

§ 5. Сверхтекучесть и сверхпроводимость сверхплотного вещества; их влияние на свойства нейтронной звезды

Взаимодействие нейтронов при сверхвысоких плотностях в недрах нейтронных звезд, вероятно, приводит к появлению сверхтекучести. Экспериментальное изучение атомных ядер свидетельствует о том, что ядерные силы между двумя одинаковыми частицами недостаточны для образования динейтрона или дипротона, однако в поле других частиц (например, в ядре) они образуют пары. Аналогичный эффект, вероятно, имеет место в однородной вырожденной нейтронной жидкости.

Пары нейтронов являются бозе-частицами и, следовательно, их поведение должно быть аналогично поведению атомов гелия в жидком гелии. Но еще Капицей было экспериментально обнаружено, что жидкость гелий-4 при температурах ниже 2°K сверхтекуча. В нейтронной звезде сверхтекучесть может существовать при температурах ниже $\sim 1 \text{ Mэв} = 10^{10}^\circ\text{K}$. Те же соображения приводят к предсказанию, что протоны в ядерном веществе (число протонов порядка нескольких процентов от числа всех барионов) будут, возможно, образовывать пары, тем самым давая начало явлению сверхпроводимости. Обсуждение этих эффектов и оценки порядка критических температур, а также подробный перечень литературы можно найти в обзорной статье Гинзбурга (1969). Более поздние исследования описаны Беймом, Петиком, Пайнсом и Рудерманом (1969). Говоря о сверхтекучести и сверхпроводимости, необходимо соблюдать осторожность: при субъядерных плотностях вещество не однородно, а состоит из отдельных ядер. Возможно, оно кристаллизуется, а не образует жидкость. Возможно, при более высоких плотностях (например, околоядерных) силы отталкивания превосходят притяжение. На эти вопросы предстоит ответить дальнейшим исследованиям.

Как будут сказываться перечисленные явления на астрофизическом поведении нейтронных звезд? Они могут влиять на (1) термические, (2) магнитные, (3) гидродинамические свойства звезды.

Начнем с (1). Теплоемкость сверхтекучего или сверхпроводящего вещества меньше теплоемкости материи в состоянии нормального ферми-газа или ферми-жидкости. Причина очевидна: чтобы возбудить барионы, необходимо сначала разбить пару; но существует энергетическая щель Δ , поэтому теплоемкость при низких температурах будет пропорциональна $e^{-\Delta/kT}$. Однако имеются и такие источники теплоемкости, которые не связаны со щелью (электронные и звуковые волны в сверхтекучей жидкости); они будут уменьшать влияние сверхтекучести на теплоемкость.

С другой стороны, если протоны и нейтроны объединяются в пары, скорость тепловых потерь, связанная с излучением нейт-

рино при УРКА-процессе (т. е. при взаимодействии $p + e^- \rightarrow n + \nu$, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$) также замедляется. Предполагают, однако, что в целом сверхтекучесть будет ускорять охлаждение нейтронной звезды.

(2) В лабораторных условиях переход в сверхпроводящее состояние сопровождается выталкиванием магнитного поля из образца (эффект Мейснера). На нейтронных звездах выталкивание будет иметь место в случае малых магнитных полей; если поля велики, выталкивания, по-видимому, не произойдет. Возникновение сверхпроводимости будет сопровождаться изменением только микроструктуры поля; можно ожидать, что вместо однородного магнитного поля мы получим гетерогенное распределение: будут как домены, где сверхпроводимость разрушена магнитным полем, так и сверхпроводящие домены, где будет течь электрический ток. Подобная ситуация наблюдалась в лабораториях — это так называемые твердые сверхпроводники второго рода (например, Nb_3Sn), способные благодаря описанному явлению содержать в себе большие магнитные поля. Время затухания магнитного поля бесконечно, если силовые линии пронизывают сверхпроводящую область, но даже без сверхпроводимости оно велико. В оболочке ($\rho \lesssim 10^{12} \text{ г/см}^2$) звезды $\tau_d \sim 10^6 \text{ лет}$ [Острикер и Ганн (1969b); Пачини (1969); Кануто, (1970)]. В недрах звезды ($\rho \approx 10^{14} \text{ г/см}^2$) $\tau_d \approx 10^{24} \text{ лет}$ [Бейм и др. (1969)]. Вопрос о том, где текут токи, ответственные за внешнее магнитное поле звезды, разумеется, открыт.

(3) При равновесии влияние сверхтекучести на гидродинамические явления, по-видимому, мало из-за огромных размеров звезды (по сравнению с ядерными масштабами). Сверхтекучая жидкость подобна идеальной жидкости ($\text{с } \nabla \times v = 0$, т. е. безвихревой), только в микроскопической шкале. Известно, что отдельные квантованные вихри, распределенные по жидкости, делают ее поведение похожим на поведение обычной вязкой жидкости. Тем не менее, разница есть: передача скорости от сверхпроводящей нейтронной жидкости к протонной компоненте (связанной с магнитным полем) происходит медленно. Следовательно, установление равновесного твердотельного вращения звездной жидкости после изменения скорости вращения может потребовать много времени.

(4) В области, где имеются отдельные ядра, электростатическое отталкивание их приводит к образованию кристаллической решетки. Заряды ядер довольно велики ($z \sim 40$), поэтому температура плавления высока; в результате быстрого охлаждения вещества (в частности, за счет излучения нейтрино) оболочка станет твердой. Масса и толщина твердой оболочки приводятся ниже в зависимости от массы звезды. Твердая оболочка обладает определенной прочностью.

Это обсуждение гидродинамических эффектов может показаться преждевременным, однако на самом деле у пульсаров уже сегодня измерены даже ничтожные вариации периода. Существуют очень интересные гипотезы, которые объясняют изменение в периодах некоторых пульсаров сверхтекучестью недр нейтронной звезды и твердостью ее внешних слоев. Даже если эти эффекты малы, они представляют большой самостоятельный интерес, потому что несут информацию о свойствах материи в экстремальных условиях, далеко выходящих за рамки возможностей лабораторной физики.

Объяснение этих особенностей сводится к следующему: представим себе пульсар в равновесном состоянии, центробежная сила уравновешена тяготением и давлением при определенной сплюснутости пульсара, весь пульсар вращается как целое. В полном равновесии нет скалывающих напряжений в веществе пульсара и нет дифференциального вращения. Вращение пульсара постепенно замедляется за счет отдачи энергии и момента. При этом прочность твердой, кристаллической оболочки препятствует плавному изменению форм в соответствии с уменьшением центробежной силы. В оболочке накапливаются упругие напряжения сдвига. В некоторый момент, по достижении критического напряжения — предела прочности, происходят сдвиги, т. е. то, что образно называется «звездотрясение». При этом момент инерции звезды внезапно уменьшается, а скорость вращения также внезапно увеличивается. Именно такое явление наблюдается, изменение периода пульсара составляет порядка 10^{-8} самого периода, что соответствует изменению среднего радиуса на 0,01 см (впрочем, вероятно, правильнее было бы относить изменение периода к изменению сплюснутости).

Однако после звездотрясения скорость вращения твердой оболочки увеличивается больше, чем скорость вращения жидкого ядра, т. е. возникает дифференциальное вращение; в течение следующего периода (около недели) происходит дополнительное замедление оболочки за счет обмена моментом с внутренним жидким ядром. Именно в этом периоде играет роль сверхтекучесть ядра (детальная картина явления зависит также от распределения магнитного поля и от магнитной связи ядра и оболочки). Наблюдаемый период пульсара соответствует вращению оболочки; усиленное торможение после звездотрясения действительно было обнаружено. После выравнивания вращения оболочки и ядра наступает новый цикл.

Детальное исследование изменений периода является настоящим триумфом мастерства наблюдателей и остроумия теоретиков. Тщательные исследования малых уклонений периода позволяют судить о свойствах вещества — его прочности, сверхтекучести при плотности порядка ядерной, позволяют определить массу жидкого ядра в нейтронной звезде.