麟

(三) 中子星 奇观(上)

脉冲星的发现

如果恒星的晚年,其核心部分质量大于昌德拉塞卡极限,即大于太阳质量的1.4倍,但同时又小于太阳质量的3倍(这称为“奥本海默极限”),那么这种恒星将以非常激烈的方式抛掉其大部分物质,而留下一个比白矮星更加致密的残骸,即“中子星”。这种大规模的物质抛射就是“超新星爆发”。这种恒星在爆发前的质量,一般介乎太阳质量的8至20倍之间。

早在本世纪三十年代初期,中子刚发现不久,朗道、奥本海默等著名科学家就先后预言并研究了完全由中子构成的致密星球,即中子星。这是一种半径极小(只有一、二十公里)、密度比白矮星还要高百万倍以上的奇特天体。及至五、六十年代,随着恒星晚期演化研究的深入,人们从理论上对中子星的认识也大大加强了。然而,在太空中切实找到中子星却很不容易,所有当时能够想到的搜索方法都用尽了,结果却一无所获。

话分两头。1967年,英国天文学家A. 休伊什建造的射电望远镜投入了观测。它由2,048个偶极子组成,天线阵覆盖面积达二万余平方米。其外貌并不惊人,但是性能很好,可以记录极快的射电闪烁过程,因而适用于研究“行星际闪烁”一来自天空中小角径射电源的无线电波途经行星际空间时,由于行星际物质的密度涨落而使地球上接收到的射电信号强度有所起伏,其情况有如地球大气的扰动导致人们所见的星光发生闪烁一般。

当时,休伊什有位年方二十四岁的女研究生,名叫乔丝琳·贝尔。1967年8月,她在用这架仪器观测的过程中,发现一种来自狐狸座中某一固定点的、周期极短而又极其规则稳定的射电脉冲。起初,想象力丰富的人曾猜想这也许是其它星球上的智慧生物发出的讯号,有人甚至还给这些想象中的高级生物取了个外号叫“小绿人”。但是,休伊什不久便想到这类脉冲源也

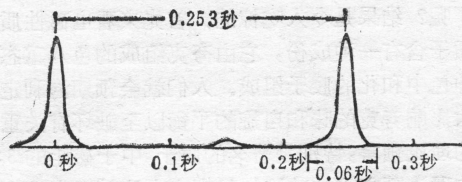


图1 脉冲星0950+08的脉冲讯号,射电望远镜所使用的观测波长是70厘米

许是某种前所未有的新型天体。后来便将它们称作“脉冲星”。迄今人们所知的脉冲星共有330余颗。

最先发现的那颗脉冲星脉冲周期是1.337秒,后来发现的绝大多数脉冲星脉冲周期比它更短。例如在著名的金牛座蟹状星云中心有一颗脉冲星,其周期仅为0.033秒,也就是说,差不多正好是每秒钟发出30个脉冲。它也是唯一已知从射电波段、可见光、直到X射线和 γ 射线的整个电磁波谱范围内都发出脉冲式辐射的脉冲星,而且各个波段的脉冲周期都相同。

鉴于日后人们越来越认清了脉冲星在天体物理学和物理学中都具有很重要的意义,所以1974年度的诺贝尔物理学奖金授予了休伊什。许多天文学家对此颇有异议,认为奖金理应授予这一新现象的第一发现人乔丝琳·贝尔。研究脉冲星的名家R. N. 曼彻斯特和J. H. 泰勒在他们合著的《脉冲星》一书扉页上写道:“献给乔丝琳·贝尔,没有她的聪明和百折不挠,我们便难以分享研究脉冲星的荣幸。”令人欣喜的是,贝尔本人却从未为金钱与名誉而折腰,她始终坦然地从事她的天文研究工作直至今天。

“脉冲星”是因其辐射具有脉冲形态而得名的。问题是,它为什么会发出如此强大、短促、而又极端规则稳定的脉冲?换句话说,脉冲星的本质究竟是什么呢?

高速自转的中子星

天体要发出间隔极其规则的脉冲,有几种可能的模式:或者是星体一胀一缩地作整体的径向脉动,或者是两颗挨得极近的星在互相绕转掩食,或者是星体的自转。问题在于什么样的恒星脉动或绕转或自转才能发出周期短如脉冲星那样的脉冲呢?

脉冲星发出的脉冲既短促又强烈,据此便可推断其体积不可能很大。因为如果体积太大的话,由脉冲星上不同的点发出的辐射到达地球的时刻就相差较大,人们观察到的脉冲就会延续较长的时间,强度的变化也不致于如此激烈了。

一颗象太阳那么大的恒星,无论通过何种方式,都不能发出象脉冲星那样的脉冲。如果它的自转快到周期仅为几秒钟,那么巨大的离心趋势就足以使这颗恒星瓦解;如果是两颗恒星在互相绕转掩食,那么根据

牛顿力学就很容易推知,为了在几秒钟内互转一周,这两颗恒星之间的距离就会小于它们的半径,也就是说两星将会互相侵入对方的体内;至于星体作径向脉动,人们已经从理论上推算出脉动周期大致与星体密度的平方根成反比。象太阳那样的恒星,密度不大,其脉动周期决不可能短到区区几秒钟!所以象太阳那样的恒星是无论如何也不会以脉冲星的面目出现的,比太阳更大的恒星当然就更不在话下了。

诚然,脉冲星必须是体积极小、从而密度极高的致密星体,但是究竟是哪一类致密星呢?

在理论上,目前人们只知道有两种可能的致密星,即白矮星与中子星。

人们起初曾经猜想,脉冲星也许就是白矮星,但是这很快就被否定了。因为,对于星体的径向脉动而言,周期要短得以秒计,就连白矮星的密度也还嫌太小,可是大多数脉冲星的周期却短于1秒。其次,两颗白矮星即使靠近到彼此相触,它们互相绕转的最短周期也得有1.7秒,这当然也不能解释绝大多数脉冲星的脉冲远较它短促得多。最后,倘若白矮星的自转周期短到若干分之一秒,那么其表面的自转线速度就会接近光速,由此产生的离心趋势将远远超出白矮星的表面引力,而使星体分崩离析。

看来,有资格扮演“脉冲星”这一角色的,就只有中子星了。那么,脉冲的起源究竟是中子星的脉动,还是互相绕转、抑或是快速的自转呢?

首先,两颗互相绕转的中子星,如果绕转周期短到1秒钟左右,那么根据爱因斯坦的广义相对论可以得知,这个双星系统将会发出十分强大的引力辐射,从而导致双星的绕转运动迅速变慢,周期迅速变长,而不能维持周期的极端稳定。

其次,后面将会读到,中子星的密度与原子核内的物质密度相当,即比白矮星的密度还要高百万倍甚至上亿倍,所以,它倘若径向脉动的话,周期将会短到0.001秒上下,这又比绝大多数脉冲星的脉冲周期短得多。

至此,只剩下了最后一种可能:脉冲星乃是高速自转的中子星。中子星的半径仅仅10公里左右,它的自转周期完全可以高如脉冲星发出的脉冲周期。

现在,新的问题又产生了:高速自转的中子星又为什么能发出如此强大、短促、规则而稳定的脉冲呢?

“灯塔效应”

脉冲星的脉冲辐射的方式自然使人想到:它们也许源自高速自转中子星上一个比较小的区域;随着中子星的自转,该区域发出的辐射不时地扫过地球的方向,于是我们便能接收到“脉冲”,其情状浑如用作航标的灯塔,故称“灯塔效应”。当然,如果这种“灯塔”发出的光束永远也扫不过地球,那么我们就看不到脉冲,当

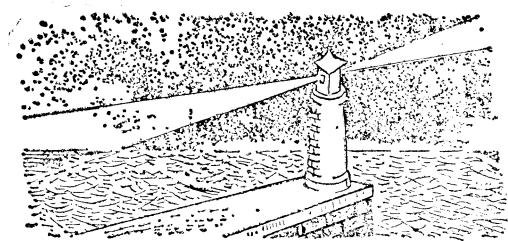


图2 灯塔

然也就无从得知那儿存在着一颗脉冲星,所以迄今为止发现的脉冲星为数也就三百余颗而已。

中子星强大的辐射源自一个很小的区域,这并不奇怪,它与中子星表面存在着极其强大的磁场密切相关。人们至少有四种不同的办法可以推断中子星表面的磁场强度,而且所得结果彼此相当吻合:那儿的磁场强度竟比白矮星还要强百万倍——高达数万亿(10^{12} — 10^{13})高斯!

中子星的超强磁场来源于星体坍缩和磁力线在等离子体中的“冻结”效应——磁力线与等离子体仿佛“刚性”地联在一起。当恒星核心坍缩成体积极小的中子星时,原来分散在较大范围内的磁力线也随之坍缩而聚集到一个非常狭小的范围内,这样,单位面积上所穿过的磁力线根数便大大增加,而这正是磁场大大增强的标志。例如,如果一颗红巨星坍缩前原有半径为1,000万公里,磁场强度为1高斯(与太阳、地球的磁场相当),则当它坍缩成半径为10公里的中子星时,半径缩小了一百万倍,相应地表面积便缩小了一万亿(10^{12})倍,于是磁力线密度便增大 10^{12} 倍,磁场强度则由1高斯猛增至 10^{12} 高斯。

当存在着强磁场时,带电粒子只能绕着磁力线作螺旋形的迴转运动,其迴转频率正比于磁场强度。电子在超强磁场中运动的迴转频率非常之高,这时,它会在迴转运动轨道的切线方向上发出辐射。这就是人们熟悉的“同步加速辐射”。此外,如果磁力线是弯曲的,那么电子沿着弯曲的磁力线运动时,还会在前进方向上发出另一种辐射,它称为“曲率辐射”。多数天文学家认为,脉冲星的脉冲辐射正是高能电子在其强磁场中的同步加速辐射(产生X射线和 γ 射线)或曲率辐射(产生射电辐射)。而且这些辐射仅从以中子星这个庞大磁体的磁轴方向为轴心的一个顶角不大的圆锥内射出,有如手电筒或探照灯的光锥一般。

通常,中子星的磁轴与其自转轴并不重合。这样,当中子星绕其自转轴高速旋转时,它的磁轴也随之绕自转轴高速旋转,以磁轴为轴心的辐射锥自然也就以同样的方式跟着转动,这就是所谓的“斜转子”模型。如果地球正好位于从这个辐射锥出射的旋转辐射束扫过的方向上,那么我们会接收到一闪一闪的辐射脉冲。

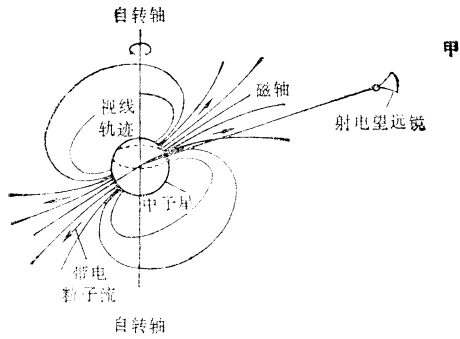


图3 “斜转子”模型

“灯塔效应”的秘密就在于此。

中子星脉冲辐射的能量不是来源于其内部的热核反应，而是消耗中子星本身的自转能量。随着中子星不断发出电磁辐射，其自转速度就会逐渐变慢，因而其脉冲辐射的周期就会渐渐变长。实际情况也确实如此。例如，蟹状星云脉冲星 PSR 0531 + 21 的脉冲周期是 0.03322812281 秒；周期增长的速率则是：每过一秒钟周期变长 0.000,000,000,000,421,805,3 秒，通常写成 421.8053×10^{-15} 秒/秒。

中子星的奇特结构

中子星的半径仅 10 公里左右，其体积仅相当于北京市城区下面的地壳，但其质量却与太阳相去不远。由此容易算出，它的平均密度竟高达每立方米 1 亿吨左右 ($10^{13} \sim 10^{14}$ 克/厘米³)，和原子核的密度相当。刚才讲过，中子星表面的磁场强度高达几万亿 (10^{12}) 高斯。此外，其表面温度高达数十万至数百万度，内部温度则高达几亿度。

奇特的密度和其它特性，使得中子星具有与普通恒星截然不同的奇特结构。它随着密度的不同而分为性质迥异的若干层。

普通恒星具有一层密度很低的大气，这称为恒星的“光球”。例如，太阳光球的厚度约为 500 公里，物质平均密度约为 10^{-7} 克/厘米³。但是中子星由于体积小质量大、表面重力非常之强，所以其大气层变得很薄而密度却很大。中子星大气厚度只有几米至几十米，密度却从顶部的每立方米 1 克陡增至底部的每立方米 10,000 克。不过，鉴于其表面温度极高，所以即使大气如此致密，却仍呈现出等离子态气体的性质。在这大层气之外尚有一个延伸数百公里的“冕”，它类似于太阳的“日冕”，由极稀薄的等离子体组成，其物质密度为 $10^{-17} \sim 10^{-10}$ 克/厘米³，也就是说，每立方厘米的体积中只有 $10^7 \sim 10^{14}$ 个粒子，相当于地球实验室中的高真空密度。这些等离子体同磁场冻结在一起而形成“磁层”。该磁层的情况目前尚不十分清楚。

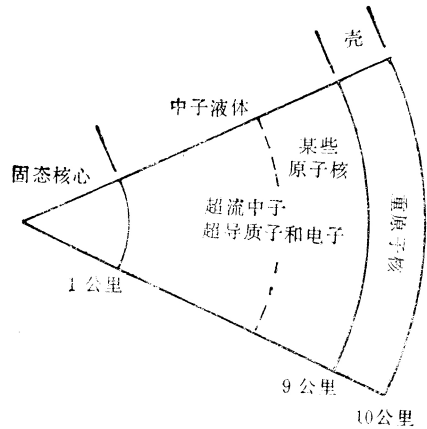


图4 中子星的典型剖面。低质量中子星可能没有固态核心，而外部则更大一些

中子星大气层下是一个非常坚硬的固态外壳，厚度约 1 公里左右，主要是由铁原子核和自由电子组成的等离子体。其物质密度从上表面的 10^4 克/厘米³ 猛增至壳层底部的 10^{11} 克/厘米³，即每立方厘米 10 万吨，这已经大大超过了白矮星内部的密度！在那里，铁原子核之间距离非常小，因而由铁原子核和自由电子组成的系统内部就会产生非常强大的压力，而将它们结合成点阵状的固态晶格结构。它极其坚硬（硬度超过钢材硬度的 10^{17} 倍！），融解温度极高，在外壳上表面就高达几千万度，下表面处则高达数十亿度。由于中子星外壳的实际温度只及融解温度的几十分之一，所以其晶体结构能够长时期的安然无恙。

外壳以下是内壳，其物质密度高于 10^{11} 克/厘米³。它由地球上不存在的一些特殊的超重原子核、自由电子以及一些中子组成。这些原子核所包含的中子和质子总数多达几千个，相比之下，地球上最重的原子核所含质子和中子的总数尚不足 300 个。而且这些超重原子核内中子的数目可达质子数目的 10 至 20 倍，因而称为“富中子核”，它们也按晶格点阵很规则地排列着。

从内壳向核心，物质密度越来越高。当物质密度高达 $10^{13} \sim 10^{14}$ 克/厘米³（每立方厘米 1 千万吨至 1 亿吨）时，富中子核彼此完全挤在一起，其间的界限已不复存在。这个区域内的物质主要由自由中子组成，故称“中子海”，此外还包含少量的质子和电子。

中子海几乎一直延伸到中子星核心附近。中子星的核心半径约为 1 公里，物质密度高达 10^{15} 克/厘米³（每立方厘米 10 亿吨）。人们迄今尚未完全弄清它的物质形态和性质，只是推测它可能是由中子组成的晶体，或者是所谓“ π 凝聚”的特殊物态，甚至可能直接由夸克组成。

(待续)