О ВАЖНОСТИ ТЕОРИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД ДЛЯ ПОНИМАНИЯ ЗВЁЗДНЫХ ЦИКЛОВ АКТИВНОСТИ ПУЛЬСАРОВ

Кобяков Д.Н.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

IMPORTANCE OF THE CONDENSED MATTER THEORY FOR UNDERSTANDING OF STELLAR ACTIVITY CYCLES OF PULSARS

Kobyakov D.N.

Institute of Applied physics of the Russian Academy of sciences, Nizhny Novgorod, Russia

Cyclic stellar activity is observed, first of all, from the Sun, but distant stars provide astronomical phenomena of analogous character. A basis for theories, which account for the astronomical observations of neutron stars can be established from the point of view of the condensed matter theory. The crucial mechanisms work in the interior of neutron stars, where the matter is expected to be superconducting. Theory of superconductivity in the matter of pulsars is far from being completed. Recently, it was found [Phys. Rev. C 102, 045803 (2020)] that the standard approach within the Ginzburg-Landau theory may be in principle inapplicable to the core of neutron star in case when the neutrons are superfluid in addition to the superconducting protons. The reason is that there are two critical temperatures, which are depth-dependent and generally do not coincide. Thus, the Ginzburg-Landau theory can be applied only at a fixed depth within the core, in a thin spherical layer where the critical temperatures are equal. Otherwise it is expected that the temperature effects will be significant and that the dichotomy of the superconductivity types will be broken, analogously to the high-temperature superconductors.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-161-164

Введение

Звездная активность может носить периодический характер, при котором наблюдаемые характеристики звезды возвращаются в прежнее состояние. Таков, например, 22-летний солнечный цикл Хейла, при котором периодически меняется количество солнечных пятен. Однако и далёкие звёзды проявляют активность циклического характера. Нейтронные звёзды представляют целый ряд периодических процессов, напрямую отражающихся на наблюдаемых характеристиках. Эти объекты, именуемые также пульсарами (и магнетарами – в случае величины магнитного поля у поверхности порядка 10^{14} – 10^{15} Гс), являются компактными источниками радио и рентгеновских излучений. Например, пульсар в Парусах 0833-45, пульсар в Крабовидной туманности PSR B0531+21 – наиболее часто рассматриваемые нейтронные звёзды – обладают модуляциями на частотах собственного вращения. Существуют двойные звёздные системы, в которых присутствует модуляция в результате периодического затмения пульсара компаньоном; например, в двойной системе миллисекундного пульса-

ра J1614-2230 при помощи задержки Шапиро была измерена его масса [1]. Ещё один пример циклов активности пульсаров представляют двойные системы с аккреотирующим компаньоном нейтронной звезды, например, пульсар HETE J1900.1–2455 с наблюдаемой фазой аккреции в 2005–2015 годах и последующим остыванием [2]. Важным явлением, накладывающим некоторые критерии на теорию материи внутри пульсара, являются сбои частоты пульсаров, или кратко, «*глитчи*». Например, 12 декабря 2016 года «глитч» пульсара 0833-45 в созвездии Парусов скачком (длительностью не более 12.6 сек) повысил частоту видимого вращения 11.2 Гц на относительную величину $\Delta\nu/\nu = 1.431 \times 10^{-6}$, что сопровождалось последующей релаксацией [3]. Корректное расширение теории сверхпроводящих земных материалов для пульсаров должно учитывать значительную гравитационную стратификацию звёздной материи. Материя пульсара под его твёрдой корой является холодной квантовой жидкостью, в которой существенна зависимость микроскопических сил, действующих между барионами, от глубины под корой, что выражается в различных пространственных распределениях критической температуры как функции глубины для протонов и нейтронов. Ряд явлений внутри нейтронных звёзд существенно зависит от присутствия пространственно пересекающихся областей сверхпроводимости и сверхтекучести. Описание области пересечения является актуальной задачей микроскопической теории материи пульсаров. Первые шаги по рассмотрению сверхпроводимости в ядре пульсаров были сделаны в классической работе Бэйма, Петхика и Пайнса в 1969 [4]. Были получены оценки сверхпроводящей щели, сделан вывод о присутствии в ядре сверхпроводимости типа II, при этом сверхтекучесть нейтронов не была учтена. Для учёта сверхтекучести нейтронов необходимо развить теорию Гинцбурга-Ландау с двухкомпонентным параметром порядка

Результаты

Будем рассматривать тонкий сферический слой, где обе температуры совпадают, следуя нашей работе [5]. Параметр порядка для каждой жидкости с куперовским спариванием представляет из себя (в случае S- волнового спаривания) комплексную (волновую) функцию от пространственных координат. Малость параметра порядка позволяет записать свободную энергию системы вблизи критической температуры в виде разложения по степеням параметра порядка. Для выяснения характера сверхпроводимости при наличии нейтронной компоненты достаточно выписать члены вплоть до 4 порядка по волновым функциям и до 2 порядка по градиентам. Поскольку теория Гинцбурга-Ландау строится на целых степенях параметра порядка, то степень Δ_i данного члена типа i в разложении полной энергии сверхпроводящей системы может быть рассчитана по следующему правилу: $\Delta_i = d_i + n_i - 2$, где d_i – количество операторов набла в данном члене,

$d_i = \{0, 2\}$, n_i – сумма степеней сверхтекучих плотностей в данном члене, $n_i = \{1, 2\}$. Обозначим $n_\alpha = |\Psi_\alpha|^2$, где $\alpha = p$ (протоны) или n (нейтроны), причём $n_{\alpha 0}$ есть значения n_α в глубине сверхпроводника. Члены с $\Delta_i = 0$ следующие: $b_p n_p^2 / 2$, $b_n n_n^2 / 2$ и $b_{np} n_p n_n$. Члены $\Delta_i = 1$ суть: $\lambda_{\alpha\beta} (\nabla \sqrt{n_\alpha}) \cdot (\nabla \sqrt{n_\beta})$ и $\frac{1}{2m} n_\alpha P_\alpha^2$, где m – масса бариона, P_α равны калибровочно-инвариантному импульсу на один барион. Члены с $\Delta_i = 2$ есть: $\frac{1}{2m} \frac{n_{np0}}{n_{p0} n_{n0}} n_\alpha n_\beta (P_\alpha - P_\beta)^2$ и $\mu_{\alpha\beta} (\nabla n_\alpha) \cdot (\nabla n_\beta)$. Член $\propto n_\alpha n_\beta (P_\alpha - P_\beta)^2$ описывает взаимное увлечение сверхтекучих барионов. Применяя вариационный принцип к полной энергии при заданном химическом потенциале сверхтекучих квазичастиц, получаем систему связанных нелинейных стационарных уравнений Шрёдингера. Решение этой системы при соответствующих граничных условиях во внешнем магнитном поле даёт профили волновых функций Ψ_α и векторного потенциала, который экспоненциально спадает, согласно эффекту Майсснера. Типичный ход функций на границе между сверхпроводником и нормальным проводником, заполненным магнитным полем, показан на рис. 2 работы [5]. Прямые численные решения уравнений дают возможность оценить величину и знак поверхностного натяжения на данной плоской границе. Положительный знак свидетельствует о сверхпроводимости типа I, отрицательный – типа II. Одна из задач, поставленных в работе [5], состояла в определении влияния параметров, задающих взаимодействия в ядерной материи между нейтронами и протонами, на тип сверхпроводимости. В отсутствие нейтронов тип сверхпроводимости параметризуется числом Гинцбурга-Ландау κ_0 , равного отношению лондоновской глубины проникновения к длине когерентности; при $\kappa_0 = 1/\sqrt{2}$ поверхностная энергия меняет знак. В материи нейтронных звёзд значение κ_0 оценивается как ~ 3 [4]. При наличии нейтронов смена знака происходит при других численных значениях. Анализ уравнений, определяющих термодинамическое критическое магнитное поле и динамическое критическое магнитное поле, приводит к формуле, определяющей значение параметра Гинцбурга-Ландау в точке смены знака поверхностной энергии $\kappa_c = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\Theta_2}{\eta} \right) \frac{1 - \gamma(1 + \eta\Theta_3)}{1 - \Theta_2\Theta_3}}$ [5]. Безразмерные параметры определяются в однородной материи при данной плотности барионов по следующим соотношениям: $\eta = n_{p0} / n_{n0}$, $\gamma = n_{np0} / n_{p0}$, $\Theta_2 = b_{np} / b_p$ и $\Theta_3 = b_{np} / b_n$.

Выводы

Традиционный способ описания сверхтекучих систем развивается в рамках теории Гинцбурга-Ландау, согласно которой свободную энергию

сверхпроводника можно разложить по степеням параметра порядка вблизи температуры перехода. В работе [5] установлено, что вследствие изоспиновой асимметрии, данное основное условие теории не может выполняться одновременно и для протонов, и для нейтронов в ядре пульсара. Исключение, возможно, составляет тонкий сферический слой в глубине ядра пульсара [5]. Вне этого слоя внутри ядра, при одновременном наличии сверхпроводимости и сверхтекучести, тип сверхпроводимости протонов будет, вероятно, не совпадать ни с типом II, ожидаемом в случае отсутствия сверхтекучести нейтронов, ни с типом I, который также хорошо известен в земных материалах, а будет обладать (не изученным пока) промежуточным характером, при котором статическое взаимодействие между квантовыми вихревыми нитями носит немонотонный характер. Существуют земные аналоги промежуточного типа сверхпроводимости [6]. Взаимодействие вихрей и магнитный отклик в большей части сверхпроводящей материи в пульсарах представляет актуальную открытую проблему астрофизики. Ключевым шагом для её решения является применение и расширение теории конденсированных сред к материи нейтронных звёзд.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-12-00268).

Литература

1. *Demorest P.B. et al.* // Nature, 2010, **467**, 1081–1083.
2. *Degenaar N. et al.* // MNRAS, 2017, **465**, L10–L14.
3. *Palfreyman J. et al.* // Nature, 2018, **556**, 219.
4. *Baym G., C. Pethick and D. Pines* // Nature, 1969, **224**, 673.
5. *Kobyakov D.N.* // Phys. Rev., 2020, C **102**, 045803.
6. *Vagov A. et al.* // Phys. Rev. B, 2016, **93**, 174503.