

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 15

АВГУСТ, 1979

ВЫПУСК 3

УДК 523.841

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДЕНИЯ ПУЛЬСАРА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЛАБОРАТОРИИ (Сбор)

Дж. С. ЦАКАДЗЕ, С. Дж. ЦАКАДЗЕ

Изложены результаты экспериментального изучения свойств сверхтекучего ^4He в режиме нестационарного вращения. На основе анализа экспериментальных данных показано, что особенности вращения пульсаров (внезапные подскоки скорости, осцилляции угловой скорости вращения, длительные релаксационные процессы) могут быть объяснены на основе представления о сверхтекучести нейтронной жидкости в пульсарах.

Как известно, крупнейшее открытие в астрофизике XX века было сделано в 1967 г. в Англии при испытании нового радиотелескопа, когда чувствительная электронная аппаратура зарегистрировала регулярные радиопульсы [1] (в метровом диапазоне), интервал времени между которыми был порядка секунды и постоянным с точностью до миллиардных долей секунды. Первой мыслью английского ученого Хьюиша и его учеников, открывших столь удивительные импульсы космического происхождения, была мысль о сигналах внеземной цивилизации. Однако вскоре были получены новые данные о природе таинственных сигналов, которые не оставили сомнения в их естественном происхождении. Источники этих сигналов были названы пульсарами. Через некоторое время выяснилось [2], что пульсары являются нейтронными звездами, которые еще в 30-е годы были открыты «на кончике пера» известным советским ученым, академиком Ландау [3]. Исходя из теоретических соображений он показал, что во Вселенной должны существовать сверхплотные небесные тела малых размеров. Масса этих тел должна быть порядка массы Солнца, а размер порядка 10 км, плотность вещества в них должна быть $\sim 10^{14}$ г/см³. Такой плотностью обладает вещество, из которого состоят ядра атомов. Таким образом, пульсар представляет собой как бы гигантское атомное ядро.

В дальнейшем учеными различных стран было показано, что сверхплотные звезды действительно должны состоять из ядерного вещества: нейтронов, протонов и электронов, что они, эти звезды, должны образовываться в результате взрыва сверхновых [4], когда у звезд, масса которых порядка массы Солнца, исчерпывается запас «горючего» и начинается их катастрофическое сжатие: вещество звезды с огромной скоростью начинает падать на ее центральную часть, температура которой быстро растет, пока не произойдет сильнейший даже в космических масштабах взрыв. При этом образуется туманность, а в ней быстровращающаяся нейтронная звезда — пульсар. В этот момент температура звезды достигает 10^9 градусов. Уже через несколько лет температура звезды уменьшается на два-три порядка и потом уже долго держится постоянной.



Рис. 1. Схематический разрез пульсара.

Согласно современным представлениям, развитым американскими учеными Беймом, Петиком, Пайнсом и Рудерманом [5], пульсар имеет следующее строение (см. рис. 1): внутри твердой железной оболочки звезды (состоящей из ядер Fe^{56}) находится нейтронная жидкость с малой примесью протонов и электронов. Плотность вещества коры $\sim 10^7$ г/см³, а нейтронной жидкости — $\sim 10^{14}$ г/см³. Тяжелые пульсары должны иметь также твердую сердцевину, состоящую из нейтронной или адронной кристаллической решетки [6]. Благодаря огромной плотности ускорение си-

лы тяжести на поверхности пульсара примерно $10^{10} - 10^{12} g$ (g — ускорение силы тяжести на поверхности Земли). Магнитное поле этой звезды также должно иметь колоссальную напряженность, приблизительно $10^{11} - 10^{12}$ Гс. Из-за несовпадения «географического» и магнитного полюсов пульсара его магнитная ось имеет значительный наклон относительно оси вращения. Если теперь учесть, что излучение пульсара направлено преимущественно вдоль магнитной оси, то станет ясным, почему мы регистрируем его в виде импульсов: это происходит тогда, когда магнитная ось пульсара направлена на Землю. Отсюда, между прочим, вытекает, что мы можем зарегистрировать только малую часть общего количества пульсаров: излучение большинства из них проходит мимо земного наблюдателя. И действительно, согласно оценкам [7] количество пульсаров во Вселенной должно быть $\sim 10^7$, из них на сегодняшний день открыто ~ 200 .

Естественно, что излучающий пульсар должен притормаживаться, то есть с течением времени период его вращения должен расти. Справедливость этого предположения была доказана уже в 1969 г., почти для всех известных тогда пульсаров, что сыграло роль решающего подтверждения тождественности пульсаров с молодыми нейтронными звездами. Зная период вращения пульсаров (который для различных звезд меняется в пределах $(0.333... \div 4)$ с) и темп их замедления (что составляет $\sim 10^{-8} - 10^{-9}$ с в сутки), можно определить возраст звезды. Например, для пульсара Крабовидной туманности такая оценка дает ~ 1000 лет, что хорошо совпадает с возрастом этой туманности, пульсар Парусов X имеет возраст порядка 10^4 лет, это есть возраст туманности Парусов X, определенный радиоастрономическими методами. Так же можно определить, что пульсар PSR 0611-22 связан с радиотуманностью IC 433, их возраст 65 тысяч лет, а самые старые из пульсаров имеют возраст более миллиарда лет. Первый из открытых пульсаров уже прожил пять миллионов лет (после букв «PSR», что обозначает пульсар — (Pulsar) указаны экваториальные координаты звезды: первые четыре цифры дают прямое восхождение в часах и минутах, а последние две — склонение в градусах и минутах). Оценки показывают, что туманности, которая рождается вместе с пульсаром, рассеивается в пространстве примерно за сто тысяч лет. Этот факт подтверждается наблюдениями: вокруг «старых» пульсаров нет никаких туманностей, тогда как «молодые» пульсары, наоборот, находятся в туманностях — остатках сверхновых. Самый быстровращающийся пульсар PSR 0532+21 с периодом вращения 0.033... с (в настоящее время период вращения пульсаров определяется с точностью до 11-го знака) занимает центральную область Крабовидной туманности. Дата рождения этого пульсара — 1054 г. В том году в созвездии Тельца китайскими и японскими астрономами был зарегистрирован «небесный гость» — такая яркая

сверхновая, что она была видна даже днем. В центре Крабовидной туманности еще в прошлом веке были наблюдаемы две близкие звездочки-соседи. Одна из них обычная звезда, с характерным для таких звезд спектром. Вторая — голубая звезда. Ее спектр отличается от спектра всех других звезд отсутствием эмиссионных линий, а также линий поглощения: он сплошной, что указывает на необычную природу излучения этой звезды. Уже в 30-х годах было высказано предположение, что голубая звезда является нейтронной звездой, а ее излучение имеет нетепловую природу. Вскоре после того, как в центре Крабовидной туманности был открыт пульсар, на голубую звезду изглянули через стробоскоп, период вращения которого равнялся периоду вращения пульсара. Когда фазы вращения стробоскопа и пульсара совпадали, голубая звезда регистрировалась на фотопленку. При расстройстве фаз звезды не было. Так было доказано, что голубая звезда Крабовидной туманности, которую мы видим как слабую звезду 16-ой величины, есть пульсар PSR 0532+21. Оказалось, что оптическое излучение этого пульсара имеет синхротронную природу, то есть вызвано движением релятивистских электронов в магнитном поле звезды. Синхротронное излучение характеризует и саму Крабовидную туманность, при этом поставщиком заряженных частиц является пульсар. Следует отметить, что впервые на синхротронную природу излучения Крабовидной туманности указал советский ученый Шкловский [8] в 1953 г. Затем Гинзбург и Гордон предположили, что в таком случае это излучение должно быть поляризовано линейно. Вскоре, в 1954 г., Вашакидзе [9] экспериментально обнаружил этот эффект.

Кроме радиоволн и видимого света пульсар PSR 0532+21 излучает рентгеновские лучи и γ -кванты. Пульсары в основном излучают радиоволны в метровом и дециметровом диапазонах. Основное излучение около 20-и пульсаров более жесткое — в области рентгеновских лучей, 3 пульсара излучают и видимый свет. Многие теоретические соображения указывают на то, что пульсары могут явиться одним из источников космических лучей. В последнее время эта точка зрения, по-видимому, подтверждается и экспериментально [10].

Тщательные наблюдения показали, что вращение пульсара характеризуется рядом особенностей. На рис. 2 показана временная зависимость скорости вращения пульсара. Как уже было отмечено выше, скорость вращения, хотя очень медленно, но все же уменьшается [11, 12] у всех без исключения звезд. На фоне этого уменьшения возможны и резкие подскоки скорости, как это было зарегистрировано у двух самых быстрых пульсаров PSR 0532+21 и PSR 0833—45. Это явление впервые наблюдалось в 1969 г. [13—16]. В последующие годы PSR 0833—45 ускорялся еще дважды: в 1971 г. [17] и в 1975 г. [18], а пульсар PSR 0532+21 ускорялся че-

рез каждые три месяца [6] (с такой частотой происходят, так называемые, микроускорения). Интервал времени τ между этими событиями является весьма важной характеристикой поведения пульсаров. Еще более необычное явление наблюдалось у обеих звезд после внезапного увеличения скорости: началось их более резкое, чем до скачка скорости, замедление, которое длилось в течение времени t_0 , по истечении которого замедление пульсаров вернулось к прежнему темпу [19]. Это указывает на возникновение релаксационных процессов при ускорении звезды, которые длятся в те-

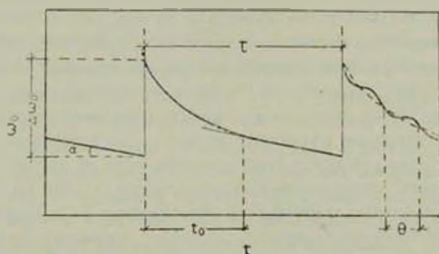


Рис. 2. Зависимость угловой скорости вращения пульсаров от времени. t_0 — время релаксации, τ — интервал времени между ускорениями, θ — период осцилляций угловой скорости вращения.

ние времени t_0 . Это время для пульсара Парусов X порядка 1.2 года, а для пульсара Крабовидной туманности меняется в пределах $5 \div 15$ дней [20—22]. Третье характеристическое время связано со следующим феноменом: оказалось, что после подскока скорости, в процессе замедления, происходит осцилляция скорости вращения с периодом θ . Это время для обоих пульсаров порядка нескольких месяцев [23]. Все эти особенности поведения пульсаров, независимо от других соображений, приводят к вышеописанной схеме строения этой звезды. Более того, оказалось, что возможно продемонстрировать все наблюдаемые астрофизиками явления в низкотемпературной лаборатории, при помощи сверхтекучего гелия, залитого в сферический контейнер, который может свободно вращаться в парах жидкости с малым замедлением из-за трения.

Что такое сверхтекучесть? Это явление беспрепятственного протекания через узкие щели и капилляры для жидкого гелия было открыто в 1938 г. Капицей [24]. Сверхтекучее состояние, когда жидкость целиком лишена вязкости, с точки зрения классической физики является противоречивым, незаконным явлением, и только квантовая механика может объяснить как отсутствие вязкости у жидкого гелия, так и ряд других парадоксальных и уникальных особенностей этого явления. Теория сверхте-

жидкости была создана Ландау в 1941 г. В этой теории [25] показывается, что жидкий гелий — квантовая жидкость, подчиняющаяся законам квантовой механики. Эта жидкость не замерзает даже при абсолютном нуле, если не создать над ее поверхностью давление в 25 атм. При понижении температуры ниже 2.17 К, в жидкости происходит фазовое превращение второго рода, образуется новая, сверхтекучая фаза, плотность которой ρ_s по мере дальнейшего понижения температуры возрастает. При этом соответственно уменьшается плотность нормальной компоненты (так что полная плотность жидкости ρ остается постоянной и равной $\rho_s + \rho_n$). Таким образом, жидкий гелий ниже 2.17 К при любой температуре, не равной нулю, состоит из смеси нормальной и сверхтекучей компонент. Нормальная компонента, в свою очередь, состоит из тепловых возбуждений — фононов и роточов, которые, как частицы идеального газа, движутся в объеме сверхтекучей жидкости, находящейся в основном состоянии, вовлекая в тепловое движение различные ее части. Следовательно эти компоненты принципиально не могут быть отделены друг от друга. Несмотря на это, в классических экспериментах Андроникашвили [26] было не только доказано существование сверхтекучей компоненты, но и измерена температурная зависимость ее плотности, которая оказалась совпадающей с предсказаниями теории Ландау.

Следующий качественно новый шаг в учении о сверхтекучести был сделан Фейнманом [27], который, основываясь на гипотезе Онсагера [28] и экспериментах Андроникашвили, показал, что во вращающемся сверхтекучем гелии образуются вихри с циркуляцией, равной единичному кванту $\Gamma_0 = h/m$ (m — масса атома гелия, h — постоянная Планка), и если без вихрей сверхтекучая компонента не взаимодействует с другими телами, то есть полностью лишена вязкости, то во вращающемся состоянии у него появляется эффективная вязкость, обусловленная рассеянием квантов тепловых возбуждений на стволах вихрей. Оказалось, что вихри возникают при определенной скорости вращения, ω_{c1} , именуемой первой критической скоростью (в обычных условиях $\omega_{c1} \sim 10^{-3} - 10^{-1} \text{ с}^{-1}$). По мере роста скорости вращения их число растет, а при, так называемой, второй критической скорости ω_{c2} число вихрей настолько велико, что вся сверхтекучая компонента превращается в нормальную (для жидкого гелия $\omega_{c2} = 10^4 - 10^5 \text{ с}^{-1}$).

Низкотемпературная школа грузинских физиков, созданная и возглавляемая Андроникашвили, имеет значительные достижения в деле теоретического и экспериментального изучения свойств вращающегося сверхтекучего гелия [29, 30]. В Грузии были впервые выявлены и объяснены многие удивительные и интересные свойства этой жидкости, были иссле-

дованы закономерности рождения [31] и распада [32] вихрей, их упругие свойства [33, 34] и т. д. О некоторых из них речь будет идти ниже.

Еще до открытия пульсаров, в 1959 г., Мингал [35] показал, что если существуют нейтронные звезды, то нейтроны в них должны образовать сверхтекучую жидкость с температурой перехода в сверхтекучее состояние $\sim (10^{10} \div 10^{12})$ К. Также до открытия пульсаров из работы Гинзбурга и Киржница [36] стало известно, что в сверхтекучей нейтронной жидкости должны образоваться квантованные вихри наподобие вихрей в жидком гелии. Критическая скорость вихреобразования в нейтронной жидкости оказалось равной $\omega_{c1} \sim 10^{-14} \text{ с}^{-1}$, а вторая критическая скорость — $\omega_{c2} \sim 10^{10} \text{ с}^{-1}$. Таким образом пульсары, скорость вращения которых лежит в интервале $(\sim 1.5 \div 200) \text{ с}^{-1}$, а температура не превышает $\sim 10^8$ К, должны быть пронизаны квантованными вихрями.

Эти представления сыграли большую роль в деле опознания нейтронных звезд. Действительно, из работ грузинских физиков было известно, что вовлечение во вращение сверхтекучей компоненты происходит путем рассеяния фононов и ротонов на стволах вихрей своеобразным механизмом, играющим роль вязкости сверхтекучей компоненты. Однако для установления равновесного движения в таком случае требуется гораздо большее время, чем в случае обычной вязкой жидкости. Пайнс и его сотрудники [19] подсчитали, например, что если пульсар состоял бы из нормальной нейтронной жидкости, то времена установления равновесного движения после подскока скорости равнялись бы миллионным долям секунды и практически были бы ненаблюдаемы. Если бы пульсар был твердым телом, то эти времена были бы еще меньше. Только сверхтекучая жидкость требует для установления равновесного режима движения в пульсарах по их теоретическим оценкам времени порядка $10^6 \div 10^7$ с. Таким образом, из совсем других — кинематических соображений можно прийти к выводу, что пульсар в основном состоит из сверхтекучей жидкости. Конечно, наиболее убедительным является вывод, к которому наука приходит несколькими независимыми друг от друга путями. Как и в этом случае, к выводу о сверхтекучести нейтронных звезд Мингал пришел из совсем других соображений: анализируя уравнение состояния нейтронной жидкости.

Модель пульсара, созданная в Институте физики АН Груз. ССР, представляет собой стеклянную сферу [37—39] (или цилиндр из оргстекла), подвешенную без опоры в магнитном поле (рис. 3). Специальная электронная система следит и в случае необходимости корректирует его положение в пространстве. Сфера заполняется жидким гелием и приводится во вращательное движение миниатюрным асинхронным электромоторчиком, ротор которого соосно со сферой закреплен на оси прибора. Кратковременным включением электромоторчика можно ускорить вращение прибора,

имитируя тем самым ускорение пульсара. Световой зайчик, отраженный от вращающейся системы, падает на светочувствительный кристалл, в котором возникает электрический импульс. Как и в случае настоящего пульсара, временной интервал между этими импульсами равен периоду вращения, и модель пульсара вращается с малым замедлением из-за трения о пары жидкости. Электрические импульсы, возникшие в светочувствительном элементе, по кабелю передаются на ЭВМ, которая с большой точностью определяет закон вращения стеклянной сферы со сверхтекучей жидкостью.

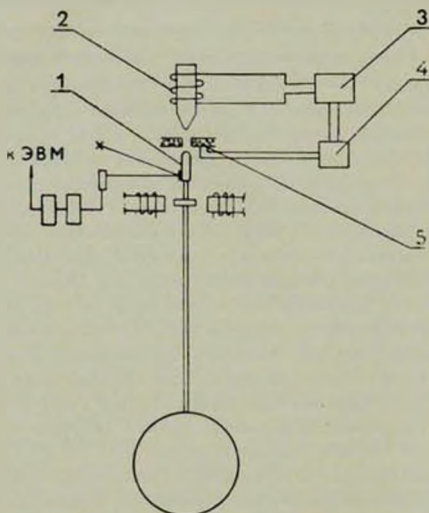


Рис. 3. Схематический чертеж прибора с безопорной магнитной подвеской. 1 — ферромагнитная головка, 2 — электромагнит, 3 — питание электромагнита, 4 — ВЧ генератор, 5 — катушка ВЧ контура-датчика положения.

Следя за изменением скорости замедления вращающейся модели в течение большого промежутка времени, заметили, что иногда сфера со сверхтекучей жидкостью самопроизвольно ускоряется, как это показано на рис. 4, на котором изображена временная зависимость скорости вращения модели пульсара. Почему это происходит?

Еще в 1959 г. при исследовании свойств вращающегося гелия, к чему тогда только приступали Андроникашвили и его ученики, было наблюде-
но [40] явление долгого сохранения вихрей в изменившейся обстановке. Например, если происходит резкое уменьшение скорости вращения [41],

то число вихрей, которое, как было сказано выше, пропорционально угловой скорости, уменьшается скачком через большое время, достигающее нескольких сотен секунд. Как правильно заметил Паккард [42], момент количества движения распавшейся группы вихрей передается жидкости,

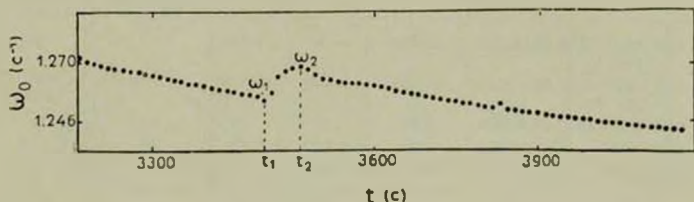


Рис. 4. Зависимость угловой скорости вращения сосуда с He II от времени.

которая и ускоряется. Причиной же ускорения пульсара, по мнению Рудермана [43], является, так называемое, звездотрясение. Из-за быстрого вращения кора пульсара имеет сплюснутую форму, как у Земли и других вращающихся небесных тел. Это вызвано действием центробежной силы и силой тяжести. Равновесие между этими силами наступает, когда вращающаяся сфера несколько сплюснута у полюсов. По мере замедления скорости вращения звезды центробежные силы, действующие на кору в экваториальной области, постепенно уменьшаются, а сила тяжести остается прежней. Равновесие между этими силами нарушается, в коре возникают и усиливаются механические напряжения, которые в конце концов приводят к скачкообразному оседанию коры у экватора. Это и есть явление звездотрясения: при этом скорость вращения резко подскакивает из-за сохранения момента количества движения (этим законом пользуются, например, мастера фигурного катания, когда для увеличения скорости вращения быстро приближают раскинутые в сторону руки). Пайнс и Шахам [44] подсчитали, что таким механизмом вполне можно объяснить наблюдаемые ускорения обоих пульсаров: и Краба, и Парусов X, однако время между ускорениями должно быть десятки лет, что противоречит астрофизическим наблюдениям. А если в пульсаре распадается большая группа вихрей, которые накопились при замедлении его вращения, как это имеет место в замедленно вращающемся сверхтекучем гелии? Подсчитаем. В пульсаре Краба за время между соседними ускорениями набирается избыточное число вихрей — 10^{13} . Такое же количество вихрей в пульсаре Парусов X наберется за $700 \div 1000$ суток, и периоды между ускорениями этого пульсара лежат в этом интервале: 720 суток между первым и вторым и 1400 суток между вторым и третьим.

Таблица 1

Пульсар	Период вращения P (с)	Ускорение P (ис/сутки)	Полное число вихрей N	N (сутки ⁻¹)	Время τ	
					Вычисленное на основе на- ших рассмотре- ний (лет)	Наблю- денное (суток)
PSR 0532+21 (Краб)	0.033099324	36.518	$6 \cdot 10^{11}$	$7 \cdot 10^{11}$		90
PSR 0833-45 (Парус X)	0.089209298	10.823	$2 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{10}$	2-3	900 1400
PSR 0611-22	0.334911898	4.84	$6 \cdot 10^{14}$	10^9	15	?
PSR 0736	0.374918324	1.73	$5 \cdot 10^{14}$	$2.5 \cdot 10^8$	30	?
PSR 2045-16	1.961565351	0.963	10^{14}	$1.5 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^4$	?

В табл. 1 приведены результаты подсчета таким способом времени между ускорениями и других быстрых пульсаров. Насколько наши прогнозы оправдаются и для других пульсаров, покажут дальнейшие наблюдения (параметры пульсаров R и τ взяты из работы Пайнса [45], а ω_0 и $\Delta\omega_0$ из статьи Лосена [22]).

Явление самопроизвольного ускорения имеет и самостоятельный интерес. Как было предположено Андроникашвили [46], при этом происходит фазовый переход особой, квантовой природы, когда скачком меняется постоянная вихревой решетки и число вихрей в сосуде.

Движение вихрей в неравномерно вращающейся жидкости рассматривалось сотрудниками Института физики АН Груз. ССР Красновым [47], Мамаладзе и Кикнадзе [48]. В частности Кикнадзе и Мамаладзе показали, что при замедлении вращения сверхтекучей жидкости происходит непрерывное и плавное перемещение вихрей к стенкам сосуда. При этом момент количества движения постоянно передается жидкости, а резкое его ускорение происходит при выходе к стенке группы вихрей, расположенных по периферийной окружности. Рассмотрим теперь вопрос о длительности релаксационного времени t_0 .

Процесс перераспределения момента количества движения и для модели имеет макроскопическую временную протяженность (рис. 5). Естественно, это время должно зависеть от числа вихрей (или, что то же самое, от скорости вращения ω_0), количества сверхтекучей компоненты (или отношения ρ_s/ρ), радиуса сосуда R и скачка скорости $\Delta\omega_0$. В результате тщательного исследования был получен закон изменения t_0 от всех перечисленных аргументов. Применяя методы теории размерностей, нами была получена соответствующая формула [49]:

$$t_0 = A \left(\frac{mR^2}{\hbar} \right)^2 \omega_0^{s-1} \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right)^{-s} \ln(1 + c' \Delta\omega_0),$$

где $A = 1.0 \pm 0.1$, $\beta = 0.40 \pm 0.05$, $\alpha = 0.25 \pm 0.01$, $c' = c/u_{el} = \text{const} = 5.1 \pm 0.2$, m — масса атома гелия (или пары нейтронов), $\hbar = 2\pi\hbar$ — постоянная Планка.

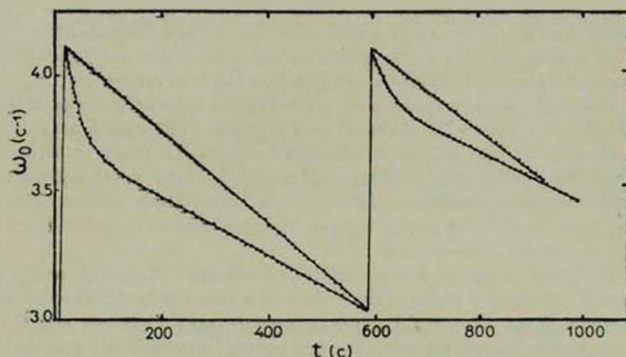


Рис. 5. Зависимость угловой скорости вращения сосуда от времени после резкого увеличения скорости вращения: верхние кривые — пустой сосуд, нижние кривые — сосуд с He II.

Если явление установления равновесия после ускорения в пульсарах происходит так же, как в сверхтекучем гелии, то эта формула должна быть справедливой и в случае пульсаров. То есть, если мы вместо радиуса сосуда, плотностей нормальной и сверхтекучей компонент, скорости вращения, массы атома гелия и величины скачка скорости подставим соответствующие пульсарам величины [50], эта формула должна дать хотя бы правильные порядки времен t_0 , известных из астрофизических наблюдений. Результаты применения этой формулы для расчета релаксационного времени в случае пульсара Крабовидной туманности, для которого известны [22] даты трех макроускорений, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Дата ускорения	Сентябрь 1969	Октябрь 1971	Февраль 1975
Параметры			
$\Delta\omega_0/\omega_0 \cdot 10^3$	9.5 ± 3.5	2.0 ± 0.2	37.2 ± 0.8
$t_0 \text{ набл. (с)}$	$(0.35 \pm 0.19) \cdot 10^4$	$(1.31 \pm 0.34) \cdot 10^4$	$(1.34 \pm 0.1) \cdot 10^4$
$t_0 \text{ выч. (с)}$	$(1.4 \pm 0.4) \cdot 10^4$	$(1.4 \pm 0.2) \cdot 10^4$	$(1.5 \pm 0.2) \cdot 10^4$

В первой строке таблицы приведены отношения скачка скорости к самой скорости для трех ускорений этого пульсара. Во второй — наблюдаемые времена релаксации, а в третьей — t_0 , рассчитанное согласно вышеприведенной формуле. Сравнение последней строки с предыдущей показывает, что при первом наблюдаемом ускорении измеренное и вычисленное время на отличаются друг от друга в несколько раз, а для ускорений сентября 1971 г. и февраля 1975 г. эти времена совпадают. Такое же удовлетворительное согласие наблюдается и для пульсара Парусов X.

Наконец, рассмотрим явление осцилляции скорости после ускорения вращения. Рудерман [23] объяснил этот феномен, привлекая к делу волны Ткаченко [51]. Еще в 1966 г. советский ученый Ткаченко теоретически показал, что в вихревой решетке сверхтекучего гелия могут распространяться упругие волны наподобие звуковых. Многолетние усилия экспериментаторов многих лабораторий были тщетны: волны Ткаченко экспериментально не были наблюдаемы.

Рудерман высказал предположение, что при ускорении вращения пульсара в вихревой решетке его нейтронной сверхтекучей жидкости возбуждается волна Ткаченко, которая, взаимодействуя с твердой корой, может то замедлять, то ускорять его вращение. Теоретический подсчет показал [23], что период этого качания скорости может быть выражен формулой

$$\theta \sim \frac{4\pi}{5} \sqrt{\frac{m}{h\omega_0}} R.$$

В этой формуле θ — частота качания скорости, ω_0 — скорость вращения, R — радиус сосуда, m — масса частицы жидкости.

В лаборатории удалось пронаблюдать и это явление. Для этого был сделан особенно легкий сосуд из тонкого оргстекла. При резком ускорении этого сосуда со сверхтекучим гелием мы каждый раз наблюдали осцилляции скорости, как это показано на рис. 6. Период этих осцилляций в точности совпадает с расчетом согласно формуле Рудермана. Таким образом, на основе двухкомпонентной модели пульсара были объяснены и причины возникновения осцилляции скорости вращения нейтронных звезд. А попутно, впервые в земных условиях, были наблюдаемы волны Ткаченко.

Кроме этих основных явлений поведение пульсара и во многих других деталях совпадает с поведением замедленно вращающейся сверхтекучей жидкости. Например, из астрофизических наблюдений известно, что перед подскоком скорости замедление пульсара происходит несколько сильнее, чем обычно [15]. В лабораторных условиях наблюдается такое же явление перед самопроизвольным ускорением. Далее, согласно теоретическим представлениям, развитым Кикнадзе и Мамаладзе [52], при торможении сверхтекучей жидкости по мере перемещения вихрей к стенкам

сосуда происходит постоянная передача момента количества движения вихрей сосуду. Этот момент тем больше, чем ниже температура. На опыте ясно наблюдается проявление этого эффекта: чем ниже температура (при других одинаковых условиях), тем меньше замедление модели.

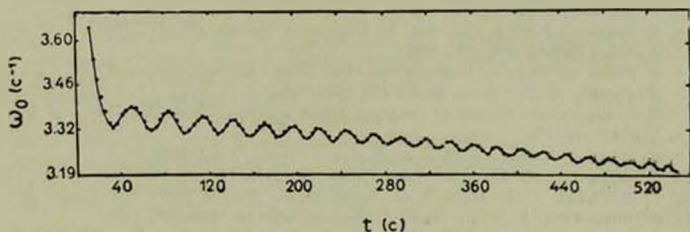


Рис. 6. Осцилляции скорости вращения сосуда с He II, возникающие после внешнего ускорения.

Таким образом, можно сказать, что эксперименты, проведенные в Институте физики АН Груз. ССР, подтверждают даже в деталях представление о сверхтекучести нейтронных звезд.

В заключение авторы благодарят Э. Л. Андроникашвили за стимулирующий интерес к работе, Ю. Г. Мамаладзе, Ю. К. Краснова, членов Объединенного низкотемпературного семинара Тбилиси и участников бакурианских семинаров по сверхтекучести за обсуждения.

Авторы благодарят В. А. Амбарцумяна и его сотрудников за предоставление возможности обсуждения основных положений работы в Бюраканской астрофизической обсерватории, за дискуссию и ценные замечания.

Авторы благодарят Д. Пайнса и Р. Паккарда за ценные предложения.

Октябрь, 1978 г.

Институт физики АН Груз. ССР

MODELLING OF THE PULSARS BEHAVIOUR IN A LOW TEMPERATURE LABORATORY

J. S. TSAKADZE, S. J. TSAKADZE

The results of experimental studies of the properties of superflow He II in a nonstationary rotation regime are given. On the basis of analysis of experimental data it has been shown that the peculiarities of rotation of pulsars (unexpected speed jumps, oscillation of angular rotating speed, long relaxing processes) can be explained on the basis of notion concerning superflow of neutron fluid in pulsars.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Hewish, S. T. Bait, T. D. H. Pilkington, P. F. Scott, R. A. Collins, *Nature*, 217, 709, 1968.
2. L. D. Landau, *Phys. Z. Sowjetunion*, 1, 285, 1932.
3. W. Baade, F. Zwicky, *Phys. Rev.*, 45, 128, 1934.
4. G. Baum, C. Pethick, D. Pines, M. Ruderman, *Nature*, 224, 872, 1969.
5. T. Gold, *Nature*, 218, 731, 1968.
6. D. Pines, T. Shuham, M. Ruderman, *IAU Simp. Bould. Colorado*, 1972.
7. A. Prettre, D. Ter Haar, *M. N.*, 146, 423, 1969.
8. И. С. Шкловский, *Звезды, их рождение, жизнь и смерть*, Наука, М., 1975, стр. 242.
9. Там же, стр. 242.
10. C. Aguirre, *J. Phys., A. Matem., Nucl. and Gener.*, 7, 12, 1974.
11. D. Richards, *IAU Astronom. Electr. Circ. No. 2114*, 1968.
12. T. G. Davils, G. C. Hunt, F. G. Smith, *Nature*, 221, 27, 1969.
13. C. Papillollos, N. P. Carleton, P. Harowitz, *Nature*, 228, 445, 1970.
14. T. Nelson, R. Hells, D. Cudobaek, T. Wampler, *Ap. J., Lett.*, 161, 235, 1970.
15. V. Radhaerishnan, R. N. Manchester, *Nature*, 222, 228, 1969.
16. P. E. Retchley, G. S. Downs, *Nature*, 222, 229, 1969.
17. P. E. Retchley, G. S. Downs, *Nature, Phys. Sci.*, 234, 48, 1971.
18. N. Manchester, W. M. Cross, P. A. Hamilton, *Nature*, 239, 291, 1976.
19. D. Pines, *Proc. of the 12-th Intern. Conf. on Low Temp. Phys., Kyoto, Japan 1970*.
20. P. E. Boyton, E. J. Groth, D. P. Hutchinson, Tr. G. P. Nanos, R. B. Partridge, D. T. Wilkinson, *Ap. J.*, 175, 217, 1972.
21. E. Lohsen, *Nature, Phys. Sci.*, 236, 70, 1972.
22. E. Lohsen, *Nature*, 258, 688, 1975.
23. M. Ruderman, *Nature*, 225, 619, 1970.
24. П. А. Кануца, *ДАН СССР*, 18, 21, 1938.
25. L. D. Landau, *J. Phys. USSR*, 5, 71, 1941.
26. Э. А. Андрикошвили, *ЖЭТФ*, 18, 424, 1948.
27. R. P. Feynman, *Proc. on Low Temp. Phys.*, North. Holland Publ. Co. Amsterdam, 1, ch. 2.
28. L. Onsager, *Nuovo Cimento*, b, Suppl., 2, 249, 1949.
29. E. L. Andronikashvili, Yu. G. Mamaladze, *Rev. Mod. Phys.*, 38, 576, 1966.
30. E. L. Andronikashvili, Yu. G. Mamaladze, *Prog. in Low Temp. Phys.*, North Holland Publ. Co. Amsterdam, v. 5, ch. 3.
31. Э. А. Андрикошвили, Р. А. Бабидзе, Дж. С. Цакадзе, *ЖЭТФ*, 50, 46, 1966.
32. Э. А. Андрикошвили, К. Б. Месога, Дж. С. Цакадзе, *ЖЭТФ*, 46, 157, 1964.
33. Э. А. Андрикошвили, Дж. С. Цакадзе, *Сообщ. АН Груз. ССР*, 20, 667, 1958.
34. Э. А. Андрикошвили, Ю. Г. Мамаладзе, С. Г. Матинян, Дж. С. Цакадзе, *УФН*, 73, 3, 1961.
35. А. Б. Мигдал, *ЖЭТФ*, 37, 249, 1959.
36. В. А. Гинабург, Д. А. Куржниц, *ЖЭТФ*, 47, 2006, 1964.
37. Дж. С. Цакадзе, С. Дж. Цакадзе, *ЖЭТФ*, 64, 1817, 1973.
38. J. S. Tsakadze, S. J. Tsakadze, *Phys. Lett.*, A41, 197, 1972.
39. Дж. С. Цакадзе, С. Дж. Цакадзе, *УФН*, 115, 503, 1975.
40. Э. А. Андрикошвили, Дж. С. Цакадзе, *Тезисы докладов V Всесоюзной конференции по физике низких температур, Тбилиси, ИФ АН Груз. ССР, 1958, стр. 3*.

41. Э. Ш. Надирашвили, Дж. С. Цакадзе, Письма ЖЭТФ, 18, 77, 1973.
42. R. E. Packard, Phys. Rev., Lett., 28, 1080, 1972.
43. M. Ruderman, Nature, 223, 593, 1969.
44. D. Pines, T. Shoham, Nature, Phys. Sci., 235, 43, 1972.
45. D. Pines, Доклад, приготовленный для 16-го Интернац. Сольвейского конгресса по физике, Брюссель, 1973.
46. Э. Л. Андроникашвили, Дж. С. Цакадзе, С. Дж. Цакадзе, Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума по фазовым переходам и критическим явлениям, Новосибирск, 1977, стр. 3.
47. Ю. К. Краснов, ЖЭТФ, 73, 348, 1977.
48. А. В. Кикнадзе, Ю. Г. Мамаладзе (в печати).
49. J. S. Tsakadze, S. J. Tsakadze, Phys. Lett., 47A, 477, 1974.
50. Сб. «Пульсары», русск. пер. под ред. В. В. Виткевича, Мир, М., 1971, стр. 19.
51. В. К. Ткаченко, ЖЭТФ, 50, 1573, 1966.
52. А. В. Кикнадзе, Ю. Г. Мамаладзе (в печати).