

Почему так разительно отличается микроструктура главного импульса и интеримпульса пульсара в Крабе?

Виктор Конторович <vkont1001@gmail.com>

Радиоастрономический институт НАНУ, ул. Искусств 4, Харьков, 61002, Украина
Харьковский национальный университет им. В.Н.Каразина, пл. Свободы 4, Харьков, 61022

Микроструктура ГИ

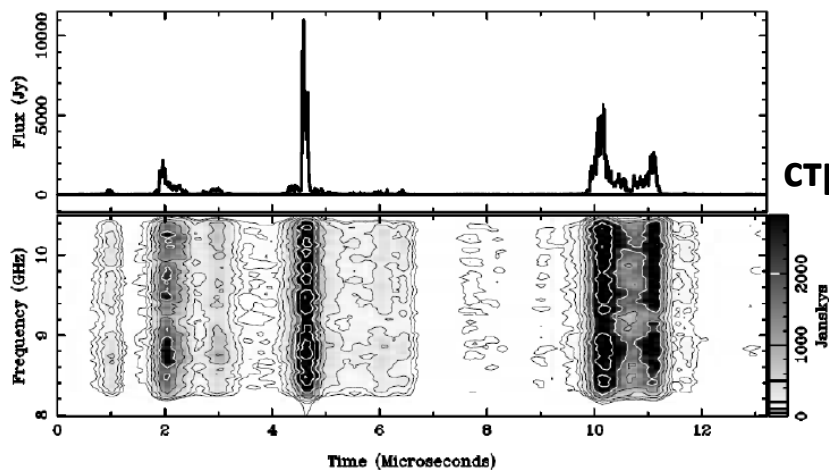


Figure 3: The vertical stripes in the MP microstructure in the frequency range 8 – 10 GHz from [3].

Микроструктура ИИ

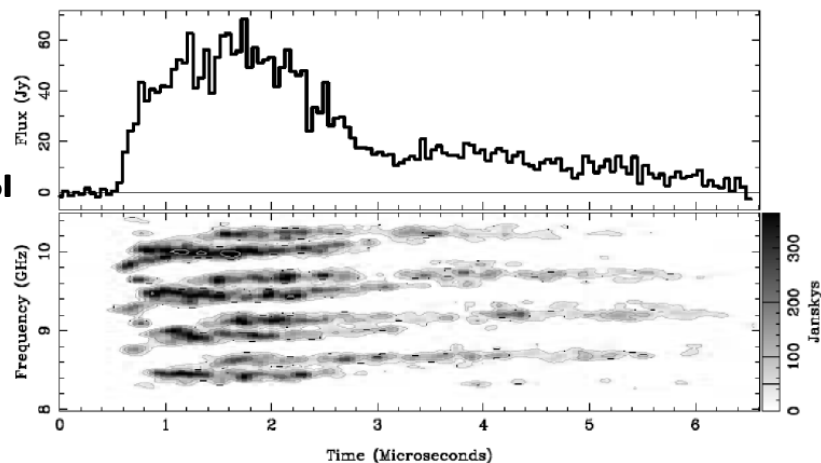


Figure 4: The horizontal stripes in the IP microstructure in the frequency range 8 – 10 GHz from [3].

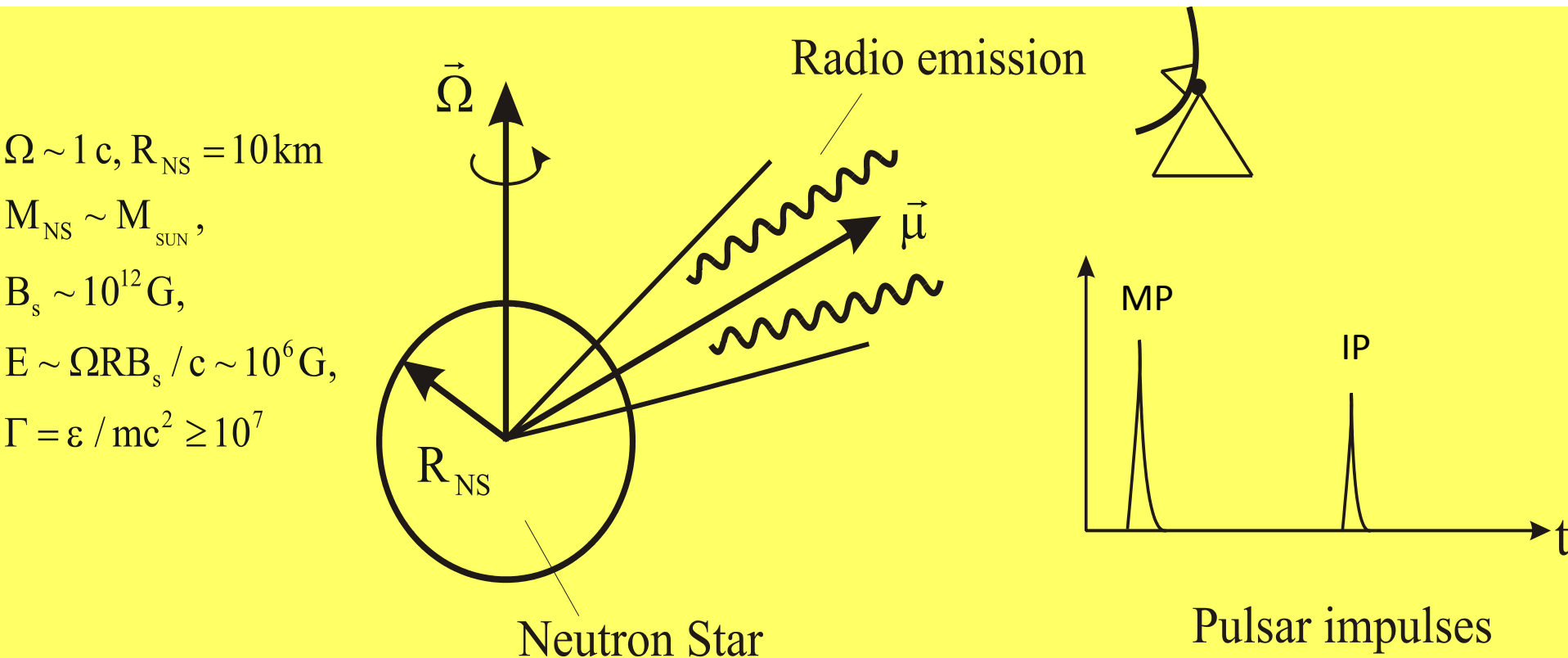
T. H. Hankins, & J. A. Eilek. *Astrophys. J.* **670** (2007) 693–701.

С благодарностью авторам

**ГИ – ‘вертикальные’ структуры ИИ – ‘горизонтальные’ структуры
в том же диапазоне частот 8-10 ГГц**

Пульсары – замагниченные нейтронные звёзды

Пульсары представляют собой замагниченные нейтронные звёзды, они не разрешаются современными радиотелескопами и изучаются только по излучению, исходящему из областей магнитных полюсов. Это узконаправленное излучение благодаря вращению принимается в виде импульсов. В небольшом числе пульсаров, где магнитная ось почти ортогональна оси вращения (простейшая гипотеза), наблюдаются импульсы от обоих полюсов – (главный) импульс (ГИ) и интеримпульс (ИИ). К таким объектам относится в первую очередь пульсар в Крабовидной туманности, наблюдавшийся на многих частотах электромагнитного спектра.



What Makes the Crab Pulsar Shine?

J. A. Eilek and T. H. Hankins

New Mexico Tech, Socorro NM, USA

RADIO EMISSION SIGNATURES IN THE CRAB PULSAR

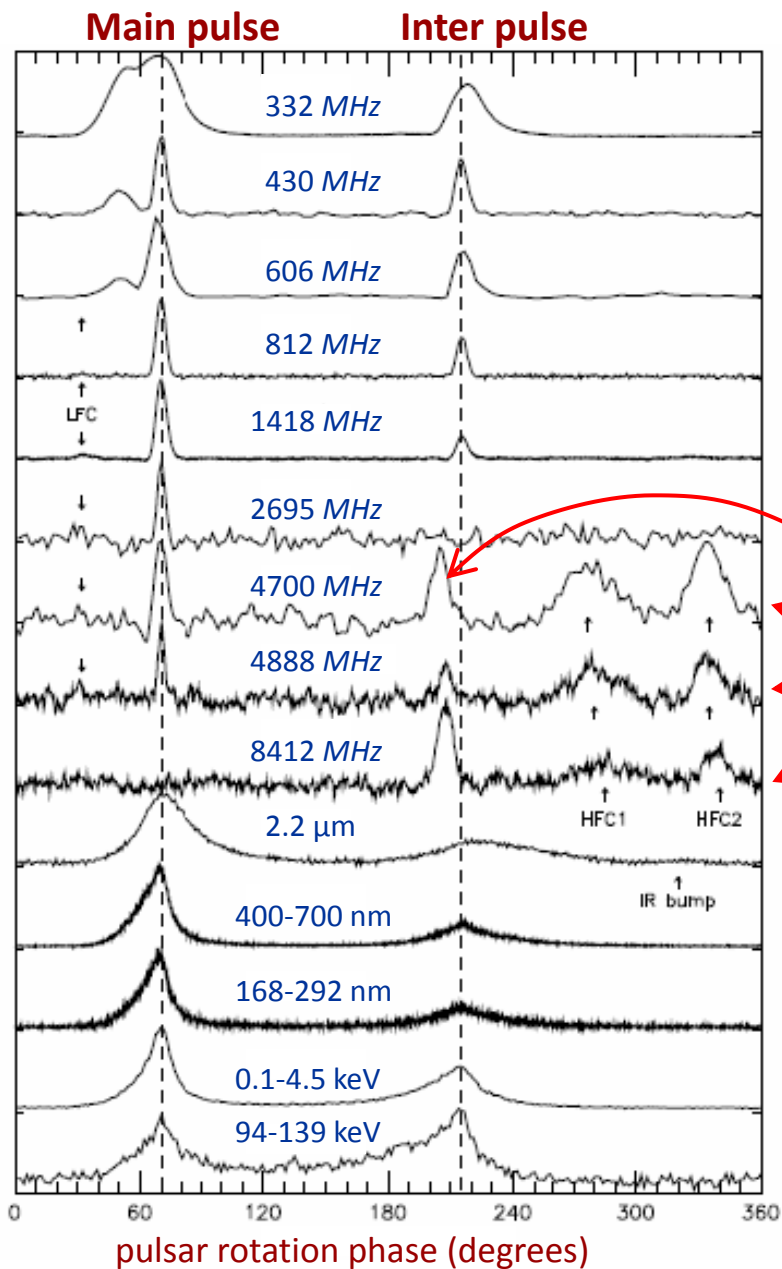
T. H. Hankins J. A. Eilek

Astrophys.J. **670** (2007) 693

В замечательной работе [Хэнкинса и Айлек](#) было обнаружено (к удивлению самих авторов) * разительное отличие спектров ГИ и ИИ пульсара в Крабе в сантиметровом диапазоне длин волн при микросекундном разрешении. В частности, в спектрах ГИ наблюдался широкий диапазон частот, образующий «вертикальные структуры», в то время как в спектрах ИИ на тех же частотах наблюдались «горизонтальные структуры» с выделенными частотами. Такое различие, связанное с различием механизмов излучения (нерелятивистское излучение электронов в продольном ускоряющем поле (ГИ) и релятивистское излучение позитронов за счёт кривизны магнитных силовых линий (ИИ)), находит объяснение, как мы покажем ниже, в смене нерелятивистского механизма на релятивистский при возрастании частоты. Причём частоты, на которых происходит смена механизма, отличаются для ГИ и ИИ. Частота наблюдения в работе Хэнкинса и Айлек как раз лежит между этими частотами, с чем и связано различие в микроструктуре. В свою очередь, вертикальные структуры ГИ, как показано авторами, являются наложением наноимпульсов с длительностями в несколько наносекунд. Авторы связали их с коллапсом волн в развитой плазменной турбулентности. Мы предлагаем альтернативный ответ, непосредственно связанный с ускорением частиц продольным электрическим полем вблизи поверхности пульсара, которое ответственно за излучение ГИ.

*“In traditional pulsar models... the MP and IP should be the same in their observable quantities (such as spectrum, time signature, or dispersion). We were—and remain—quite surprised that this turns out *not* to be the case in the Crab pulsar.” From J. Eilek and T. Hankins *ApJ* 2007 .

Загадки излучения пульсара в Крабе

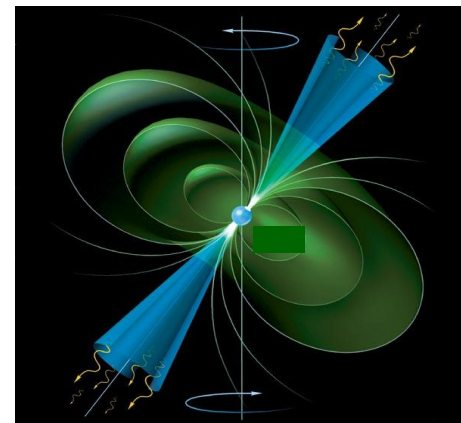
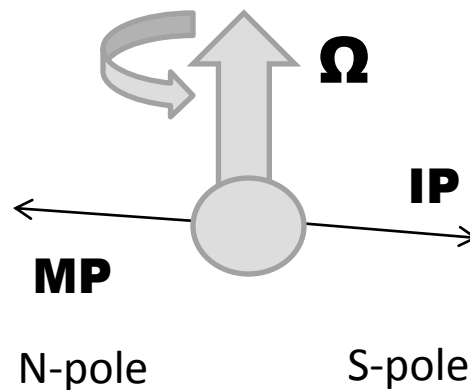
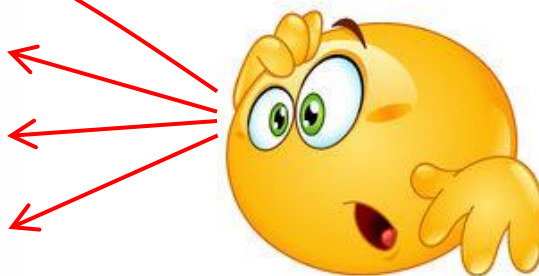


D. Moffett, T. Hankins // Astrophys. J., 1996

By Courtesy of the Authors

20 лет спустя:

T.H. Hankins, G. Jones, J.A. Eilek // arXiv:1502.00677v1, ApJ 802, 130 (2015)



Пульсар в Крабе. Средние импульсы

D. Moffett, T. Hankins, 1996

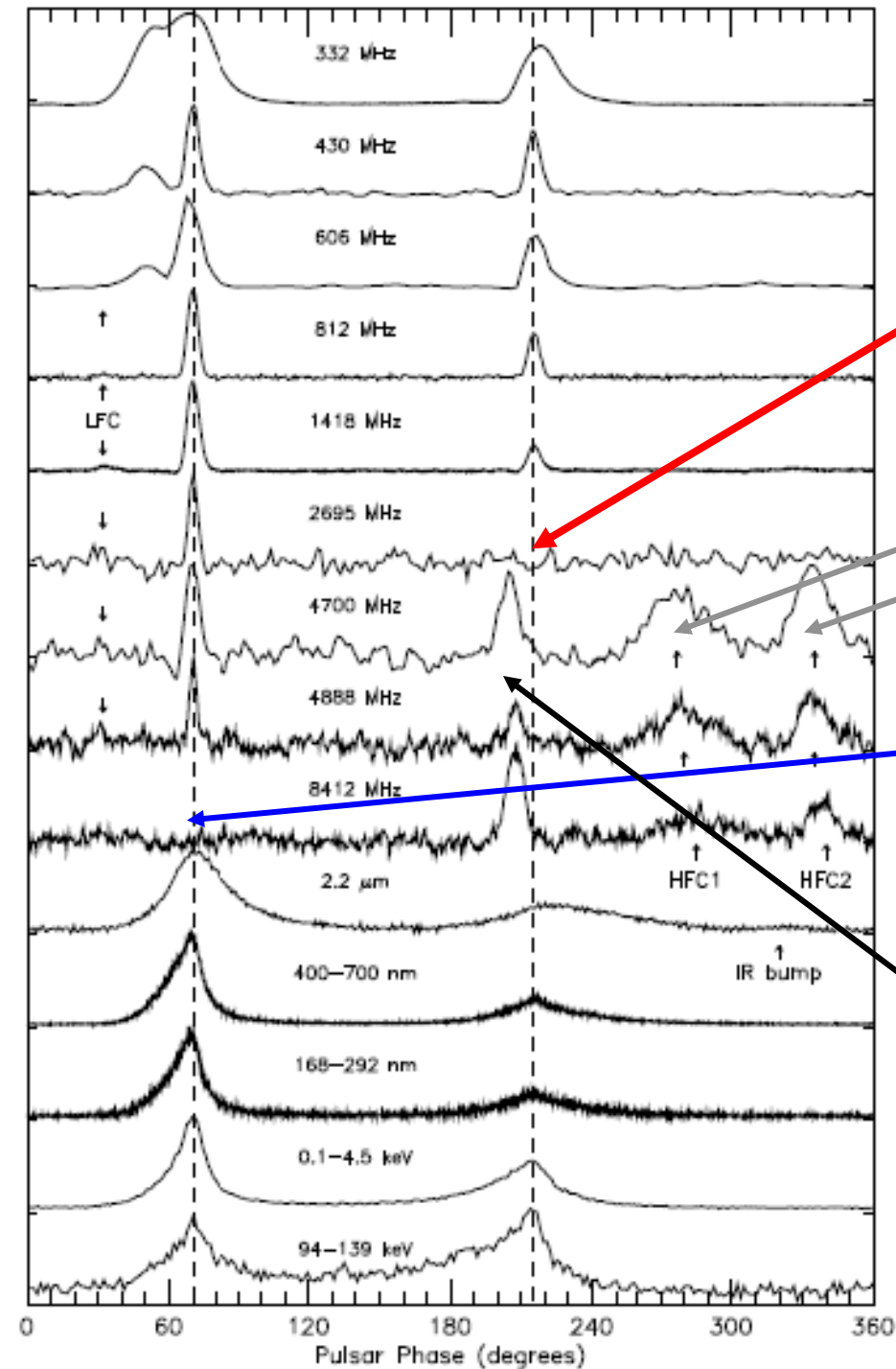
Исчезновение интеримпульса (ИИ) PSR B0531 + 21

Изменение механизма
низкочастотного излучения в зазоре.

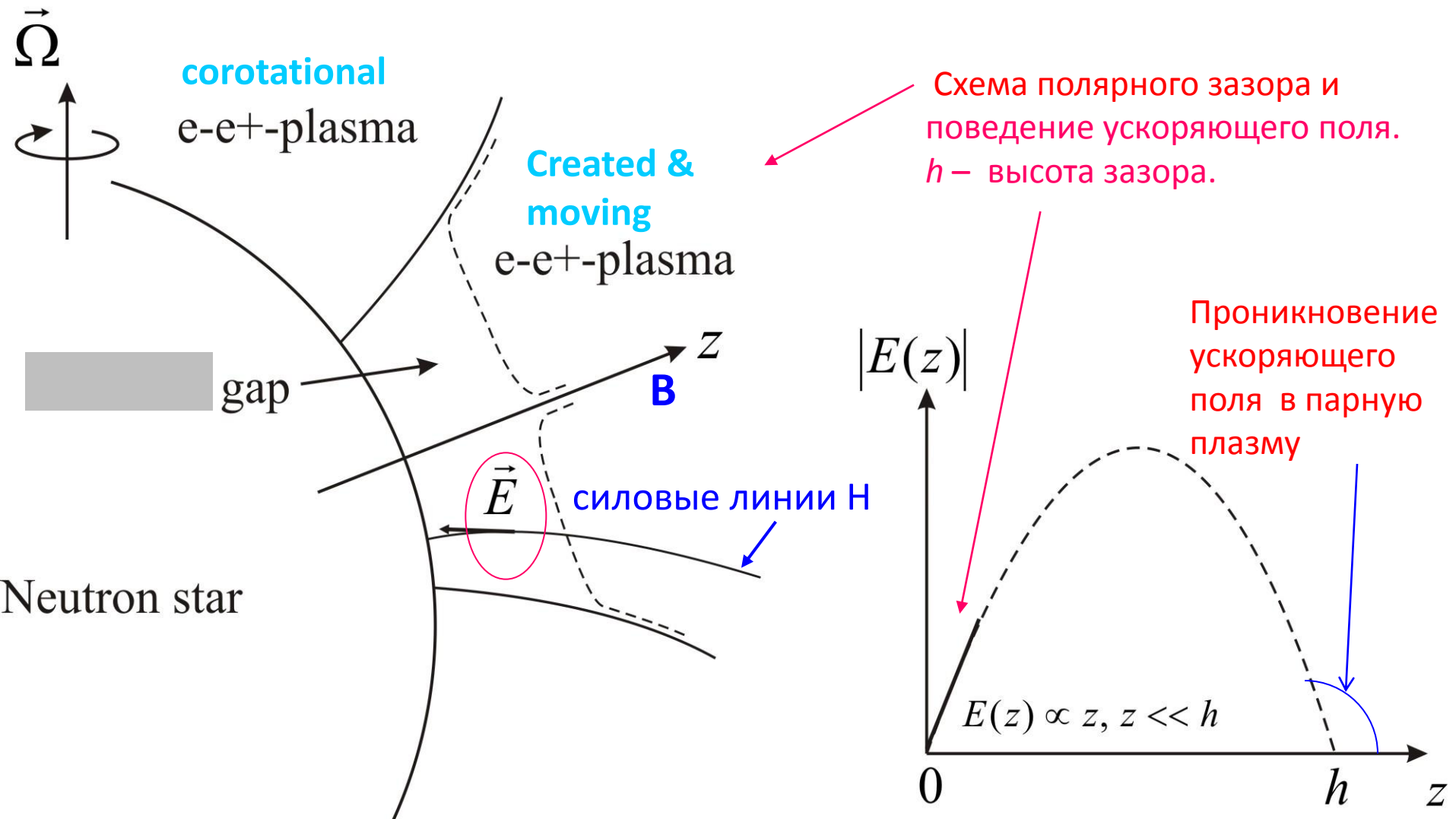
Высокочастотные компоненты
Moffat-Hankins (1996)
(Объяснение: Конторович, 2015)

Исчезновение главного
импульса (МП) PSR B0531 + 21
(Объяснение: Конторович и Фланчик, 2013)

**Сдвиг высокочастотного ИИ
относительно низкочастотного ИИ**
(Объяснение:
Конторович и Трофименко, 2015)



Ускоряющее электрическое поле в полярном зазоре пульсара



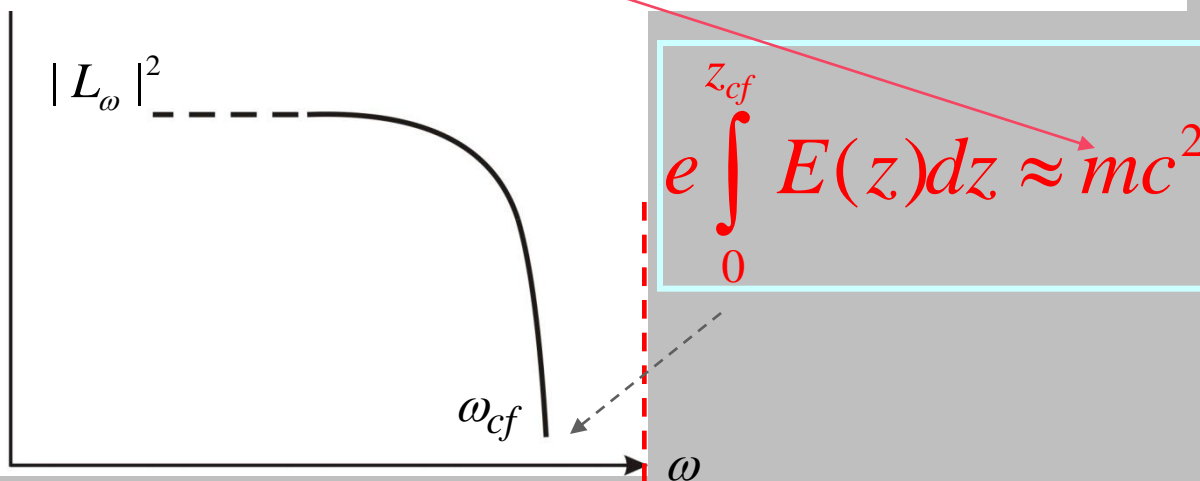
Внутренний зазор -- это область ускорения частиц от тепловых скоростей на поверхности звезды до ультра релятивистских скоростей (Arons, Scharlemann, Fawley, 1977).

Спектры излучения при продольном ускорении

Спектральное распределение излучения определяется интегралом

$$L_{\omega} = \int_0^h \frac{w(z)}{V(z) \left(1 - \frac{v(z)}{c} \cos \theta\right)^2} \exp \left\{ i\omega \left(t(z) - \frac{z}{c} \cos \theta \right) \right\} dz$$

Максимальная частота, выше которой происходит экспоненциальная отсечка спектра, может быть оценена из условия, из которого мы имеем (см. Рисунок):



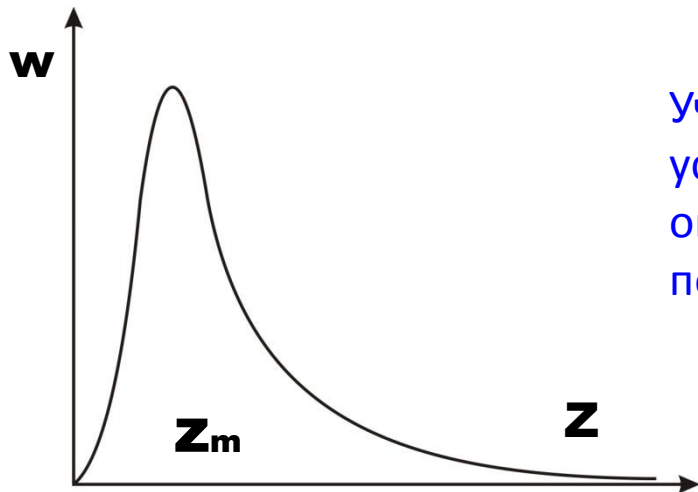
Таким образом, постоянная интенсивность ниже порога отсечки объясняет **вертикальные** структуры, само появление порога объясняется изменением механизма излучения с нерелятивистского на релятивистский (**горизонтальные** структуры).

$V(z), w(z), t(z), z$ -- скорость частицы, её ускорение, время и координата

Узкий максимум электронного ускорения в зазоре

При низкой работе выхода электронов ускоряющее электрическое поле на поверхности звезды равно нулю (Arons, 1979, Jones, 1986). В этом случае ускорение имеет узкий острый максимум вблизи поверхности звезды.

Проиллюстрируем это для линейной зависимости ускоряющего электрического поля E от координаты Z вдоль B , где гамма-фактор Лоренца электронов $\Gamma_0 \approx 1 + v_T^2/2c^2$ -- начальный лоренц-фактор, v_T -- тепловая скорость электрона на поверхности звезды.



$$E(z) = E_0 \frac{z}{h}, \quad E_0 \approx \frac{V}{c} B \quad (z \ll h)$$

$$\Gamma(z) = \Gamma_0 + a \cdot z^2, \quad a = \frac{eE_0}{2mc^2h}$$

$$w(z) = \frac{eE_0 z}{mh\Gamma^3(z)}$$

$$z_m \approx \sqrt{\frac{2mc^3}{5e\Omega B}} \approx 1 \text{ cm} \cdot \sqrt{\left(\frac{h}{10^4 \text{ cm}}\right) \cdot \left(\frac{10^{12} \text{ G}}{B}\right)}$$

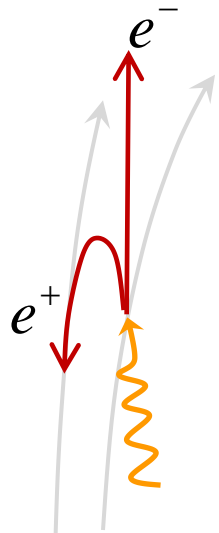
$$\Gamma_m = \Gamma(z_m) = 6/5 \quad V_m = c\sqrt{11}/6$$

Учитывая логарифмическую расходимость времени ускорения $t(\Gamma)$ когда v_T стремится к нулю, мы используем оценку, объясняющую происхождение наноимпульсов и положение разрыва спектра:

$$t(z_{cf}) \approx \frac{\sqrt{2} \ln \frac{2c^2}{V_T^2}}{\sqrt{\Omega \omega_c}} \approx 1 - 10 \text{ ns}$$

Возвратное движение позитронов, сдвиг ИИ и различие в мере дисперсии ГИ и ИИ

Рождение e^+e^- пар в сильном \mathbf{B}



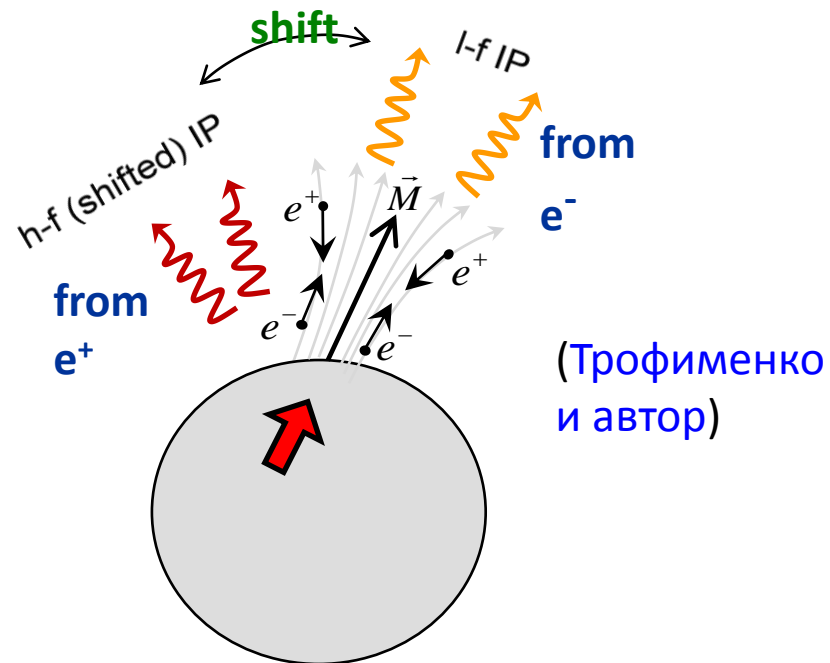
(Sturrock)

Когерентное излучение возвратных позитронов создаёт солитоноподобные эм-торнадо, квантование которых может давать полосы в ИИ-спектре (**горизонтальные структуры**).

Ускоряющее поле возвращает позитроны e^+ из парной плазмы к звезде (Shibata).

$$T = \int_0^L \frac{dl}{V_g} = \frac{1}{c^2} \int_0^L \frac{dl}{V_{ph}^{-1}} = \frac{1}{c} \int_0^L \frac{dl}{\sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}} \approx \frac{L}{c} + \frac{4\pi e^2}{\omega^2} \int_0^L n dl$$

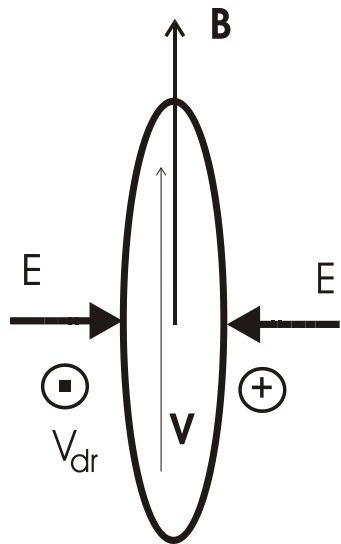
Мера дисперсии DM



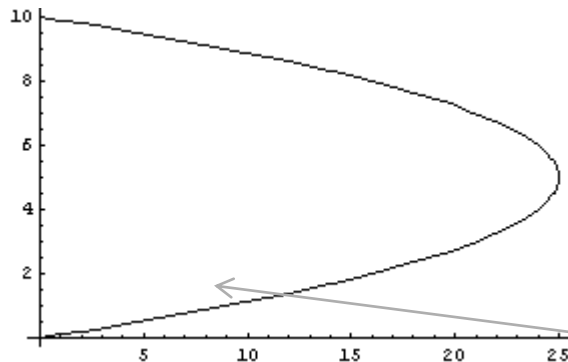
Shift of IP and reflection e^+ radiation from the surface of NS. Difference in DM of MP and IP.

(Трофименко и автор)

Полосы излучения ИИ и квантование



Кулоновское отталкивание частиц в нити разряда (солитоноподобном сгустке) приводит к вращению частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях вокруг оси сгустка, превращая его в **электромагнитное торнадо**. Вращение вызывает круговую поляризацию гигантских импульсов. Такие структуры устойчивы и сохраняют свои параметры. Возможно, это последний этап неустойчивости непрерывного потока или встречных пучков частиц..



$$2\Omega_{\pm} = \omega_c \pm \sqrt{\omega_c^2 - 4 \frac{eE}{mr}}$$

Угловые скорости вращения как функции eE / mr , описывающего влияние радиального электрического поля E сгустка (Дэвидсон). В сильных магнитных полях это вращение квантуется (Конторович, ЖЭТФ **137 (2010)**), что приводит к **горизонтальным** структурам.