

(二) 白矮星的秘密

天狼 B 星的故事

1834 年,德国天文学家贝塞尔开始注意到天狼星在太空中沿着一条波状线运动。其运动方式表明,它是和另一颗看不见的恒星伴随着前进,同时又互相绕转着。而且,这颗伴星必须拥有和太阳一般大的质量,才能产生足够强的引力、从而将天狼星拖离它的直线途径。不过,贝塞尔和其他天文学家尽管拥有当时堪称上乘的天文望远镜,却始终找不到它。贝塞尔认为,它一定是一颗业已最终失去光辉的死了的恒星,并且称呼它为“天狼星的暗伴星”。

嗣后,他又以同样的方法推断另一颗亮星“南河三”也有一颗暗伴星。后来,人们分别将上述两颗暗伴星称作“天狼 B 星”和“南河三 B 星”。我们可以说,贝塞尔发现了两颗连他自己都没法看见的恒星!

1862 年,美国望远镜制造家阿尔万·格雷厄姆·克拉克完成了一具新的折射望远镜。为了检验其透镜的光学成象质量,克拉克使用它来观测天狼星,看它是否呈现为一个明锐的光点。他惊讶地发现,天狼星近傍另有一个微弱的光点是所有的星图均未记录在案的。最后,克拉克注意到,这个光点恰好处在天狼星的暗伴星应在的位置上,显然,这颗伴星并没有完全死亡。但是,它发出的光仅为天狼星本身的万分之一。1895 年,旅美德德国天文学家舍贝勒又注意到南河三附近有一个微弱的光点,它正是“南河三 B 星”。

1914 年,美国天文学家亚当斯成功地拍摄到了天狼 B 星的光谱。它和天狼星本身一样,光谱型都是 A 型,这意味着它们具有同样高的表面温度——大约

11,000K,这要比太阳热得多。

如果太阳位于天狼 B 星那么远的距离上,它就应该成为一颗明亮的星星。天狼 B 星比太阳更热,所以它在那样的距离上似乎也应该更亮。但是实际上却不然。如果我们的太阳也和天狼 B 星一样远,那么天狼 B 星就只有太阳的四分之一那么亮。

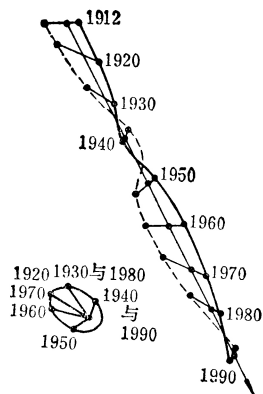
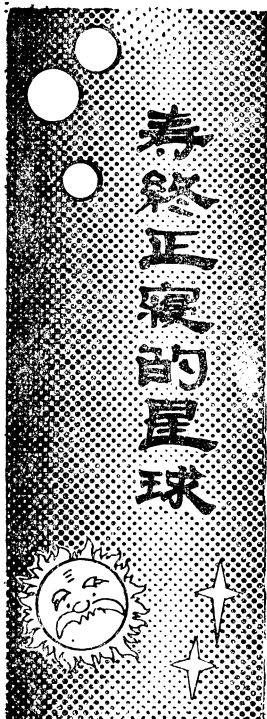


图 1 天狼星的波状运动轨迹



这是什么原因呢?

事情一定是这样的:天狼 B 星非常小,它的发光表面十分有限,不可能发出太多的光。更具体的推算告诉我们,天狼 B 星的直径尚不足 20,000 公里,比我们的地球大不了多少。

这类恒星,温度高得使它呈白色,同时个儿又那么小,所以人们就称它们为“白矮星”。

白矮星实际上相当普遍,但是由于它们既小且暗,所以只有离我们最近的极少数白矮星才能用望远镜观察到。迄今为止,人们观测到的白矮星共有一千多颗。

惊人的密度及其由来

天狼 B 星的质量大如太阳,体积却小似地球,由此很容易算出它的密度竟高达 1,000,000 克/厘米³,也就是每立方厘米 1 吨! 取一个火柴盒那么大小的天狼 B 星物质到地球上称的话,它就会重达 26 吨。有些白矮星的密度比天狼 B

星更大,甚至可以大到每立方厘米好几百吨。问题是:白矮星怎么会变成这样的呢?

我们已经说过,当恒星中心部分的核燃料耗尽后,由于热量不断外流,内部的压力就抵挡不住向内的引力,于是星核再度收缩。由此释放出来的引力能,一部分供维持恒星内部的高温,另一部分则转化为辐射能,并驱使恒星外层持续地往外膨胀。质量较小的恒星重力较小,星核温度相对说来也较低,它的收缩以及外层的膨胀都比较缓和。质量越大的恒星重力也越大,星核温度便越高,它的收缩与外层的膨胀也越剧烈——事实上,对于质量很大的恒星,这种过程已经不是什么膨胀,而是骇人听闻的猛烈爆发了。

对于质量不超过 6 倍太阳质量的恒星,这一过程相对说来较为缓和。恒星内核的收缩与外层的不断膨胀最终导致它们彻底分家。外层膨胀又膨胀,变成所谓的“行星状星云”。在许多行星状星云的中央,都可以观测到一颗白矮星,它便是当初内外分离后留下的残骸。久而久之,行星状星云因扩散而日益稀薄,最终完全消失在太空中而不复可见。在原来的位置上只剩下了一颗孤单的白矮星。我们的太阳将来也会经历这种过程,它最终将变成一颗白矮星,而并不经历异常剧烈的爆发。

恒星核心在坍缩成白矮星的过程中,其向内的压力可谓所向披靡。核能既已耗尽,就不再有向外的力量甚与引力抗衡。物质不断往里坠落。巨大的压力把组成恒星物质的原子都压碎了:电子被挤到一边,原

子核与原子核彼此接近——要比寻常情况下靠近几十倍乃至几百倍，这正是白矮星的物质密度高得惊人的最终原因。这种物质形态称为“简并态”，处于简并态的物质称为“简并物质”。正是那些电子的“简并性压强”，顶住了星体的进一步坍塌，而这种“简并性压强”则是由电子的微观性质决定的。下面我们就来谈一下这种压强究竟是怎样造成的。

电子气体的简并性压强

我们知道，在基本粒子大家庭中，其成员可按自旋的不同而分为“费米子”和“玻色子”两大类。费米子的自旋都是半整数，例如电子、质子、中子、中微子等等，自旋都等于 $1/2$ 。玻色子的自旋都是整数，例如光子的自旋为 1 ， π 介子的自旋为 0 等等。费米子服从著名的“泡里不相容原理”：对于由同一种费米子组成的系统而言，两个全同粒子不能处于同一个微观状态，也就是每个微观状态最多只能被一个粒子所占据。当然，也可以没有粒子处于该状态。问题是：一个由自由电子组成的系统，例如整个白矮星中所有的自由电子构成的系统，究竟存在着多少个微观状态呢？量子力学告诉我们，倘若此系统中电子的动量变化范围是从 0 到 p ，那么在单位体积内电子可以拥有的微观状态数便正比于 p 的立方（更具体些说，它应等于 $8\pi p^3/3h^3$ ，这里 h 是普朗克常数）。根据泡里不相容原理，在所有这些微观状态的每一个状态中，或者没有电子，或者只有一个电子。而且，大量电子在不同微观状态中的分布方式，总是使得整个系统的总能量尽可能地小。

于是，从能量最小的状态开始，一个又一个电子依次经能量渐增的状态上布居，直到所有的电子均有着落为止。显然，最后那些电子占据的状态所具有的能量也最大。这个最大的能量就称为“费米能量”，与这个能量相应的动量称为“费米动量”，相应的速度则称为“费米速度”。凡能量小于费米能量（即动量小于费米动量、或速度小于费米速度）的一切微观状态，都各拥有一个电子。

我们也可以更形象化地把白矮星中的简并物质设想成一个巨大的“原子”，它的“原子核”就是那里的全部裸原子核的总和，所有的自由电子则可以看作这个巨型“原子”的核外电子。正如寻常原子中的电子按由低到高的能级依次布居一般，这个巨“原子”中的无数电子也按同样的原则——能量由小到大——而布居。

我们又可以认为，白矮星简并物质中的电子构成了一个电子气体系统。其中每个电子的微观状态，是由它所处的位置（坐标）和它的动量共同决定的。如所周知，任何宏观物体的坐标和动量都可以同时精确地测定，或者说，可以同时严加限制。但微观粒子却不然。你对一个微观粒子的坐标限制得越严，你就越难限制它的动量；反之，你对一个微观粒子的动量限制得

越严，你就越难限制它的位置。这就是著名的“测不准原理”，它是德国物理学家海森堡于 1927 年首先阐明的。

在天狼 B 星中，物质密度高达每立方厘米 1 吨，也就是说，大量自由电子被强大的重力限制在很小的空间范围内，因此你就不能指望所有这些电子的动量也都限制在很小的范围内。实际情况是，在白矮星的简并电子气体中，除了处于最低能量状态的少数电子外，其它电子的动量都是相当大的（但是它们均未超出相应的费米动量）。对于密度高达每立方厘米 1 吨的简并物质，将有百分之八十到九十的电子运动速度达到光速的百分之十至百分之三十（当然，尽管如此，它们依然低于相应的费米速度）。我们不妨假想在这样的物质中放置一个“器壁”。密度高达每立方厘米 10^{30} 个之多的电子，以如此巨大的速度撞到这个“器壁”上所施的推力当然是极其巨大的。这种推力的宏观表现，就是电子气体的简并性压强。

在白矮星上电子气体的简并性压强可高达数十亿亿个大气压（也就是说，高达 10^{23} — 10^{24} 达因/厘米²）。

其实，回头一想，白矮星简并电子气体中有那么多的电子拥有那么大的动量也是很自然的事情。既然那儿的电子密度极其巨大，每个电子又都得占据一个互不相同的微观状态，那么，相应的微观状态数必定极多；再则，刚才讲过，单位体积内电子拥有的微观状态数又正比于动量变动范围上限 p 的立方，所以理所当然 p 也必定很大。如果 p 不够大的话，那就没有如此众多的微观状态可供那么多的电子布居了。这有如旅馆客房太少的话，势必就会有一些旅客床位无着的。

温度对白矮星无关紧要

白矮星是垂死的恒星。它没有能源，随着内部热量不断往外传输并散入太空，白矮星便不断地冷却。可以说，它靠所剩不多的余热苟延残喘着。除了刚诞生不久的白矮星以外，多数白矮星的中心温度都只有几百万度甚至几十万度，远较太阳的中心温度为低。从原则上讲，由于白矮星“坐吃山空”，将来它们的温度就会越来越趋近于绝对零度，但是即使到那时，由于存在着电子气体的简并性压强，它的密度和内部压强依然会巨大如故。

事实上，我们在前面谈论电子气体的简并性压强时，确实也未涉及温度。其实，那是白矮星处于绝对零度下的状态。然而，迄今所知的白矮星实际上都还具有可观的温度，电子在此温度下作热运动便具有一定的速度、动能和动量。按理说，这种热运动压强似乎也可以抵挡巨大的重力，或者至少可以减轻电子气体简并性压强与重力抗衡的“负担”。实际情况是不是这样呢？或者，我们也可以问：白矮星简并电子气体在不同微观状态中的布居，是否会随温度的不同而异呢？

在绝对零度下电子占满了能量不超过费米能量的一切微观状态;同时,能量大于费米能量的一切微观状态上统统没有电子。电子气体的这种状态称为“完全简并”状态。

统计物理学告诉我们:如果把电子气体加热到一定的温度 T ,那么平均说来每个电子可以分摊到的热运动能量就正比于 T (具体地说应等于 $k_B T$,比例常数 k_B 称为玻尔兹曼常数)。若此热运动能量大于电子气体的费米能量,则几乎所有的电子都会因获得这份热运动能量而转入能量超过费米能量的微观状态。这时电子气体系统的整体能量主要就由热运动能量决定,电子气体系统的压强也就由电子热运动压强来提供,它抵挡住恒星向内的引力而支撑住星体的力学平衡。倘若恒星中心温度高如太阳,那么可以算出,只要密度不超过每立方厘米 700 克,就不必考虑电子气体的简并性压强。这时电子气体的行为就如普通的气体一般,并没有什么太特殊的地方。太阳和通常的主序星内部,情况正是如此。

但是,在白矮星内部情况就大不相同了。那儿的物质密度远远超出了上述界限,每个电子分摊到的热运动能量远远小于电子气体的费米能量。这时,只有能量略低于费米能量的电子才能因获得热运动能量而转入能量超过费米能量的微观状态,并参加热运动。大多数电子的能量都比费米能量低得多,微不足道的热运动能量不能使它们超越费米能量的界限;而且,它们也不能吸收这份热运动能量而转入能量稍高(但仍低于费米能量)的状态,因为后者原来已为一个电子所占据,根据泡里不相容原理,其它电子是不得与之共享同一状态的。

所以,绝大多数电子实际上不能吸收热运动能量,换句话说,它们仍然保持原先的低能状态而不参加热运动。由于参加热运动的电子为数极少,因此热运动的作用微不足道,它所提供的压强微乎其微——即便白矮星具有太阳核心的高温也无济于事。

可以这么说:温度对于白矮星而言是无关紧要的。

其它奇特性质

除了高密高压(然而却未必高温)外,白矮星还有许多性质在恒星世界中可算得与众不同。

例如,太阳和一般恒星内部虽然密度和压强都远较地球上为大,但是由于其内部的高温,所以物质仍处于气体(实际上是完全电离气体,即等离子体)状态。

白矮星内部却不然,它那极高的密度和压力使得物质几乎全部处于结晶状态:整个星体犹如一个巨大而致密的晶体。人们研究了这种“晶体”的导热性质,结果发现它的冷却速率异常缓慢。天体物理学家们通过理论计算得知,在现在的宇宙年龄(一百多亿年)内,还

没有一颗白矮星的内部温度已经冷却到 10,000K 以下。

通过研究白矮星的光谱,人们得知那儿存在着异常强大的磁场——磁场强度高达几十万甚至几千万高斯,这比通常的强磁场恒星(例如 A 型特殊星,其磁场强度达几千高斯,已为太阳磁场强度的数千倍)还要强上几百倍至几万倍。

一颗恒星一旦演化成白矮星,其电子气体的简并性压强就可以阻止星体的进一步坍缩。但是,这种简并电子压强也有一定的限度。对于质量大于太阳 1.4 倍的白矮星,其电子的简并压强就抵挡不住更为强大的引力,因而恒星整体将会进一步坍缩。所以,一颗稳定的白矮星其质量必定小于太阳质量的 1.4 倍。这个极限质量称为“昌德拉塞卡极限”。顺便说一下,这位昌德拉塞卡是旅美印度天文学家,他对恒星内部结构的深入研究,使他在 73 岁高龄之际荣获了 1983 年度的诺贝尔物理学奖金。

如今,天文学家们普遍认为,质量小于 6 倍太阳质量的恒星,其最终归宿就是白矮星。但是在此之前,它们必须抛掉多余的质量。如前所述,抛射质量的方式预期较为平缓:红巨星抛出的外壳成为行星状星云,内核则收缩成为白矮星。理论计算还表明,白矮星如能高速自转,则可望具有更大的极限质量。不过,通常观测到的白矮星自转都相当缓慢。

白矮星的性质无疑是奇特的。然而,与中子星相比,它却有如小巫见大巫,显得平凡而不足道了。

(彭秋和 卞毓麟)