

ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА В НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗДАХ КАК КЛЮЧ К ФИЗИКЕ БЫСТРЫХ
РАДИОВСПЛЕСКОВ, ПУЛЬСАРОВ и ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРИНО

Ковалев Ю.А.^{1* 2}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (АКЦ ФИАН), Ленинский проспект, 53, Москва, Россия

² Институт ядерных исследований РАН, проспект 60-летия Октябрьской революции, 7а, Москва, Россия

* ykovalev@asc.rssi.ru

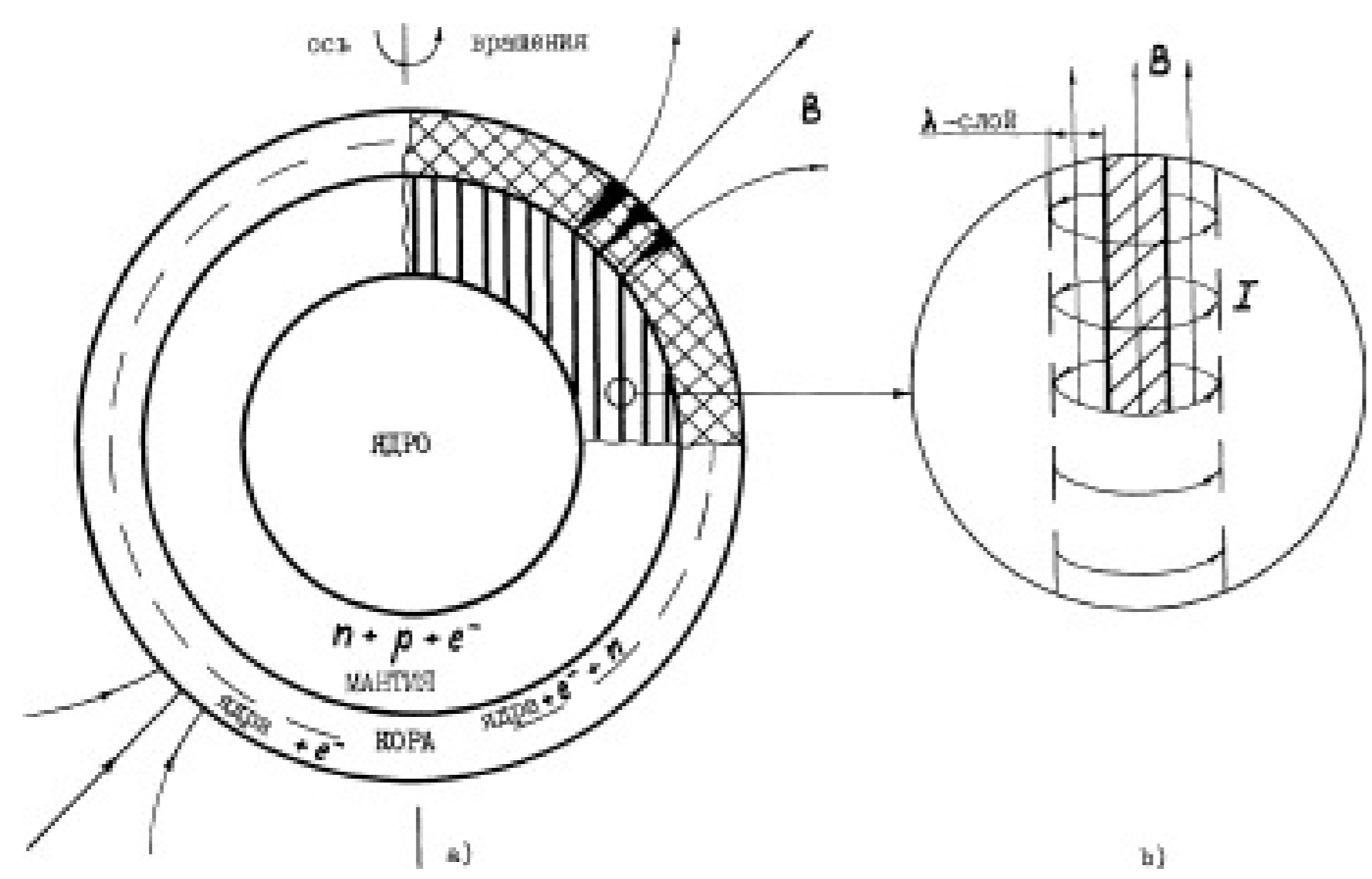


Рис. 1: Структура нейтронной звезды (а-слева) и вихревой сверхпроводящей нити с током I , магнитным полем B , нормальной сердцевинной (заштрихована) и λ -слоем с мостиками (b-справа) для сверхпроводника 2-го рода в мантии (внешнем ядре) звезды. Трещины в коре зачернены (Kovalev, 1979b).

1 Аннотация

Пульсары, быстрые радиовсплески (FRB), магнитары и источники нейтрино высокой энергии могут иметь общее происхождение, основанное на когерентном радиоизлучении Джозефсона, и быть частными случаями модели пульсара Джозефсона, предложенной много лет назад (Kovalev, 1976-1992). Тогда радиоволны генерируются внутри звезды - в пограничных слоях протонного сверхпроводника 1 или 2 рода с несверхпроводящей средой. Слои пронизаны сильным магнитным полем и токами и содержат джозефсоновские микромостики, которые при определенных условиях могут излучать на радиочастотах. Радиоволны частично поглощаются и выходят наружу вдоль магнитного поля через замагниченные трещины и разломы в коре после «звездотрясений», образуя диаграмму направленности излучения. Сечение ее дает наблюдаемые импульсы FRB, пульсара или магнитара - с нейтрино или без них - в зависимости от напряженности магнитного поля, доли поглощенного излучения, стабильности условий генерации и квазивакуумного распространения радиоволн, ускорения протонов, вращения/прецессии звезды и времени жизни трещин в коре.

2 Введение

Радиопульсары наблюдаются с 1967 года как вращающиеся нейтронные звезды (Гинзбург, 1969, 1971; Потехин, 2010), магнитары - с 1997 года. Быстрые радиовсплески изучаются с 2007 года, первое нейтрино высоких энергий было зарегистрировано в 2017 году; их происхождение пока остается неясным (Попов и др., 2018; Троицкий, 2024). Оценим возможность обобщения модели джозефсоновского пульсара на эти объекты.

3 Джозефсоновский пульсар и частные случаи

Основное условие модели: несверхпроводящие «включения» в λ -слое сверхпроводящей вихревой нити образуют «губчатую» микроструктуру «слабосвязанных» сверхпроводящих структур, подобных сверхпроводящим лабораторным микромостикам с известной электродинамикой (Асламазов и Ларкин, 1969; Кулик и Янсон, 1970); λ - глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник (Рис. 1). Теория дает критерий слабой связи. Оценки удовлетворяют ему с большим запасом (Kovalev, 1979b).

Радиоволны, частично поглотившись, ускорив поток плазмы и создав этим квазивакуумные условия распространения, поступают в трещины и через них в магнитосферу. В результате на поверхности звезды образуются «горячие радиопятна», и вблизи магнитных полюсов формируется диаграмма направленности излучения. Сечение ее лучом зрения дает наблюдаемую поляризованную структуру импульсов, которая согласуется с теоретической поляризацией волноводной моды TE_{01} радиоволн в трещине

по данным для 12 радиопульсаров (Kovalev, 1992; Larionov et al., 1996).

Ранее была построена модель пульсара Крабовидной туманности от радио до рентгеновских лучей (Kovalev, 1980). Аналогичным может быть случай магнитара: излучение протонов и электронов в рентген-гамма диапазоне происходит в трещинах, когда среднее магнитное поле перед входом в трещины составляет $\sim 10^{17}$ Гс и близко к магнитной индукции в вихревых нитях Абрикосова. Такой вариант будет в случае, когда условия близки к разрушению сверхпроводимости магнитным полем.

Модель FRB логически вытекает из модели пульсара Джозефсона, если после «звездотрясения»: 1) трещина быстро «запаивается» или 2) пучок пульсара «уходит» на длительное время от направления на наблюдателя или 3) излучение «выключается». В случае 3 за счет «скачка» тока эффект Джозефсона может «переключаться» - от нестационарного эффекта Джозефсона (когда ток $I \propto B$ через микромостик превышает критический ток Джозефсона $I_m < I$, и излучение есть) к стационарному эффекту Джозефсона (без излучения, когда II_m).

Связь «радио-нейтрино» получается благодаря двум механизмам ускорения протонов для участия в процессах рождения галактических нейтрино высоких энергий: 1) за счет поглощения джозефсоновского излучения и 2) за счет индукционного ускорения протонов в магнитной пробке.

4 Обсуждение и Выводы

1. Главный дискуссионный вопрос: верно ли предположение о «слабой сверхпроводимости» (т.е. «слабосвязанности губчатой микроструктуры» λ -слоев) для смеси бозонов (протонов) и фермионов (электронов и нейтронов) - в случае, когда среднее расстояние L между фермионами порядка или меньше длины когерентности ξ бозонов ($L/\xi \sim 1$ или $L/\xi < 1$)?

2. Это предположение основано на принципе подобия - аналогии с условиями для лабораторных джозефсоновских мостиков: L/ξ в модели пульсара и в лаборатории близки друг к другу и к условиям выше.

3. Модель джозефсоновского пульсара предполагает положительный ответ на этот вопрос. И, как показывают новые оценки, пульсары и новые источники космических импульсов (быстрые радиовсплески (FRB), магнитары, генерация галактических нейтрино высоких энергий) могут быть тогда частными случаями эффектов Джозефсона в нейтронных звездах.

4. До Джозефсона (1962) никто не думал, что два сверхпроводника, разделенные слоем диэлектрика, могут стать генератором излучения. Новым сюрпризом в лаборатории стало то, что эффект излучения сохраняется при замене диэлектрика на сверхпроводящий мостик. Фактически эффект Джозефсона в нейтронных звездах может быть «простым» обобщением лабораторных условий на космические.

БЛАГОДАРНОСТИ Автор благодарен многим коллегам за ценные стимулирующие обсуждения и замечания - ранее и теперь. Поддержано Минобрнауки в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта «Наука», грант номер 075-15-2024-541.

1. Гинзбург, В.Л., 1969, Успехи физ. наук, Т. 97, p. 601
2. Гинзбург В.Л., 1971, Успехи физ. наук, Т. 104, p. 393
3. Потехин, А.Ю., 2010, Успехи физ. наук, Т. 180, p. 1279
4. Попов, С.Б., Постнов, К.А., Пширков, М.С., 2018, Успехи физ. наук, Т. 188, p. 1063
5. Троицкий, С.В., 2024, Успехи физ. наук, Т. 191, p. 1333
6. Josephson B.D. 1962, Phys.Lett. 1, 251
7. Кулик, И.О., Янсон, И.К. 1970, Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах. «Наука»: М.
8. Асламазов, Л.Г., Ларкин, А.И. 1969, Письма в ЖЭТФ 9, 150
10. Ковалев, Ю.А., 1979a, Письма в Астрон. журн., v. 5, p. 390
11. Kovalev, Yu.A., 1979b, Astrophys.Space Sci., v. 63, p. 19
12. Kovalev, Yu.A., 1980, Astrophys.Space Sci., v. 67, p. 397
13. Kovalev, Yu.A., 1992, In: Proceedings of IAU Colloquium, T.H. Hankins (eds), Zielona Gora, Poland, No.128, p.130
14. Larionov, G.M., Kovalev, Y.Y., 1996, Astron. Astrophys. Trans., v. 11, p. 59