

Эффект Джозефсона в нейтронных звездах = Ключ к пульсарам, БРВ, магнитарам и галактическим нейтрино высоких энергий

Ю.А.Ковалев (1, 2)

(1) -- АКЦ ФИАН (ykovalev@asc.rssi.ru)

(2) -- ИЯИ РАН

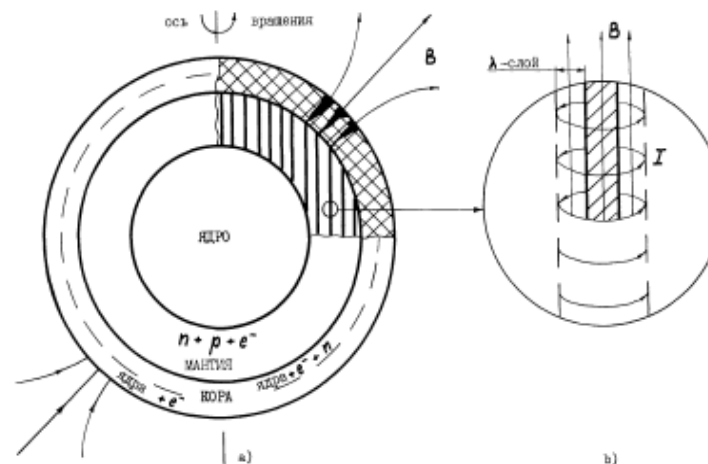
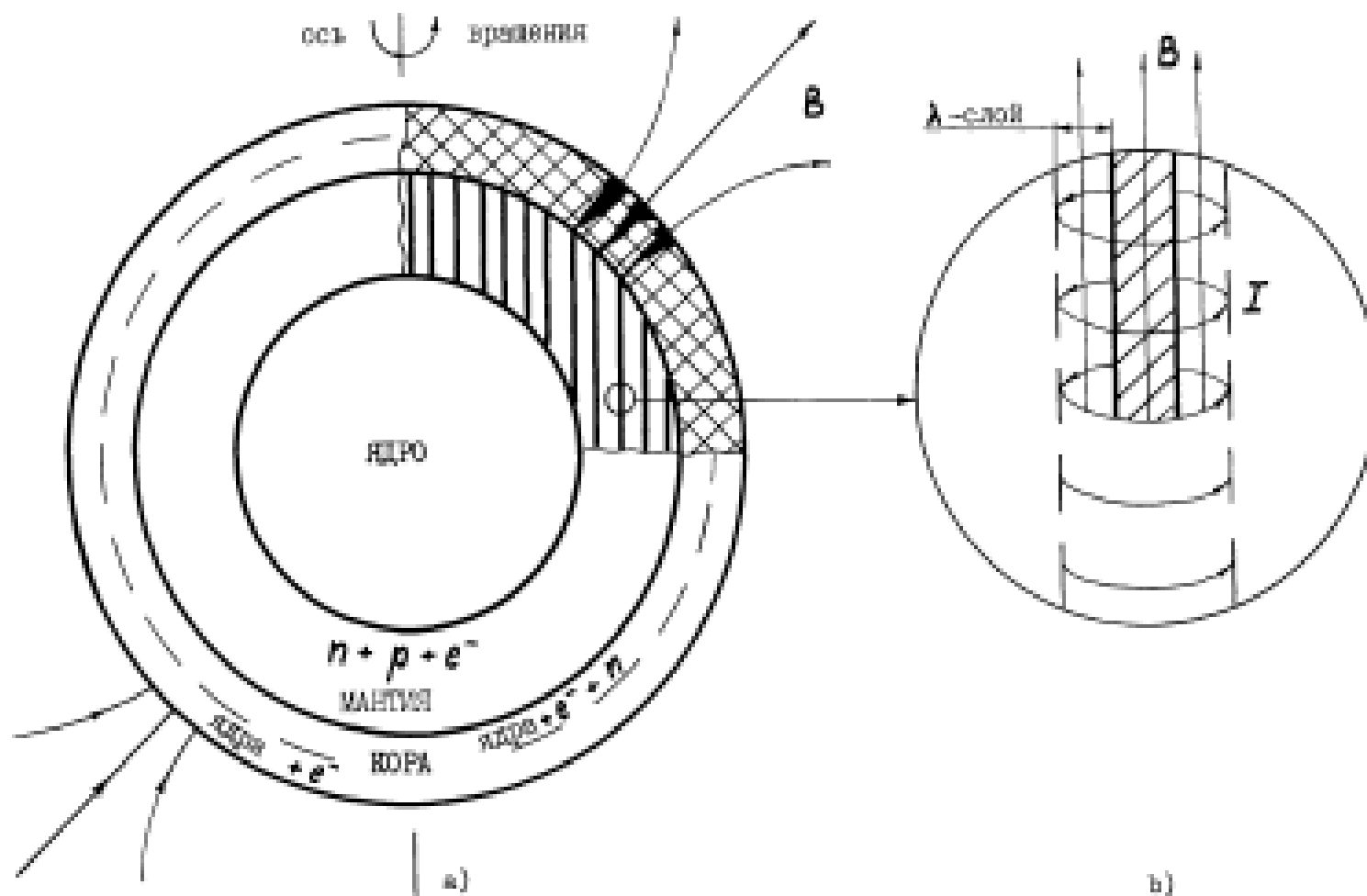


Рис.1. Строение нейтронной звезды (а) и вихревой сверхпроводящей нити -- с током $I > I_m$, магнитным полем B , нормальной сердцевинкой (заштрихована) и λ -слоем с микростиками (б-справа). Трещины в коре (а) зачернены. Возможны ~любые ориентации внутр.и внеш.поля B .



“Три Кита” модели Джозефсоновского №3 пульсара (Kovalev, 1976, 1979a,b, 1980, 1992)

1. **БЛАГОДАРЯ** эффекту Джозефсона внутри Нейтронной Звезды (под корой, в сверхпроводящем пре-слое) генерируется сильное когерентное радиоизлучение с гармоническим спектром

$$I = I_N + I_s = \sigma_M V + I_m \sin(\varphi + \tilde{\phi}), \quad V = V_0 \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} p^{n/2} \cos n\omega_0 t\right) \quad P_{\omega} = \eta_{\omega} P_0 p^{\omega/\omega_0},$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{2eV}{\hbar}, \quad \omega_0 = 2eV_0/\hbar \simeq \frac{ce}{2\pi\hbar} \frac{LB}{\lambda\sigma} \sqrt{1-\gamma^2}, \quad p = (1 - \sqrt{1-\gamma^2})^2/\gamma^2, \quad \gamma \equiv I_m/I, \quad V_0 = I\sqrt{1-\gamma^2}/\sigma_M.$$

$$\sim 3 \cdot 10^8 \sqrt{1-\gamma^2} \text{ Гц.}$$

2. Это радиоизлучение выходит наружу **БЛАГОДАРЯ:**

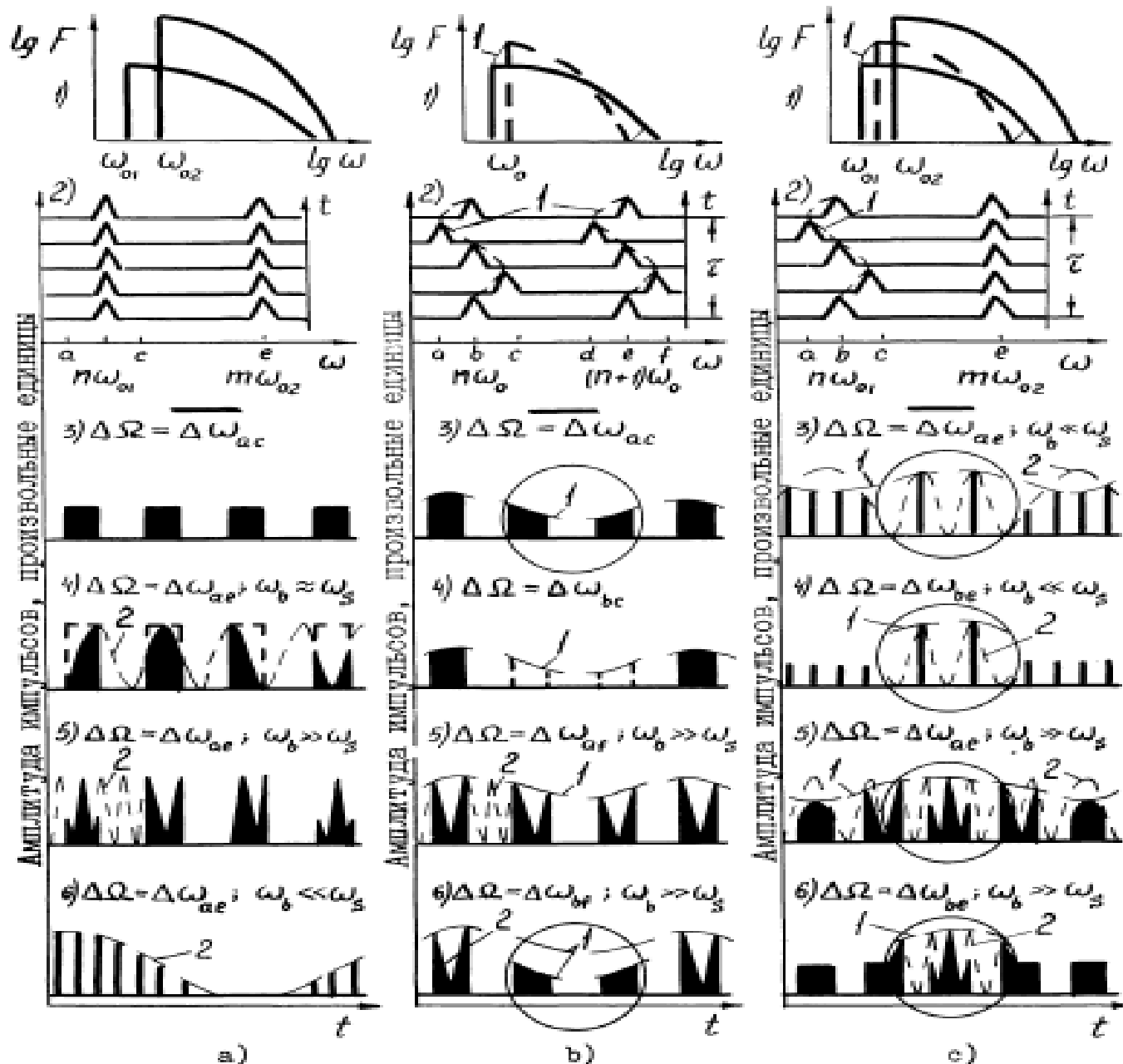
2а) “Звездотрясениям” и образованию в коре долгоживущих трещин в сильном продольном равновесном магнитном поле:

$$S(r) = \frac{\phi_T}{B(r)} \exp(-t/\tau), \quad B(r) = \max \begin{cases} B_e = \sqrt{8\pi p(r)}, \\ B_0 \end{cases}, \quad \tau = 4\pi\sigma_{\text{ef}} l^2/c^2,$$

2б) Частичному поглощению радиоволн и формированию квази-вакуумных условий распространения волн в трещинах

$$n_a \simeq 1 + a\tilde{\omega}_{0p}^2/\tilde{\omega}_{Bp}^2$$

Рис.2. Связь набл.вариаций амплитуды, структуры, периода импульсов P_s (строки 3-6) с особенностью спектра (строка 1) и его Тонкой Структурой (строка 2) для 3-х случаев а,б,с.



$$I \begin{matrix} \rightarrow & \gamma & \rightarrow & p \\ & \downarrow & & \downarrow \\ & \omega_0 & \rightarrow & P(\omega) \end{matrix} \rightarrow F_\omega \quad (14)$$

Вариации частоты и потока при вариациях тока

Излучение – когерентное, линейчатое, близкие линии от разных групп джоз.переходов дают биения. Слева они показаны пунктиром, а результаты биений зачернены.

“Ход” позиционного угла поляризации импульса №5 с долготой (градусы по осям): набл. и их модели- рование поляризацией волноводной моды TE₀₁ в трещине (Larionov-jr. & Kovalev-jr., ААТ-1996)

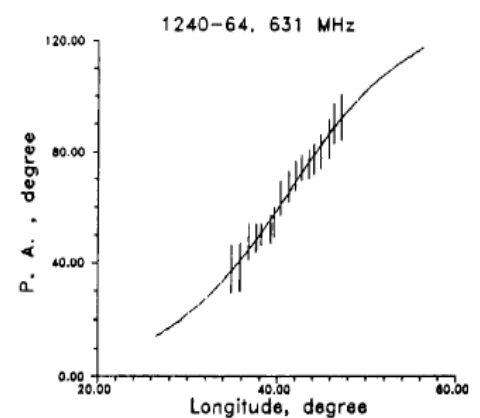
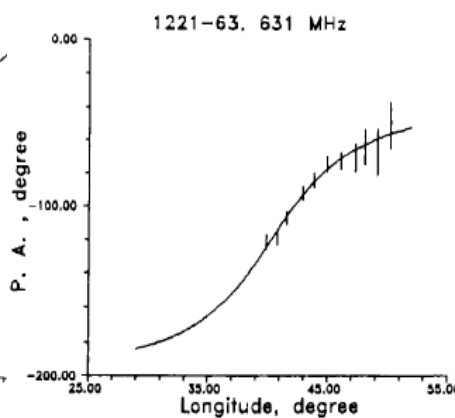
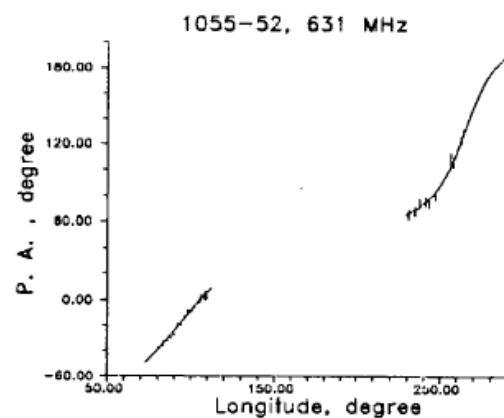
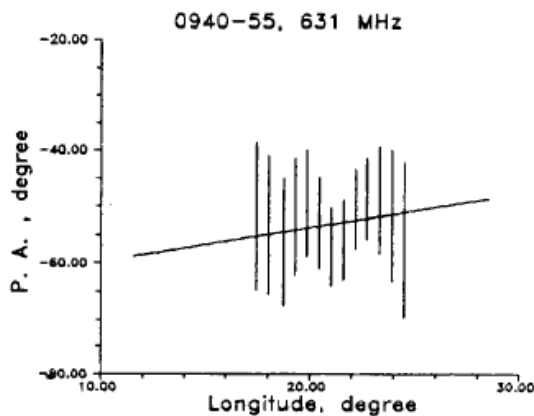
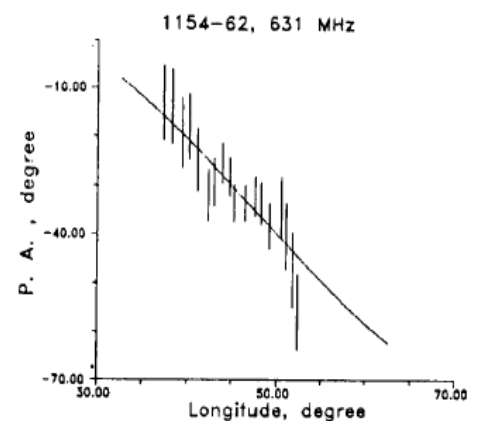
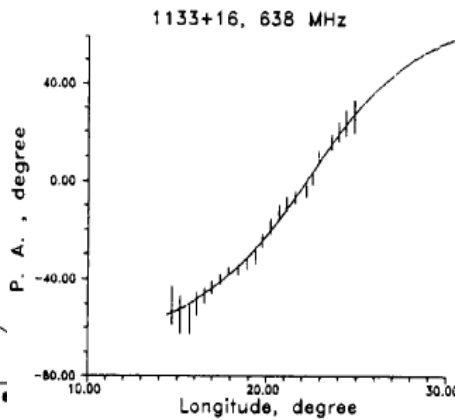
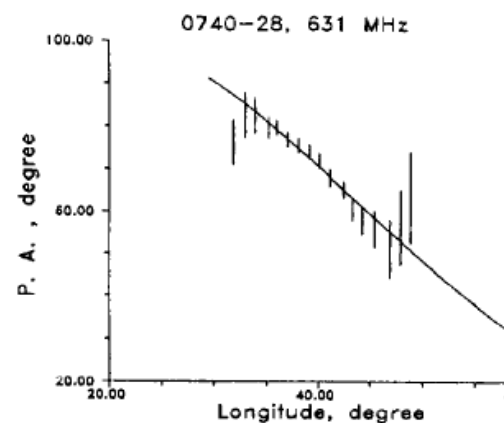
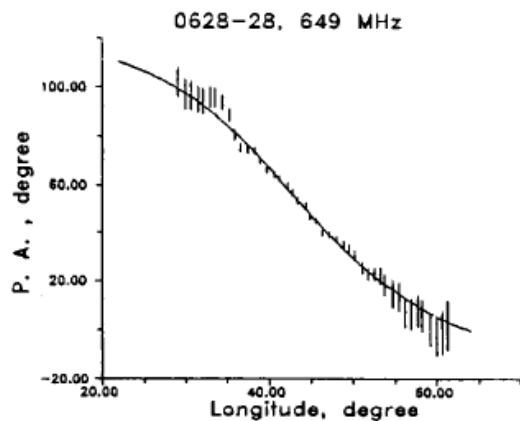


Рис. 1,а-д. Плазменный волновод-трещина в магнитном поле B_0 и образование наблюдаемого поляризованного импульса $y(x)$ как сечение круговой поляризации E_{TE} основной волноводной моды TE_{01} лучом зрения по X

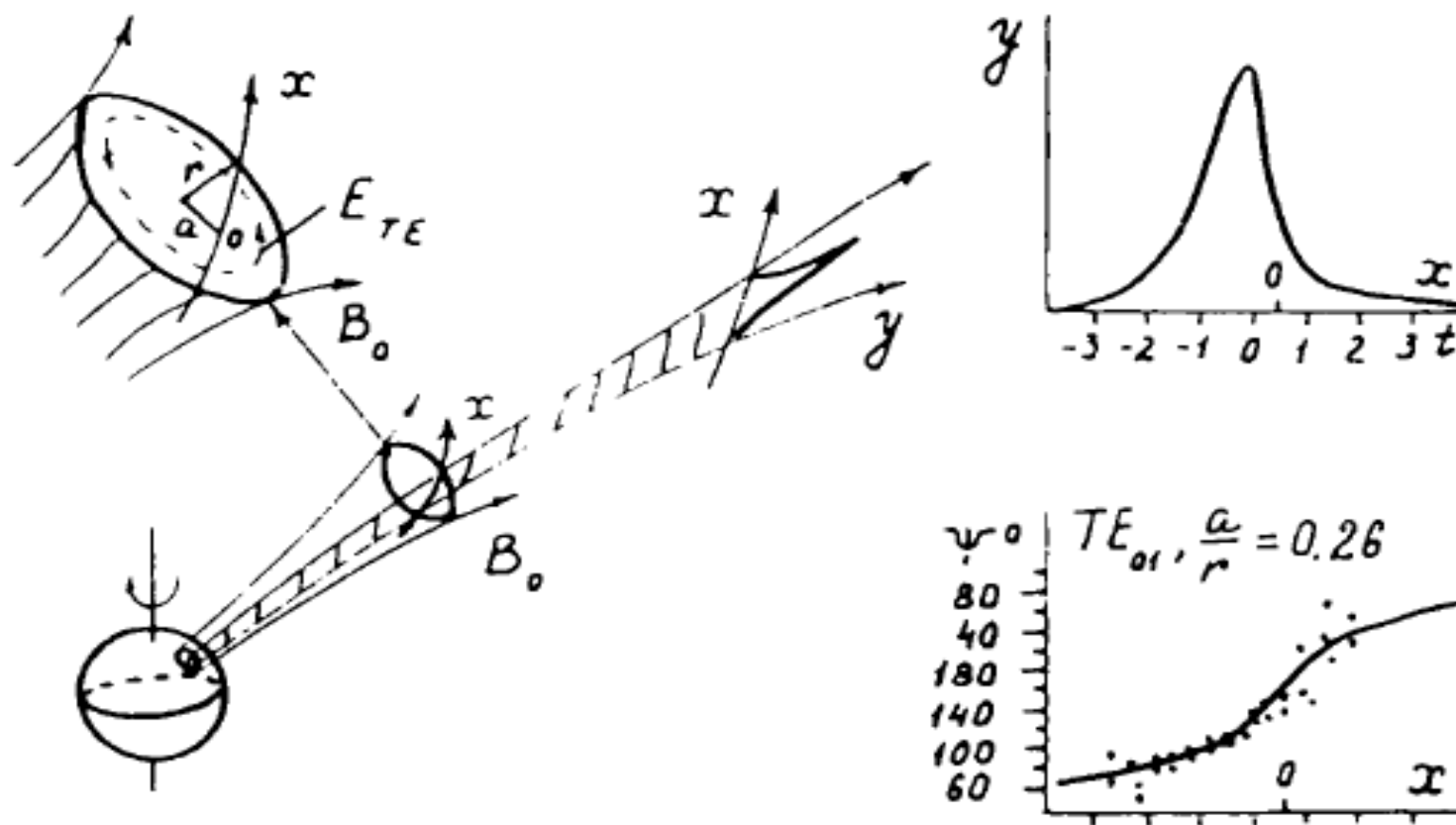


Figure 1 Magnetized plasma waveguide and polarization formation.

Рис.2. Слева: наблюдаемая и модельная поляризации №8 импульсов 4-х пульсаров в моделях джозефсоновского радиопульсара и волноводной моды TE₀₁ в трещинах . Справа: модель пульсара в Крабе от радио до гамма .

Josephson-effect mechanism for pulsar emission

131

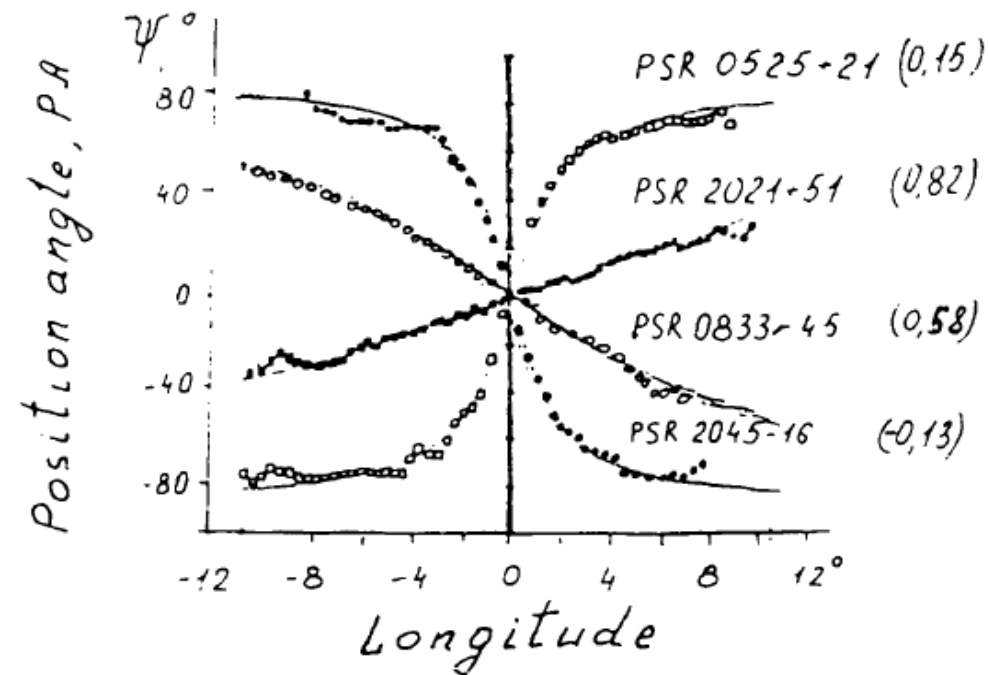


Figure 2 Results of model fitting to observed position-angle curves [eq.(1), the value of (a/r) is shown in brackets].

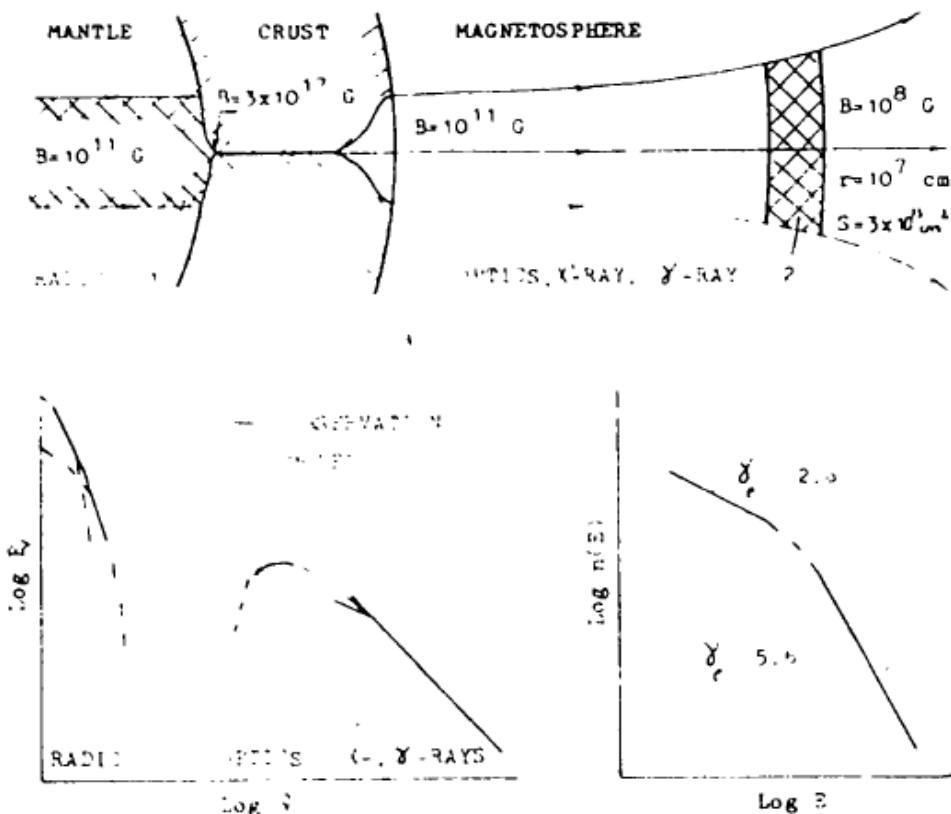


Figure 3 Crab pulsar model for the whole frequency range: a) localization of the regions of Josephson radio emission (1) and HF emission (2); b) observed and model spectra; and c) electron energy spectrum in the region of the HF emission generation.

Kovalev (ASS,1979; 1980; IAU128-1992)

1. Пульсары => Джоз.Пульсары с макс.стабильными условиями генерации радиоизлучения, РРВ в трещинах, их выхода в магнитосферу и вращения/прецессии НЗ.

Излучение генерируется внутри нейтронной звезды в “слабосвязанных” протонных сверхпроводящих структурах вихревыми токами в нитях Абрикосова. Оно частично поглощается, ускоряет частицы (минимум -- до квазивакуумных условий РРВ) и через трещины в коре вдоль сильного магнитного поля до $B \sim 2 \cdot 10^{17}$ Гс выходит из внешнего слоя ядра звезды в магнитосферу, формируя диаграмму направленности и наблюд. импульсы

2. Быстрые РадиоВсплески (БРВ-FRB)=> Джоз.Пульсары, если эти условия НЕ стабильны. В т.ч. если после «звездотрясения»:
1) трещина быстро «запаивается» или 2) прецессируя, луч пульсара надолго “уходит” от направления на наблюдателя или 3) излучение выключается или переключается на стационарный эффект Джозефсона из-за “скачка” тока I с $I > I_c$ на $I < I_c$.

3. Магнитары => Джоз.Пульсары при синхротронном и изгибном ВЧ-излучении в равновесном магнитном поле B трещин = при $10^{12} < B[\text{Гс}] < (1-3) \cdot 10^{17}$ Гс в оптике-рентген-гамма.

4. Галактические ист-ки нейтрино высоких энергий=>Джоз.Пульсары при нестабильном ускорении протонов джозефсоновскими радио-волнами + индукционным мех-мом в трещинах до энергий $E_p > 20 \cdot E_{\nu}$.

5. Главный вопрос (!): корректно ли **основное предположение** о “слабой сверхпроводимости” для смеси бозонов (пар протонов и нейтронов) и фермионов (нормальных протонов p , нейтронов n и электронов e) в нитях H_3 ? Фермионы (n , e) возмущают волновую ф-цию Δ пар протонов, образуя джозефсоновские переходы с $\Delta(r)$: $\Delta(r) = \Delta_0 \cdot f(r) \exp(i\phi_1) + \Delta_0 \cdot (1-f(r)) \exp(i\phi_2)$ [6].

При этом:

- 1) выполняется известный критерий слабой связи,
- 2) среднее расстояние L между фермионами порядка или меньше длины когерентности ξ бозонов, 3) типы джоз.переходов в лаборатории и в H_3 –аналогичны (SIS, SNS, мостик).

Это предположение основано на принципе подобия:

- 1) отношение $L/\xi \sim 1$ в модели H_3 и лаборатории близки,
- 2) типы “слабых связей” (переходов Джозефсона) – в Нейтронных Звездах и в земных лабораториях – подобны,
- 3) за последние 10 лет получен и исследуется в лабораториях “внутренний эффект Джозефсона” с излучением в несколько СОТЕН внутренних переходов Джозефсона в терагерцовом диапазоне, что близко к действующей лабораторной модели Джозефсоновского пульсара.

=> Джозефсоновский пульсар из вчерашней “экзотики” превращается сегодня в реальную модель и механизм космического излучения (аналогично мазерам).

1. Попов С.Б., Постнов К.А., Пширков М.С. УФН 188 1063 (2018)
2. Троицкий С. В. УФН 191 1333 (2021)
3. Josephson B. D. Phys.Lett. 1 251 (1962)
4. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, Т. 3 (М: Мир, 1976)
5. Кулик И.О., Янсон И.К. Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах (М: 1977)
6. Асламазов Л.Г., Ларкин А.И. Письма в ЖЭТФ 9 150 (1969)
7. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников 2-е изд., испр. и доп. (М.: 2000)
8. Гинзбург В.Л., Андрюшин Е.А. Сверхпроводимость 2-е изд. (М.: Альфа-М., 2006)
9. Ковалев Ю.А. в IX-я Всесоюзная конференция по галактической и внегалактической радиоастрономии, Тезисы докладов (изд. ИРЭ АН УССР: Харьков, 1976; стр. 64),
Препринт No.326 (Москва: ИКИ АН СССР, 1977)
10. Ковалев Ю.А. Письма в Астрон.журн. 5 390 (1979a)
11. Kovalev Yu.A. Astrophys. Space Sci. 63 19 (1979b)
12. Kovalev Yu.A. Astrophys. Space Sci. 67 397 (1980)
13. Kovalev Yu.A., in the Magnetospheric Structure and Emission Mechanisms of Radio Pulsars, Proc.IAU 128 (Ed. Hankins T.H., Rankin J.M., Gil J.A.) (Zielona Gora: Poland, 1992) p.130
14. Гинзбург В. Л. УФН 97 601 (1969)
15. Гинзбург В.Л. УФН 104 393 (1971)
16. Ларионов Г.М., Ковалев Ю.Ю., в XXV Радиоастрономическая конференция Ред. В А Извекова (Пушино: Пушкинский науч. центр, 1993; с.118-120)
17. Larionov G.M., Kovalev Y.Y. Astron Astrophys Trans 11 59 (1996)
18. Ruderman M. Nature 223 (1969)
19. Бисноватый-Коган Г.С., Куликов Ю.Н., Чечеткин В.М. Астрон. Журн 53 975 (1976)
20. Брук Ю.М, Кугель Л.И. Астрофизика 12 351 (1976)
21. Потехин А.Ю. УФН 180 1279 (2010)
22. Каплан С.А., Цытович В.Н., Плазменная астрофизика (М.Ж Наука, 1972)
23. Суворов Е.В., Чугунов Ю.В. Астрофизика 11 305 (1975)
24. Kovalev Yu.A . et al. in The Multifaceted Universe: Theory and Observations – 2022 PoS(MUTO2022)
25. McCulloch P.M. et al. Mon.Not. R. Astron. Soc. 183 645 (1978)
26. Бескин В.С. УФН 188 377 (2018)
27. Чарикова Т.Б. и др. УФН 194 740 (2024)

Пульсары, Быстрые РадиоВсплески (БРВ-FRB), магнитары и галактические источники нейтрино высоких энергий могут иметь общее происхождение благодаря когерентному радиоизлучению Джозефсона и быть частным случаем модели джозефсоновского пульсара, предложенной ранее.

Излучение генерируется внутри нейтронной звезды в “слабосвязанных” протонных сверхпроводящих структурах вихревыми токами в нитях Абрикосова. Оно частично поглощается, ускоряет частицы и через трещины в коре вдоль сильного магнитного поля выходит из внешнего слоя ядра звезды в магнитосферу, формируя диаграмму направленности и наблюдаемые импульсы. Размеры излучающих “слабых связей” относительно длины когерентности -- порядка единицы, как в лаборатории. Терагерцевые излучающие структуры в “лабораторных слоистых высокотемпературных сверхпроводниках с внутренним эффектом Джозефсона” и в “вихревых нитях нейтронных звезд” --- подобны, что близко к экспериментальному подтверждению излучения Джозефсона в космосе, аналогично космическим мазерам.