

# 近代物理讲座

## 第九讲 白矮星和中子星

乔国俊

(北京大学地球物理系)

近二十年来,由于新技术的飞速发展,从地面到空间,经过从无线电波到 $\gamma$ 射线的全波段的观测,已获得了激动人心的创记录的进展.综合孔径射电望远镜的研究(M. Ryle, 1974),脉冲星的发现(A. Hewish, 1974),宇宙微波背景的发现(A. Penzias 和 R. W. Wilson, 1978),恒星的演化(S. Chandrasekhar, 1983)元素的起源(W. A. Fowler, 1983)先后获得了诺贝尔物理学奖金.

作为对天体物理学的初步了解,本讲介绍有关白矮星和中子星的知识.

### 一、白矮星和中子星

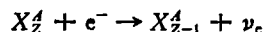
恒星经过一系列演化<sup>[1]</sup>,当其内部核燃料耗尽之后,无法产生与引力抗衡的力量,星体要进一步收缩.由于初始质量以及引力平衡力的性质的不同,有的塌缩为白矮星或中子星,有的形成黑洞<sup>[2]</sup>.

当星体的物质密度大于 $500\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,电子不再被个别原子核束缚,形成正电荷背景上自由运动的电子气.因为电子的自旋为 $1/2$ ,服从费米统计,故这种电子气称为费米气体.绝对零度下的费米气体,就是完全简并的费米气.按照泡利原理,最多只能容纳一个费米子,于是费米子充满从基态到某个最高能级的所有量子态,能级的最大值取决于费米子的数目.这种气体可以产生很高的压力,足以与一定质量和半径的星体的自引力平衡,从而构成稳定存在的天体——白矮星.

当星体质量更大、半径更小时,简并电子气压也不能抵挡强大的引力,星体将进一步塌缩,密度随之增高.密度与压力超过一定值时,电子被“挤”进核内,形成中子过剩的原子核.密度进一步增加,原子核释放中子,形成自由中子组成的中子气体.这种中子气,也是简并的费米气体.简并中子能产生更大的压力,从而能形成另一类稳定的天体——中子星.下面就中子星内部的物理过程做一点简单说明.

#### 1. 中子化过程

当物质密度 $\rho > 10^6\text{gcm}^{-3}$ 和电子气压强 $P > 10^{17}\text{atm}$ 时,正常情况下的稳定核 $X_Z^A$ 将出现逆 $\beta$ 过程:



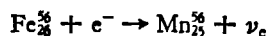
其中 $A$ 是核子数, $Z$ 是质子数, $\nu_e$ 是电子中微子.随着引力收缩,压强和密度增加,电子的费米动量 $p_F$ 越来越大:

$$p_F = (3\pi^2 \hbar^3 n)^{1/3}, \quad (1)$$

其中 $n$ 是电子的数密度.电子挤入核内,组成更多的中子.

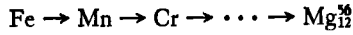
#### 2. 自由中子的发射

自由中子发射的条件是:理想气体的费米能 $\varepsilon_F$ 大于两个同质异位核之间结合能之差 $\Delta$ . $\Delta$ 又称中子化阈能.不同化学元素的 $\Delta$ 不同. $\text{Mn}_{25}^{55}$ (正常情况下不稳定)的 $\Delta \sim 1.6\text{MeV}$ ,而 $\text{Fe}_{26}^{56}$ 的 $\Delta \sim 3.7\text{MeV}$ .当密度大于 $10^9\text{gcm}^{-3}$ ,压强大于 $3.3 \times 10^{20}\text{atm}$ 时,会发生下列逆 $\beta$ 过程:

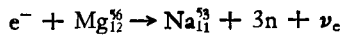


随着压强和密度的增加, $\Delta$ 值高的元素逐渐参

与反应, 当  $\epsilon_F \sim 20-24\text{MeV}$  时, 将发生下列反应链:



正常情况下,  $\text{Mg}_{12}^{26}$  是稳定的, 富中子核  $\text{Mg}_{12}^{26}$  是一个反常核. 在  $Z = 12$  附近, 自由中子开始发射, 有如下核反应:



### 3. 简并费米气体

费米气体的简并性, 通常由简并温度  $T_0$  来判断:

$$T_0 \simeq \frac{\hbar^2}{km} n^{2/3}, \quad (2)$$

式中  $m$  是费米子的质量,  $n$  为其密度,  $k$  是玻耳兹曼常数. 当  $T \ll T_0$  时, 费米气体就是强简并的(当作绝对零度处理); 当  $T \gg T_0$  时, 费米气体就是非简并的. 白矮星和中子星的内部温度分别为  $10^6\text{K}$  和  $10^8\text{K}$ , 而相应的简并温度分别是  $10^{10}\text{K}$  和  $10^{12}\text{K}$ , 可见它们都是完全简并的.

简并性也可由临界密度  $\rho_{cc}$  来判断, 即当物质密度大于(3)式表示的临界密度  $\rho_{cc}$  时, 电子气就是完全简并的:

$$\rho_{cc} = 2.4 \times 10^{-8} \mu T^{3/2} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}, \quad (3)$$

这里  $T$  是温度,  $\mu = A/Z$ , 是相应于每个电子的核子数. 对于氢,  $\mu = 1$ , 对于其它元素,  $\mu \simeq 2$ . 白矮星的  $\rho \geq 10^6 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 满足简并条件. 简并费米气有很特殊的性质, 即密度愈高, 愈接近“理想气体”.

当  $\rho_{cc} \leq \rho \leq \rho_{cr} = 7.3 \times 10^6 \mu \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  时, 称为非相对论完全简并的电子气, 密度大于  $\rho_{cr}$  时称为相对论简并电子气. 两者都可以给出很大的压强.

当物质密度大于(4)式表示的临界密度  $\rho_{cn}$  时, 中子气就是完全简并的:

$$\rho_{cn} = 2.2 \times 10^{-3} T^{3/2}. \quad (4)$$

中子星内部,  $\rho \sim 10^{15} \text{gcm}^{-3}$ ,  $T \sim 10^8\text{K}$ , 可见中子气也是完全简并的.

### 4. 质量和密度

我们研究一定质量的冷 ( $T \ll T_0$ ) 的费米

气(电子气或中子气)的压缩. 星体收缩时, 费米气体被压缩, 此时费米气体的密度和能量随之增加. 当密度足够大时, 压强只决定于费米子被限定区域的尺度. 设  $R$  为所考虑气体的半径,  $r_a$  是费米子间的平均距离,  $A$  为星体总的核子数,  $m_n$  为中子的质量, 由测不准关系  $p_x \sim \hbar/r_a$ , 每个费米子的能量  $E_F$  为

$$E_F \sim \frac{\hbar c}{r_a} \sim \frac{\hbar c A^{1/3}}{R}, \quad (5)$$

而引力能为

$$E_{\text{grav}} \sim -\frac{Gm_n^2 A}{R}. \quad (6)$$

当两力平衡时, 得

$$A \sim A_0 = \left(\frac{\hbar c}{G}\right)^{3/2} \frac{1}{m_n^3} \approx 10^{57}. \quad (7)$$

这就是说, 稳定的中子星应当包含  $10^{57}$  个核子<sup>[3]</sup>. 这个结论首先由朗道于 1932 年给出. 上述考虑表明, 应存在两种类型的稳定星体——白矮星和中子星. 白矮星的密度

$$\rho_{wd} \sim \frac{m_n}{3\pi^2} \left(\frac{m_n c}{\hbar}\right)^3 \sim 10^6 \text{gcm}^{-3}, \quad (8)$$

中子星的密度

$$\rho_{ns} \sim \frac{m_n}{3\pi^2} \left(\frac{m_n c}{\hbar}\right)^3 \sim 10^{15} \text{gcm}^{-3}. \quad (9)$$

核子数为  $A$  的“冷”星(指温度低于简并温度的星体)的质量近似为

$$M \sim m_n A \sim \left(\frac{\hbar c}{G}\right)^{3/2} \frac{1}{m_n^2} \sim 1.5 M_\odot, \quad (10)$$

式中  $M_\odot = 1.99 \times 10^{33} \text{g}$ , 为太阳质量. 白矮星的质量上限首先由 Chandrasekhar 给出:

$$M_c = \frac{3.2}{(\mu m_n)^2} \left(\frac{\hbar c}{G}\right)^{3/2} = 5.87 \mu^{-2} M_\odot \sim 1.44 M_\odot, \quad (11)$$

这就是有名的白矮星 Chandrasekhar 质量上限.

中子星的质量上限首先由 Oppenheimer 和 Volkoff 于 1939 年给出:  $M_{O-V} \sim 0.7 M_\odot$ , 中心密度  $\rho_c \sim 4 \times 10^{15} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . 现在比较普遍的看法是中子星的质量上限大约为  $2 M_\odot$ . 白矮星和中子星的质量和密度的关系如图 1 所示. 图中  $\rho_c$  为中心密度.

白矮星和中子星都存在质量下限, 但目前

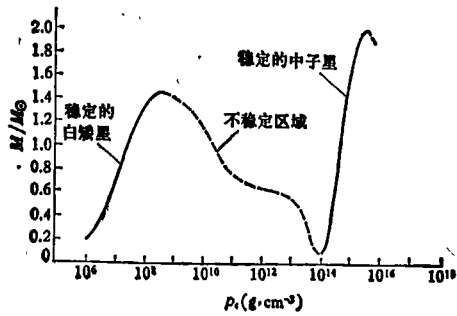


图 1

还不很清楚。不同的作者给出的结果不一样，例如中子星，朗道给出  $M_{\min} \sim 0.3M_{\odot}$ ，Oppenheimer 给出  $M_{\min} \sim 0.1M_{\odot}$ 。通常取  $M_{\min} \sim 0.1M_{\odot}$ 。质量更小时，不存在稳定状态的中子星结构。

### 5. 半径

有效半径近似为

$$R \sim r_a A^{1/3}. \quad (12)$$

令非相对论情形下的平均动能

$$\frac{p^2}{2m_n} \sim \frac{\hbar^2}{r_a^2} \cdot \frac{1}{2m_n}$$

近似等于平均引力势能，对于中子气体：

$$\frac{1}{r_a^2} \cdot \frac{\hbar^2}{2m_n} \sim \frac{Gm_n^2 A}{r_a A^{1/3}},$$

得

$$r_a \sim \frac{\hbar^2}{m_n^3 G} A^{-2/3}. \quad (13)$$

将它代入(12)式，有

$$R \sim \frac{\hbar^2}{Gm_n^3} A^{-1/3}$$

或

$$A \sim \frac{\hbar^6}{G^3 m_n^9} R^{-3}. \quad (14)$$

将 A 代入(10)式，得中子星质量与半径的关系：

$$M_{ns} = Am_n \sim \frac{\hbar^6}{G^3 m_n^8} R^{-3}. \quad (15)$$

在非相对论情形下，对于白矮星和中子星，可分别推得

$$M_{wd} = 91.9 \frac{\hbar^6}{G^3 m_e^3 m_n^3} R_{wd}^{-3}, \quad (16)$$

$$M_{ns} = 91.9 \frac{\hbar^6}{G^3 m_n^8} R_{ns}^{-3}. \quad (17)$$

将此二式相除，得

$$R_{wd}/R_{ns} \sim m_n/m_e \sim 10^3. \quad (18)$$

以上几式表明，白矮星和中子星的质量都与半径的立方成反比，两种星体半径之比约为  $10^3$ 。

1961 年 Hamada 等人给出的白矮星的最大半径  $R_{wd} \sim 0.021R_{\odot} \sim 10^4 \text{km}$ ，而 Baym 等人 (1971) 给出  $R_{wd} \leq 2400 \text{km}$ 。

对于中子星，Oppenheimer 等人 (1939) 给出  $R_{\min} \sim 9.42 \text{km}$ ，Baym 等人于 1971 年给出  $R_{\max} \sim 164 \text{km}$ 。通常取中子星的典型半径为 10km。

### 6. 简并费米气体产生的压强

因为动量  $p_x \sim \hbar/r_a \sim \hbar n_c^{1/3}$ ，速度（非相对论情形） $\sim p_x/m_e \sim \hbar n_c^{1/3}/m_e$ ，其中  $n_c$  是电子的数密度，而压强 = 动量  $\times$  速度  $\times n_c$ ，所以

$$p_c = \hbar n_c^{1/3} \cdot \frac{\hbar n_c^{1/3}}{m_e} \cdot n_c = \frac{\hbar^2 n_c^{4/3}}{m_e}. \quad (19)$$

Fowler 于 1929 年给出的非相对论近似下完全简并的电子气的压强为

$$p_c = \frac{\hbar^2}{20m_e} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{2/3} n_c^{5/3} \\ = 1.004 \times 10^7 \left(\frac{\rho}{\mu}\right)^{5/3} \text{atm}. \quad (20)$$

(20)式与(19)式相差一个量级。对于白矮星，取  $\rho \sim 10^8 \text{gcm}^{-3}$ ，则  $p_c \sim 10^{20} \text{atm}$ 。

完全简并的密度为  $\rho$  的中子气压强为

$$p_n = \frac{(2\pi^2)^{2/3}}{5} \cdot \frac{\hbar^2}{m_n^{8/3}} \rho^{5/3} = 10^4 \rho^{5/3} \text{atm}. \quad (21)$$

对于中子星，取  $\rho \sim 10^{15} \text{gcm}^{-3}$ ，则  $p_n \sim 10^{29} \text{atm}$ 。

若取  $p_x \sim m_e c \sim \hbar n_c^{1/3}$ ，代入(19)式，消去  $n_c$  后得

$$p_c \sim \frac{m_e^4 c^5}{\hbar^3}. \quad (22)$$

对于中子星，由同样的考虑可得

$$p_n \sim \frac{m_n^4 c^5}{\hbar^3}. \quad (23)$$

两种费米气体的压强之比  $p_c/p_n \sim (m_e/m_n)^4$ 。

### 7. 中子星的形成

1932 年发现了中子，同年朗道提出，存在着质量约为  $1M_{\odot}$  并包含  $\sim 10^{57}$  个中子的中子星。1934 年，Baade 和 Zwicky 指出，中子星

可能是超新星爆发后留下的核心。但是，当时还没有建立关于中子星的物态方程来估计出中子星的质量范围、密度和半径。Oppenheimer 和 Volkoff 于 1939 年首先采用了一个简单的物态方程，给出了中子星的一个模型。他们计算出的质量约等于  $0.7M_{\odot}$ ，中心密度约等于  $4 \times 10^{15} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。以后，关于中子星的研究曾一度冷落。1967 年底发现脉冲星之后，关于中子星的理论研究又重新活跃起来了。

关于超新星爆发时产生中子星的理论也被多数科学家接受了。这里我们讨论一下象太阳这样的一颗恒星塌缩时可能产生的结果。若爆发时质量和角动量守恒，那么半径将减少  $10^5$  倍，达 10km，质量约  $1M_{\odot}$ ，密度相应增加  $10^{15}$  倍，约达  $10^{15} \text{gcm}^{-3}$ ，转动周期减少  $10^{10}$  倍。典型恒星的自转周期为天的量级，周期减少  $10^{10}$  倍后，可达  $10\mu\text{s}$  的量级。诞生初期转动能量迅速损失，很快会使其周期达到 ms 量级。

前面已经说过，现在普遍认为中子星是超新星爆发后遗留下来的，因而期望脉冲星（认为是中子星）与超新星遗迹有联系。但观测的结果是，在已发现的 400 多颗脉冲星中，只有极少数脉冲星和超新星遗迹有联系。这个问题引起许多人的关注。有人提出脉冲星运动得比较快，跑出了它诞生时的超新星遗迹。这可以给出一定程度的解释，但目前还在争论，问题并不清楚。特别是双星成员中观测到不少致密天体（中子星或黑洞），也观测到少数双星中两子星全是致密天体，这对爆炸说形成中子星的理论提出了新的疑问。

## 8. 中子星的磁场

如果恒星塌缩时磁通守恒，那么中子星表面的磁场将增加  $10^{10}$  倍。太阳的普遍磁场约 1—2G，象太阳这样的恒星塌缩成中子星，其表面磁场可达  $10^{10} \text{G}$ ，如果塌缩星的磁场高于太阳的，则其表面磁场可达  $10^{13} \text{G}$ 。如果星体爆发不对称，被抛射出去的物质带走一些磁能，结果表面磁场将低于  $10^{10} \text{G}$ 。这种中子星很难从观测上发现。

脉冲星磁场值的“天文”式惊人数据，最先

物理

只是理论家的推论，或者说是解释一些现象的理论前提。意大利天体物理学家 Pacini 于 1967 年在脉冲星（现在普遍认为就是中子星）发现前几个月，就讨论了关于具有极强磁场的中子星由于其快速旋转而给周围星云提供能量的特点。脉冲星发现之后，所有的理论工作，都把具有强磁场的中子星当做他们理论的出发点。

1978 年，观测到武仙座 X-1 (Her X-1) 在 58 keV 附近的 X 射线谱线，后来又观测到 110 keV 谱线，这对中子星存在强磁场是很有意义的。

强磁场中电子的能量是量子化的，电子在各朗道能级之间跃迁的基频为（写成能量形式）

$$E_0 = \hbar\omega = \hbar \frac{eB}{m_e c} = 0.511 \left( \frac{B}{B_c} \right), \quad (24)$$

式中  $B_c = 4.414 \times 10^{13} \text{G}$ ，[称为临界磁场，如果  $B = 6 \times 10^{12} \text{G} \approx 0.13B_c$ ，则  $E_0 = 67 \text{keV}$ 。具有这个能量的光子离开中子星时，会产生引力红移  $Z = GM_n/c^2 R$ ，式中  $M_n$  和  $R$  分别是中子星的质量和半径。取  $M_n = 1M_{\odot}$ ， $R = 10^6 \text{cm}$ ，则  $Z = 0.13$ ，按照定义：

$$Z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{E_0 - E}{E}, \quad (25)$$

则

$$E = \frac{E_0}{1 + Z} \sim 58 \text{keV}.$$

这就是说，如果观测到的 58keV 的 X 射线谱线是强磁场中同步辐射产生的话，那么磁场值便是  $6 \times 10^{12} \text{G}$ 。

## 9. 中子星的结构

图 2 是一个典型的中子星模型 ( $M_n = 1.2M_{\odot}$ ， $R = 10^6 \text{cm}$ ，中心密度  $\rho_c \approx 10^{15} \text{gcm}^{-3}$ ，转动惯量  $I = 10^{45} \text{gcm}^2$ ) 的剖面图。由图可以看出，中子星的密度由表面到中心，从  $10^6 \text{gcm}^{-3}$  变到  $10^{15} \text{gcm}^{-3}$ ，跨越了 9 个数量级，同时按密度分为几个区域，各个区域有各自的特点。

中子星表面的密度约  $10^6 \text{gcm}^{-3}$ ，类似于白矮星，主要是  $^{56}\text{Fe}$  原子核和电子。原子核组成点阵（这时它们的能量最小），构成固体外壳。电子离开各自的原子核，形成正电荷背景上的

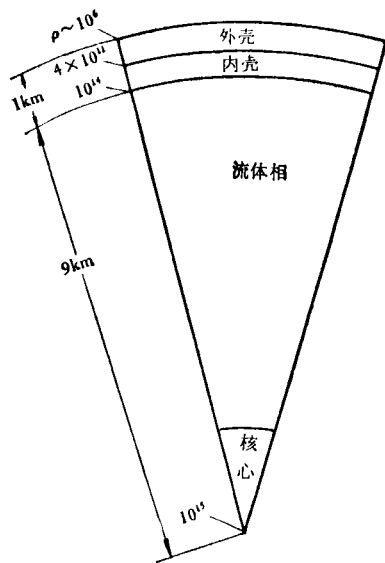


图 2

外壳部分主要为  $N, e^-$ ; 内壳部分主要为  $N, e^-, n$ ; 流体相部分主要为  $n, p, e^-$ , 超流中子, 超导质子和电子; 核心部分主要为  $n$ , 可能是固态, 可能是  $\pi$  凝聚态, 也可能是超子

自由电子“海”, 厚度为几百米。由于约  $10^{12}G$  的强磁场的存在, 形成沿磁场的一维点阵, 极大地改变了物质的结构。这些长链又互相横向地联系着, 形成一个各向异性的很密的凝聚的强束缚态物质。

中子星从表面到内部, 密度逐渐增加, 电子场的费米能越来越高。在中子化过程中, 电子与核内质子结合成中子数特别高的核。中子化过程进行到密度达  $4.3 \times 10^{11} \text{gcm}^{-3}$  时为止。

密度低于  $4.3 \times 10^{11} \text{gcm}^{-3}$  值时, 几乎没有核外电子。当密度进一步增加时, 原子核不再稳定, 逐渐释放中子。自由中子数目增加, 形成以中子为主的中子气(有少量质子和电子)。简并中子气处于超流状态。这个过程一直进行到密度达  $10^{14} \text{gcm}^{-3}$  为止。

密度大于  $10^{15} \text{gcm}^{-3}$  时, 中子流体的物态方程不确切。中子星核心部分还存在一些不确定性, 不过这一部分只占中子星质量的一小部分, 对确定中子星的总的结构影响不大。

### 10. 白矮星和中子星的观测

目前已观测到 1,000 多颗白矮星, 用统计

方法估计, 它们约占恒星总数的 3% (理论值为 10% 左右)。白矮星产生的引力红移很早就观测到了。

脉冲星已被普遍承认为中子星, 目前已观测到约 400 颗这样的脉冲星(射电脉冲星)。X 射线脉冲星和其它 X 射线双源中都有一颗子星是致密星。绝大多数情况下, 这颗致密星就是中子星。银河中心很可能存在大量的中子星。

## 二、脉冲星被证认为中子星

第二次世界大战后, 开始通过无线电波研究天体。1964 年, 发现了一些射电源信号的强度有无规则的起伏——“射电闪烁”。

英国剑桥大学的 A. Hewish 和他的研究生 Bell 于 1967 年制造了一架大型射电望远镜。它的工作波长为 3.7m, 由 2048 个振子组成, 占地二万多平方米。这台望远镜开始工作之后不久, 很快就发现了一种奇特的脉冲信号, 它的频带很宽, 信号很强, 特别是具有准确周期, 其稳定度可达  $10^{-14}$ , 相当于地球上氢钟的稳定度。是什么样的星体发出如此守时的信号?

根据分析, 恒星的脉动、行星的轨道运动都不能给出周期如此短的信号, 那么会不会是双星? 双星的轨道运动的周期  $T$  可由开普勒公式求得:

$$T = \sqrt{\frac{2\pi^2 a^3}{GM}} \approx 10^4 / \sqrt{\rho} \text{ s}, \quad (26)$$

式中  $a$  是两子星间相对轨道半长轴, 若两个子星质量相等,  $M$  为一个子星的质量。由 (26) 式可得系统的平均密度为

$$\rho \approx \begin{cases} 10^8 \text{ gcm}^{-3}, & \text{当 } T = 1 \text{ s 时;} \\ 10^{14} \text{ gcm}^{-3}, & \text{当 } T = 1 \text{ ms 时.} \end{cases}$$

这意味着脉冲星应当是中子星。另外, 轨道运动应观测到多普勒效应, 而实际上没有观测到。还有, 足够短周期的轨道运动必定有引力辐射, 这会使周期变短, 但观测到的是周期变长。因此无论是卫星或双星都不可能是上述信号的来源。

会不会是自转的白矮星? 要求赤道上的物

质在自转时不被抛出去,自转周期必须大于 5s,但是观测到的周期却小于 5s,因而不可能是自转的白矮星。

只能考虑是中子星了,因为最短的脉冲周期为 1.5ms,此数字已经接近中子星能提供信号的最短周期。

脉冲星的进一步研究为引力波提供了间接的验证。

1974年,发现一颗射电脉冲星 PSR 1913 + 16,它是双星系统的一个成员。另一颗子星很可能也是一颗致密星。两颗子星以极大的速度( $10^{-3}c$ )互相绕转,它们之间又没有物质交流,这为检验引力辐射提供了一个合适的场所。

1974—1978年,美国 J. H. Taylor 等人花了四年时间,用直径为 305m 的射电望远镜,对这个双星系统进行了检测。所得结果与广义相对论预言有较好的符合。例如轨道周期变率  $\dot{T}$  的实测与广义相对论预言值分别为

$$\dot{T}_{\text{实测}} = (-3.2 \pm 0.6) \times 10^{-12} \text{ss}^{-1},$$

$$\dot{T}_{\text{理论}} = -2.6 \times 10^{-12} \text{ss}^{-1},$$

误差在 20% 以内。其它引力理论多为偶极辐射,因辐射较强,故与实测不符。

虽然这个实测结果对引力理论的检验还不十分肯定,但许多著名物理学家都给以极高的评价。

### 三、其它致密天体的寻找

现在天体物理学界广泛重视的课题之一是寻找黑洞。黑洞同外界的联系主要是引力,表现在:

1. 黑洞与其它天体构成双星系统。黑洞虽然看不见,但在它与另一子星相互绕转的轨道运动中,通过观测另一子星的运动可判断它的存在。

2. 在黑洞引力场的作用下,周围物质被黑洞吸积并落入黑洞。在物质下落过程中,势能转变为动能,动能再转变为其它形式的能,例如高速运动的电子以 X 射线的形式释放其能量。对于斯瓦西黑洞,吸积物质总质量的 6% 可转

化为其它形式的能量。对于克尔黑洞,能量转化率甚至高达吸积物总质量的 43%。

在密近双星系统中,伴星常是致密的暗天体。如果它的质量大于  $3.2M_{\odot}$ ,它就不可能是白矮星或中子星,很可能是黑洞<sup>[4]</sup>。这是由于恒星演化到晚期,当星体质量大于  $3.2M_{\odot}$  时,简并中子气压也抵挡不住引力,星体要一直塌缩下去,形成黑洞。现在呼声最高的黑洞候选者是天鹅座 X-1。这个双星系统中,光学子星和致密的 X 射线伴星的质量分别是

$$M_{\text{opt}} \sim 32-45M_{\odot} \text{ 和 } M_{\text{X}} \sim 5.5-14M_{\odot}.$$

由此推测这个 X 射线伴星很可能是个黑洞。

另外,天鹅座 X-1 有不规则的短时标的 X 射线辐射涨落,在毫秒到 10 秒的范围内,呈无规噪音特性。这与落入黑洞物质发生的无规湍动的设想一致。由于质量测得不准,问题还有待于解决。

除了 X 射线双星以外,星系核中很可能也存在大质量黑洞。星系 M87 的核心外有很大的速度弥散度,这意味着中心应当有一个很深的势阱,这符合认为中心存在一个质量约为  $5 \times 10^9 M_{\odot}$  的黑洞的观点。

1980 年在美国国家射电天文台正式落成的甚大阵 (VLA) 是迄今最复杂的天文设备。它由 27 面直径为 25m 的射电望远镜组成,排列成 Y 字形,臂长 21km,最短工作波长为几 cm。1985 年将由航天飞机发射一个永久性的空间光学天文台,望远镜的直径为 2.4m。此外将发射一系列空间设备:  $\gamma$  射线天文台(1987—1988)、太阳光学望远镜(1987—1988)和航天红外望远镜等。日本和美国将分别建造直径为 45m 和 25m 的大型毫米波射电望远镜等等。借助于这些设备,可以肯定,八十年代将取得新的成果。

(冯庆荣整理)

### 参 考 文 献

- [1] 俞允强,物理,13-8(1984),486.
- [2] 陈良范,周敏耀,物理,12(1983),705.
- [3] Carl-G. Källman, *Fundamentals of Cosmic Physics*, 4(1979), 167--210.
- [4] 张家铝,天文学的新进展,科学出版社,(1983),17.