

# АНАЛОГИ РЕЗОНАТОРА ЗЕМЛЯ-ИОНОСФЕРА В ТЕОРИЯХ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ

## ANALOGUES OF THE EARTH-IONOSPHERE RESONATOR IN THE THEORY OF PULSAR RADIO EMISSION

В.М. Конторович<sup>1,2</sup>

Радиоастрономический институт НАН Украины<sup>1</sup>  
Адрес: 4, ул. Краснознаменная, Харьков, 61002, Украина  
Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина<sup>2</sup>  
Адрес: 4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина, e-mail [vkont1001@yahoo.com](mailto:vkont1001@yahoo.com)

V.M. Kontorovich<sup>1,2</sup>

Institute of Radio Astronomy NASU<sup>1</sup>  
Address: 4 Chervonopraporna Str., Kharkiv, 61002, Ukraine,  
Kharkiv National V. N. Karazin University<sup>2</sup>  
Address: 4, Svobody square, Kharkiv 61077, Ukraine, e-mail [vkont1001@yahoo.com](mailto:vkont1001@yahoo.com)

Павел Викторович Блюх (далее ПВ) не только занимался шумановскими резонансами, но и написал о них вместе со своими учениками первую в мировой литературе монографию [1]. Для дальнейшего важно, что эти низкочастотные колебания в резонаторе Земля-Ионосфера возбуждаются грозами.

Идеи ПВ оказали влияние на наши попытки понять природу радиоизлучения пульсаров. Пульсары – намагниченные нейтронные звезды. Их оптическое, рентгеновское и гамма-излучение естественно объясняется тем, что при вращении звезды в магнитном поле  $B \approx 10^{12}$  Гс возникает сильное электрическое поле. В области над полярной шапкой – внутреннем полярном зазоре – оно эффективно ускоряет заряженные частицы до очень больших энергий (гамма фактор  $\Gamma \approx 10^7$ ). Такие частицы в искривленном магнитном поле звезды излучают жесткие гамма кванты, которые, пересекая силовые линии магнитного поля, рождают электрон-позитронные пары и создают магнитосферу пульсара. Жесткое излучение пульсара в принципе объясняется этими процессами.

При объяснении наблюдаемого радиоизлучения, однако, возникают трудности, не преодоленные до настоящего времени. Это излучение должно быть когерентным, иначе невозможно объяснить высокие яркостные температуры. Наиболее популярные идеи – генерирование волн в магнитосферной плазме, пронизываемой пучками, – не дают возможности количественного описания всех наблюдаемых свойств радиоизлучения, в том числе, так называемых гигантских импульсов (ГИ).

Аналогия с резонатором Земля-Ионосфера позволяет рассматривать внутренний зазор над полярной шапкой под магнитосферой открытых силовых линий как резонатор [2,3], возбуждаемый разрядами, возникающими при ускорении частиц. При этом получает объяснение т.н. «карусель» субимпульсов [2], а также естественно объясняются все основные свойства ГИ: высокая плотность энергии, сравнимая с плотностью энергии магнитного поля у поверхности звезды, наносекундные длительности микроструктуры ГИ, корреляция по фазе с возможными местами выхода излучения из зазора, наличие существенной круговой поляризации [3,4].

От обычного резонатора внутренний зазор, тем не менее, существенно отличается тем, что его «верхняя стенка» – граница с магнитосферой – является прозрачной. Дисперсионные свойства релятивистской замагниченной плазмы, заполняющей магнитосферу, таковы, что не существует обрезания спектра электромагнитных волн на низких частотах. Обеспечить непрозрачность могла бы только андерсеновская локализация магнитосферной плазмы [3], что является весьма проблематичным.

Однако даже при прозрачной верхней стенке «зазор» оказывается заполненным мощным радиоизлучением за счет излучения электронов при их продольном ускорении в зазоре. Характер изменения с высотой электрического поля в зазоре при свободном выходе электронов из звезды таков, что оно (линейно на малых высотах) нарастает от нуля на поверхности вглубь зазора. При этом ускорение проходит через максимум, а практически все излучение электронов попадает в радио диапазон и в состоянии обеспечить наблюдаемую мощность радиопульсара [5,6].

Чрезвычайно важным является ограничение возникающего излучения по частоте. Для Пушинской выборки сильных пульсаров это проявляется в виде высокочастотного излома спектра на частоте

$\bar{\nu}_{cf} = 1.4 \cdot 10^9 \text{ Hz} \sqrt{1s/P}$  [7,8] (черта над частотой означает здесь наблюдаемое значение). Данный механизм подтверждает эту зависимость частоты излома от периода пульсара  $P$  и предсказывает зависимость частоты излома от магнитного поля  $\nu_{cf} = \sqrt{2} \cdot 10^9 \text{ Hz} \sqrt{(1s/P) \cdot B / (2 \cdot 10^{12} \text{ G})}$  [5]. Отсюда следует **принципиальная возможность определения величины магнитного поля в радиопульсарах**, что до сих пор осуществлялось косвенно по потерям, которые предполагались магнито-дипольными, а это далеко не всегда реализуется в пульсарах.

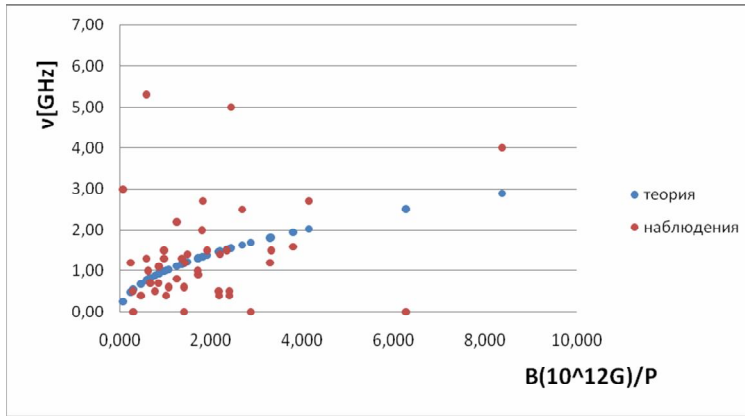


Рис.1. Зависимость частоты излома от отношения магнитного поля к периоду (С.А.Волокитин. Дипломная работа. ХНУ им. В.Н.Каразина. 2012)

Связь высокочастотного излома  $\nu_{cf}$  и низкочастотного завала спектра  $\nu_{tr}$  [8] для Пушинской выборки  $\bar{\nu}_{tr} = 0.1 \bar{\nu}_{cf}$  [7,8] играет принципиальную роль и в рассматриваемом нами механизме она приобретает вид  $\nu_{tr} = \sqrt{2} \nu_{cf} / (\pi \cdot \ln(2c/V_T))$ , что объясняется особенностями ускорения частиц в зазоре [9,10].

Действительно, для многих астрофизических объектов, в том числе внегалактических источников, частота завала определяется действием диссипативных механизмов либо специфической плазменной дисперсией. В интересующем нас случае пульсаров эти механизмы не могут иметь места. В то же время, соотношение между частотами завала и излома спектра подсказывает, что за низкочастотный завал должен быть ответственен тот же механизм ускорения, который приводит к высокочастотному излому. Рассматривая время ускорения как функцию гамма-фактора в области линейно нарастающего с координатой электрического поля  $E$  ( $\Gamma_0$  – начальный гамма-фактор электрона,  $c$  – скорость света)

$$t(\Gamma) = \frac{1}{2c\sqrt{a}} \int_{\Gamma_0}^{\Gamma} d\Gamma \frac{\Gamma}{\sqrt{(\Gamma - \Gamma_0)(\Gamma^2 - 1)}},$$

где  $a \propto E_0$ , легко убедиться, что интеграл расходится логарифмически на нижнем пределе при  $\Gamma_0 \rightarrow 1$ . Это означает, что электрону с нулевой начальной скоростью в нарастающем от нуля электрическом поле требуется логарифмически бесконечное время, чтобы достичь конечных скоростей. Поэтому наличие начальных (например, тепловых) скоростей у электронов становится принципиально важным. В этой расходимости и кроется, по нашему мнению, причина низкочастотного завала. Наличие временной ступеньки, которую необходимо преодолеть электрону, является основной особенностью его движения, приводя к указанной выше связи между частотами [9]. В то же время, те электроны, которые случайным образом обладают повышенной начальной скоростью (за счет тепловых флуктуаций), либо оказываются в ненулевом ускоряющем поле на поверхности (за счет флуктуаций электрического поля), эту ступеньку преодолевают быстрее. В результате должны образовываться электронные струи, напоминающие пробой и разряды в вакуумном зазоре [11], но имеющие другую физическую причину.

Радиоизлучение выходит из зазора через волноводы, которыми служат малая окрестность магнитной оси и слот — щель на границе открытых силовых линий, а также просачивается через магнитосферную плазму. Непосредственным проявлением мощных колебаний в зазоре могут служить ГИ (см. обзор и ссылки в [4]). Энергия, высвечиваемая при ГИ, определяется плотностью энергии колебаний в зазоре и параметрами просветов в магнитосферной плазме. Наблюдаемая локализация фазы ГИ с этой точки зрения может быть связана с излучением через эти волноводы. Если фаза соответствует «краю» среднего

импульса, то это, скорее всего, излучение через слот. Если фаза ГИ расположена внутри среднего профиля (B0531+21) — это излучение через волновод вблизи от магнитной оси. Край может быть как запаздывающим по сравнению со средним профилем (B1937+21), так и опережающим (J1823-3021A). Это может соответствовать заднему или переднему краям слота в сечении диаграммой телескопа.

Отметим, что полная мощность, излучаемая на релятивистской стадии движения в узком абберационном конусе вдоль направления движения электрона, при продольном ускорении по порядку величины совпадает с мощностью, излучаемой на субрелятивистской стадии движения. Чрезвычайно малая длительность некоторых ГИ – до нескольких наносекунд [12] – свидетельствует в пользу того, что они могут возникать при разрядах в зазоре в процессе ускорения первичных электронов до гамма-факторов порядка  $10^7$ . Действительно, релятивистская абберация в первичном пучке сужает раствор конуса излучения до углов порядка  $\delta\varphi \sim 10^{-7}$ , а вращение с миллисекундными периодами  $P$  приводит в этом случае к наносекундным длительностям импульса  $\delta t \approx \delta\varphi \cdot P / 2\pi$ . Это объяснение согласуется с тем, что ГИ наблюдаются именно в быстро вращающихся пульсарах и говорит в пользу возникновения ГИ на релятивистской стадии излучения электронных струй в зазоре.

Наблюдаемая круговая поляризация ГИ [12] также естественно объясняется особенностями пробоя в зазоре. Кулоновское поле расталкивания в разряде создает радиальное электрическое поле, что в магнитном поле пульсара приводит к вращению струи разряда и круговой поляризации генерируемых им волн. Двумерный характер поля приводит к постоянной циркуляции скорости в этом вихре, напоминая известные смерчи, но имеющие чисто электродинамическое происхождение [13]. Возможно, такая структура могла бы объяснить частотные полосы, наблюдаемые в спектре ГИ.

Представление о смене механизмов излучения в области высокочастотного излома спектра позволяет объяснить исчезновение главного импульса PSR B0531+21 на частотах вблизи 8 ГГц при одновременном усилении интеримпульса [14]. Действительно, на низких частотах основной вклад и в импульс, и в интеримпульс вносит излучение в зазоре при продольном ускорении субрелятивистских электронов. На частоте излома спектра это излучение обрывается и остается излучение только за счет низкочастотного хвоста узконаправленного абберационного релятивистского механизма (см. схему в [15,16]), растущего с частотой. Это излучение попадает в окно интеримпульса, но не главного импульса, поэтому главный импульс исчезает на частотах, близких к частоте излома спектра [15,16], а интеримпульс усиливается.

Таким образом, аналогия внутреннего зазора в пульсарах с резонатором Земля–Ионосфера оказывается полезной при объяснении широкого круга явлений, наблюдаемых в радиоизлучении пульсаров.

#### Литература

- [1] П.В. Блюх, А.П. Николаенко, Ю.Ф. Филиппов, Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля-Ионосфера, Наукова Думка, Киев, 1977, 200 с.
- [2] M.D.T. Young, A Resonant-Mode Model of Pulsar Radio Emission, astro-ph/0310411
- [3] V.M. Kontorovich, On high brightness temperature of pulsar giant pulses, astro-ph/0911.3272
- [4] В.М. Конторович, Гигантские импульсы пульсаров. ВАНТ, №4 (68), с.143-148, 2010.
- [5] V.M. Kontorovich, A.B. Flanchik, High-frequency cut-off of spectrum and change in the mechanism of radio emission in pulsars. ArXiv: astro-ph/1201.0261
- [7] V.M. Malofeev, Pulsar Radio Spectra. ASP Confer. Series, Vol. 105, p. 271-277, 1996.
- [8] И Ф. Малов, Радиопульсары, Наука, Москва, 2004, 192 с.
- [9] В.М. Конторович, А.Б. Фланчик, О связи частоты максимума в спектре излучения пульсара с частотой высокочастотного излома спектра, [http://www.prao.ru/conf/29\\_conf/registration/docs.php](http://www.prao.ru/conf/29_conf/registration/docs.php)
- [10] В.М. Конторович, А.Б. Фланчик, Теория радиоизлучения во внутреннем зазоре и корреляция с гамма-излучением в пульсарах. <http://hea.iki.rssi.ru/d/conf/2011/hea/talk/77/>
- [11] В.С. Бескин. Осесимметричные стационарные течения в астрофизике. М.: Физматлит. 2006.
- [12] T.H. Hankins, J.S. Kern, J.C. Weatherall & J.A. Eilek, Nanosecond radio bursts from strong plasma turbulence in the Crab pulsar, Nature, Vol. 422, p. 141-143, 2003.
- [13] В.М. Конторович, Электромагнитный смерч в вакуумном зазоре пульсара. ЖЭТФ, Т. 137, №6, с. 1107, 2010.
- [14] D. Moffett, T. Hankins, Multifrequency radio observations of the Crab pulsar, Astrophys.J., Vol. 468, 779-783, 1996.
- [15] V.M. Kontorovich, Disappearance of main pulse of Crab pulsar as a result of change mechanisms of radio emission, JENAM 2011, Book of abstracts, p. 70, 2011.
- [16] V.M. Kontorovich, A.B. Flanchik, Low-frequency radio emission with acceleration of electrons in a polar gap of a pulsar, <http://www.ioffe.ru/astro/NS2011/index.html>