



彭秋和  
卞毓麟

### (三) 中子星 奇观(下)

#### 巨大的宏观量子力学效应——中子星内的超流现象

中子海区域的温度高达几千万度乃至几亿度。有趣的是，在如此高温下，其中子“流体”的物理性质却同接近绝对零度的液态氦非常相似——处于超流状态中。

液氦在低于 2.17 K 的温度下，如果一旦轻轻地摇晃起来，那么它就会无休止地摇晃下去，这表明它完全失去了粘滞性。那就是低温液氦的超流现象。可是，为什么在几亿度的

超高温下，中子海的中子流体也会表现出同样奇特的性质呢？

在中子星内部密度异常巨大的情况下，不仅电子的简并性压强远远超过了自身的热运动压强，而且中子的简并性压强又大大超过了电子和质子的简并性压强（同时，也大大超过中子自身的热运动压强）。在中子海区域，中子密度高达  $10^{13}$ — $10^{14}$  克/厘米<sup>3</sup>，即每立方厘米的体积中有  $10^{37}$ ~ $10^{39}$  个中子。由此可以估算出，此时中子流体的费米能量约为 10—100 百万电子伏。然而，即便在 5 亿度的高温下，每个中子的平均热运动能量也只是 0.05 百万电子伏而已。中子星就是靠这种占压倒优势的中子简并压强与其强大的引力相抗衡、从而使之保持力学平衡和稳定的。

和前面对白矮星中简并电子气体的讨论相似，不难明白，简并中子流体中有些中子所处的微观状态能量必与费米能量相差不远。按理说，它们可以吸收热运动能量而超出费米能量并参与热运动。当然，这部分中子在中子总数中所占的比例是很小很小的。然而，由于中子海内中子的密度极其巨大、为数极其众多，所以即使这微乎其微的一小部分，其绝对数量依然相当可观。倘若它们真的参与热运动，那就不可能存在超流现象。因此，问题的焦点是：为什么就连这一小部分中子都被剥夺了参与热运动的权利？

关键仍在于巨大的密度。在  $10^{13}$ — $10^{14}$  克/厘米<sup>3</sup> 的密度下，中子间的距离仅约  $10^{-13}$  厘米左右。这时中子之间就会产生极强的吸引力。实际上，它和原子核内的核力并无二致。在这种力的作用下，那些能量接近于费米能量的中子便按速度大小相同而方向相反、同时自旋方向也相反的原则两两配对稳定地结合在一起。通常人们称之为“库珀中子对”。虽然每个中子的速度可以很大（接近于费米速度），但是每个库珀中子对的合速度却等于零，因而总动量也等于零。各库珀对之间一般不存在相互作用，可视为彼此互相独立。它们都处于相对最低的能量状态，这称为“库珀凝聚现象”。要想拆开一个库珀对的两个中子，就需要供给一定的能量：平均说来，为每个中子提供的能量必须达 1—2 百万电子伏。只有把库珀对拆散成互不关联的两个中子，它们才能吸收热能而参加热运动。然而，中子星内部的热能却远远不足以拆散任何库珀对，因此任何中子都不能参加热运动。

寻常宏观流体的粘滞性，皆源自流体整体运动能量因粒子间相互摩擦而转化为微观热运动。既然中子海内的这些中子既无摩擦，又不参与微观的热运动，那么中子流体也就不会有粘滞性，于是表现出超流性。

倘若中子星内部温度再增加 20 倍而达 100 亿度，那么热能便足以将所有的库珀对拆散，库珀凝聚现象消失，超流性亦不复存在。刚好拆散这些库珀对所需要的温度叫做“临界温度”。

上述超流性是各向同性的，这种状态常用符号  $^1S_0$  表示。此外，在更靠近中子星核心、物质密度大于  $1.4 \times 10^{14}$  克/厘米<sup>3</sup> 的区域内，还存在着另一种各向异性的超流状态，用符号  $^3P_2$  表示。它是由于每个库珀中子对的两个中子自旋方向相同而造成的。此时每个库珀对的总自旋等于 1。人们推测，在  $^1S_0$  中子超流区和  $^3P_2$  中子超流区之间可能有一个薄层区域，那儿的中子流体处于寻常流体的状态。

#### 电子和质子的状态

在地球实验室里，许多金属、合金、甚至某些半导体在低于 1 K 到 18 K 的低温下（不同物质的这种临界温度各不相同），电阻率会突然下降至零，因此电流可以无损耗地永远流动下去。这就是所谓的超导现象，具有这种性质的物体称为超导体。早在 1908 年，人们就发现了这种奇异的现象，但是它的本质却是在半个世纪之后（1957 年）才由美国物理学家巴丁、库珀和斯里弗从理论上予以阐明，他们为此而荣获了 1972 年度的诺贝尔物理学奖。前面描绘的中子超流现象的实质——中子库珀对，就是类比于这一理论而推论出来的。

与中子超流体类似，当温度很低时，热运动能量小于电子库珀对的结合能，因而不能将库珀对拆散，电子

就不参与热运动。再兼之库珀对彼此间又无摩擦，所以不会造成电阻。这就是低温下超导体呈现超导性的原因，它们称为电子超导体。

中子对是靠它们之间的核力吸引作用而结成库珀对的。可是，电子之间则不但不存在核力吸引作用，而且同性电荷的库仑斥力又很强大，它们何以能够结合成稳定的电子库珀对呢？

原来，通常金属内部的正离子排列成十分规则的晶格。晶格上的正离子在平衡位置附近不断地振动，电子则在其间自由运动。这些自由电子在电场作用下朝同一方向迁移，便造成了金属的导电性。

当自由电子靠近位于晶格格点上的某个正离子时，它将在一定程度上改变该正离子的振动方式，该正离子进而又会影响到其它邻近电子的运动状态。这等效于原来的自由电子对其它电子有某种次级相互作用。在一定的低温条件下，这种次级相互作用将导致那些能量接近于费米能量、运动速度大小相同方向相反、而且自旋方向相反的电子两两互相配对，从而较稳定地结合在一起，形成电子库珀对。

正因为电子库珀对是由这种次级作用形成的，所以它的结合相当弱，只要提供很少的能量（约  $10^{-3}$  电子伏）就可以拆散它。在常温下，电子的热运动能量已高于库珀对的结合能，所以不会形成库珀对，不可能呈现超导性。只有在低温下，电子热运动能量才会低于库珀对的结合能，这时相应的金属、合金或某些半导体就出现了超导性。

中子星内部温度很高，电子热运动能量远远超过库珀对的结合能，因而不存在任何库珀对，电子系统不处于超导状态。那儿的电子处于通常的简并状态，情况与白矮星相似。

但是，对于质子系统情况就大不相同了。在中子星内部的高密状态下，质子间的平均距离很小，与中子系统相似，那儿的质子之间存在着很强的核力作用，可以形成稳定的质子库珀对。所以中子星内部的质子可能呈超导状态。

不过，迄今为止人们尚未发现任何可观测的现象以证实中子星内部的这种质子超导性，它暂时还只是存在于理论家们的公式与计算中。

### 中子超流涡旋运动及其证据

中子星内部的中子流体不仅如前所说处于超流状态，而且还是处于一种特殊的超流状态中，它称为“超流涡旋”运动。其实，一个转动容器内的超低温液态氦就会呈现这种超流涡旋状态。在中子超流区域内存在着许许多多的涡旋，其情况与水池或江河中常见的涡旋相仿。

如果你仔细观察水中的旋涡，你就会发现，离旋涡的中心越近，流体旋转越快。超流中子的涡旋运动更

是如此，愈接近涡旋的轴线，旋转线速度和角速度都迅速增大。但是，离涡旋轴线很近的中子，由于局限在很小的区域内，所以根据测不准原理，它的速度、动量和能量将有很大的不确定性，它们可以具有很大的数值。而这种能量一旦超过库珀中子对的结合能，位于涡旋核心区域的超流中子库珀对就会被拆散，从而具有粘滞性，丧失了超流性质。这时它就变成“正常”的中子流体，并象刚体那样旋转，其旋转角速度等于常数，愈接近中心处线速度就愈趋近于零。

所以，在中子超流涡旋的核心部分实际上是正常的中子流体。这一区域的形状是以涡流转动轴为轴线的圆柱形细管，其半径仅约万亿分之一（ $10^{-12}$ ）厘米，但这仍比中子星内中子间的平均距离大十倍以上。在此核心区域以外，就是作涡旋运动的中子超流体。这种超流涡旋的轴线平行于中子星的自转轴。

中子星内部两邻近超流涡旋轴线间的平均距离为 0.1 毫米，比涡旋核心半径大 10 亿倍。所以，我们可以说中子星内的涡旋是很稀疏的，绝大部分中子都处于超流状态。

超流态中子不和质子、电子等其它基本粒子发生相互作用。但是，位于涡旋核心的正常中子不仅彼此通过核力而相互作用，而且还通过核力同质子强烈地作用。此外，它们同电子还有微弱的磁矩相互耦合。正是这种微弱的作用，却把整个超流涡旋（包括核心区的正常中子和外面广大的超流中子）同带电粒子体系（它同磁场冻结在一起绕中子星自转轴作整体转动）所组成的“磁球”联系成为一个整体。

所有前述这一切似乎都娓娓动听。问题是：这究竟有没有观测上的直接证据呢？

这要从两颗最年轻的中子星——船帆座脉冲星 PSR 0833 和蟹状星云脉冲星 PSR 0531——脉冲周期的突然变短说起。船帆座脉冲星在 1969 年 3 月间、1971 年 8 月间和 1975 年 10 月间都发生过脉冲周期突然变短。其突变的数量虽然仅为周期值的百万分之几，但已经被认为是极不寻常的大事了。蟹状星云脉冲星在 1969 年 9 月、1972 年 10 月和 1975 年 2 月间也发生过类似的现象，只是周期的突变幅度更小，仅为原周期值的亿分之几。发生这种突变的原因，据信是中子星固态壳层的突然断裂，导致其结构重新调整，半径减小，转动惯量也随之减小，于是为了保持角动量守恒，中子星的自转就会突然加快，它辐射的脉冲周期就变短了。

重要的是，每次发生这种周期突变以后，脉冲星的周期又会额外地变长，即中子星的自转又会额外地变慢，而这恰恰证实了其内部中子超流涡旋运动的存在。这是因为如前所述，中子星内部处于超流涡旋状态的中子流体，只有通过超流涡旋核心处未结成库珀对的正常中子同质子、电子相互作用，才与刚性转动的磁球

(即磁场——等离子体冻结在一起的整体)有所联系。正常中子的数目很少,其作用甚弱,因此当中子星外壳和磁球自转突然加快时,内部的中子流体并不能立刻随之同步地加快自转。只是在突变之后,由于超流涡旋核心处的正常中子与磁球的相互作用,才徐徐带动超流中子整体跟上磁球自转的步伐。但是由于超流中子的总质量占中子星总质量的百分之九十以上,所以这种同步协调过程实际上是使整个中子星的自转速率比正常情况(即仅仅由于中子星消耗自转能而发出电磁辐射)下减慢得更快,即导致脉冲星脉冲周期额外地变长。

上述观测现象按这种方式解释不仅比较自然,而且除此之外又几乎找不到任何言之成理的其他替代办法。所以,人们很快就普遍承认,这就是存在中子超流涡旋状态的一项观测证据。

### 结 束 语

恒星演化到白矮星和中子星阶段,就该算“寿终正寝”了。它们没有新的能量来源。白矮星靠冷却而苟延,中子星靠消耗自转能而残喘。一旦能量丧失殆尽,它们便不能再发出辐射。作为物质,它们固然依然存

在;但是作为星球,它们却已经成为过去。也许有朝一日,它们的遗骸会由于某种原因而碎裂,甚至变成造就新一代恒星的原材料。不过人们对此并不十分了解,我们就不多说了。

质量超过 20 倍太阳质量的恒星,在其一生的最后阶段,经过灾难性的超新星爆发,残留在核心部分的质量一般将会大于 3 倍太阳质量,也就是说超过了奥本海默极限,它不可能变成一颗稳定的中子星,更不会成为一颗稳定的白矮星。它自身的引力极其强大,无论是电子气体的简并压强还是中子流体的简并压强都无法与之分庭抗礼。在这无比强大的自身引力作用下,星体只能不断地坍缩。最后,它的密度将会高到这样的地步:在该星体表面处,逃逸速度超过了光速。于是一切物质就再也不可能离它远去了,就连光也逃不脱这种厄运。附近的一切物质,在它那极其强大的引力作用下都将为之吞噬,甚至射到它上面的光线也一概有去无回。它仿佛是太空中一个绝对黑暗的无底洞,因而就叫“黑洞”。黑洞的奇趣当然也是值得大书特书的,有兴趣的读者可参阅《天文爱好者》1982 年 7 月号至 12 月号连载的文章:“跃然纸上的天体——黑洞奇谈”(作者:彭秋和、王振一)。(全文完)