

Серповидное «горячее» пятно как возможный результат комбинационного рассеяния при отражении от поверхности пульсара

В.М.Конторович

- С помощью рентгеновской обсерватории Найсер на Международной Космической Станции удалось определить распределение магнитного поля на видимой полусфере пульсара PSR J0030+0451 [1]. Было обнаружено второе «горячее» пятно, имеющее вид вытянутого серпа [2], что интерпретировано как многополюсность магнитного поля пульсара. 1. T. E. Riley, et al., 2019, ApJL, **887**, L21. 2. A. V. Bilous, et al. 2019, ApJL **887**, L23.
- Мы покажем, безотносительно к [1,2], что структура подобной геометрии может возникать при комбинационном рассеянии (КР) отражённого излучения в условиях, близких к аномалии Вуда.

Полюсные особенности при комбинационном рассеянии

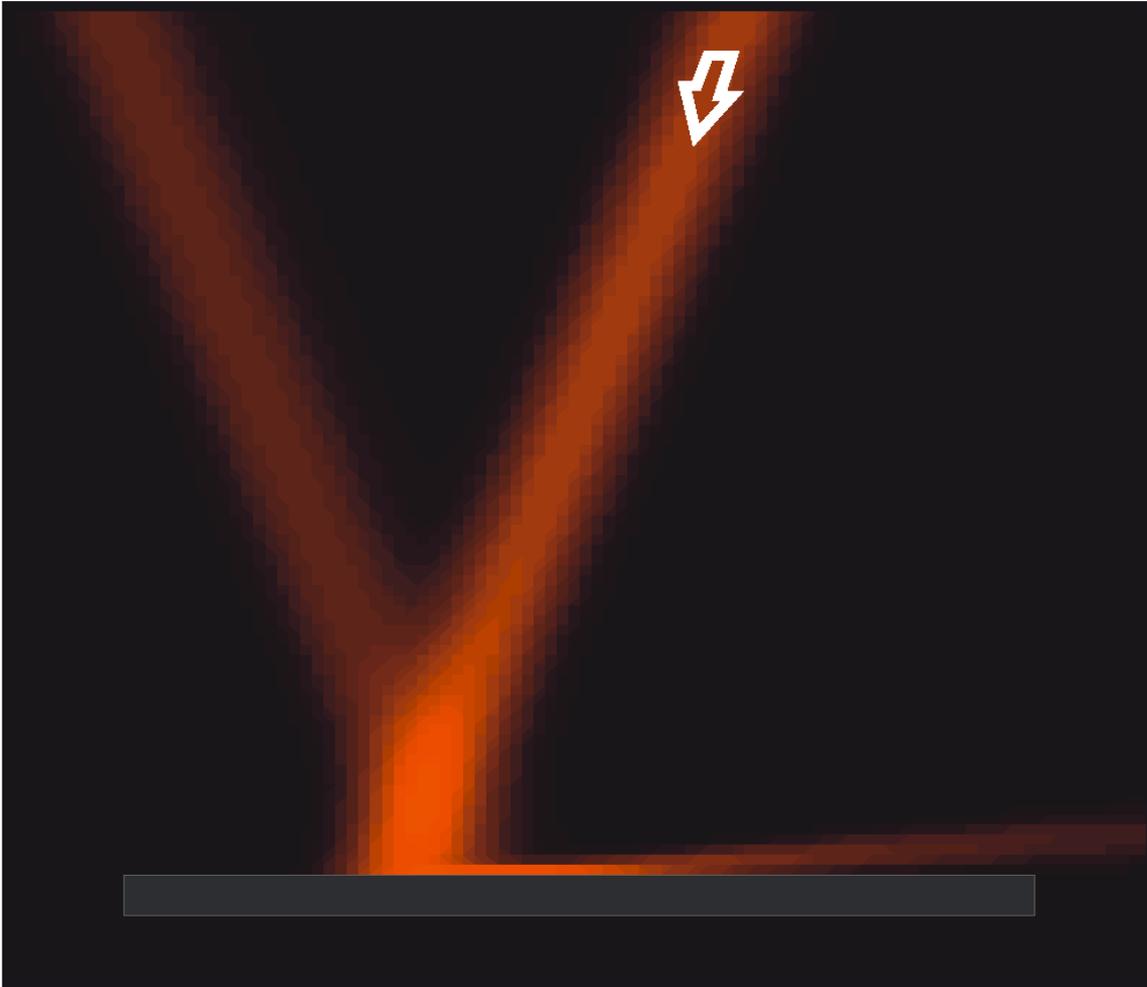
- Как показал Рэлей, аномалии Вуда возникают, когда дифракционный спектр близок к волне, скользящей вдоль дифракционной решётки с близкой к нулю нормальной компонентой волнового вектора $k_z=0$. В выражениях для полей и коэффициенте отражения при КР этому соответствуют резонансные знаменатели: $(k_z - k/\sqrt{\varepsilon}) \rightarrow 0$ при $k_z \rightarrow 0, \varepsilon \rightarrow \infty$.

$$\xi \propto 1/\sqrt{\varepsilon}, \quad H^{\pm 1} \propto 1/(\beta + \xi), \quad \beta \equiv \frac{k_z}{k} = \sqrt{k^2 - (k_x + q)^2} / k.$$

Поверхностный импеданс, переменное магнитное поле и (безразмерное) поперечное волновое число при КР для рассеяния первого порядка.

- В этих условиях коэффициент отражения при **KP** вблизи от дуги окружности $k_z=0$ имеет особенности, в первую очередь максимумы, зависящие от свойств поверхности и близости к резонансу [3] с поверхностной волной (см., например, применительно к пульсарам [4-5]).
3. M. Tymchenko, V. K. Gavrikov, I. S. Spevak, et al., 2015 Appl. Phys. Lett. **106**. id. 261602.
 4. В. М. Конторович, 2016, ФНТ **42**, 854.
 5. В. М. Конторович, И. С. Спевак, В. К. Гавриков. 2018, РИР. **23**, № 3, 166.

Аномалии Вуда



Скользкая приповерхностная волна Вуда на фоне падающей и отраженной от дифракционной решетки волн. Яркой вудовской волне с $k_z \rightarrow 0$ соответствует ослабленная отраженная волна [3, 5]. Рисунок из работы 3 М. Tymchenko, et al., 2015 Appl. Phys. Lett. **106**. id. 261602. С благодарностью авторам.

Неустойчивости поверхности во внешних полях

Роль дифракционной решётки на поверхности звезды, на которой происходит **KP** Мандельштама-Андропова-Леонтовича, играют возвышения, возникающие из-за неустойчивости поверхности в сильных переменных [**6-7**] или постоянных [**8-10**] полях («материальные» поверхностные волны - **МПВ**).

6. Гавриков В. К., Кац, А. В., Конторович В. М. ЖЭТФ. 1970, **58**, № 4, 1318.
7. Кац, А. В., Маслов В.В. ЖЭТФ, 1972, **35**, №. 2, 264.
8. Я. И.Френкель, ЖЭТФ, 1936, **6**, 347.
9. М. Ш. Шлиомис, Магнитные жидкости. УФН, **112**, 427, 1974.
10. Е.А. Кузнецов, М.Д.Спектор, ЖЭТФ, 1976, **71**, 262.

Области неустойчивости в постоянном магнитном поле

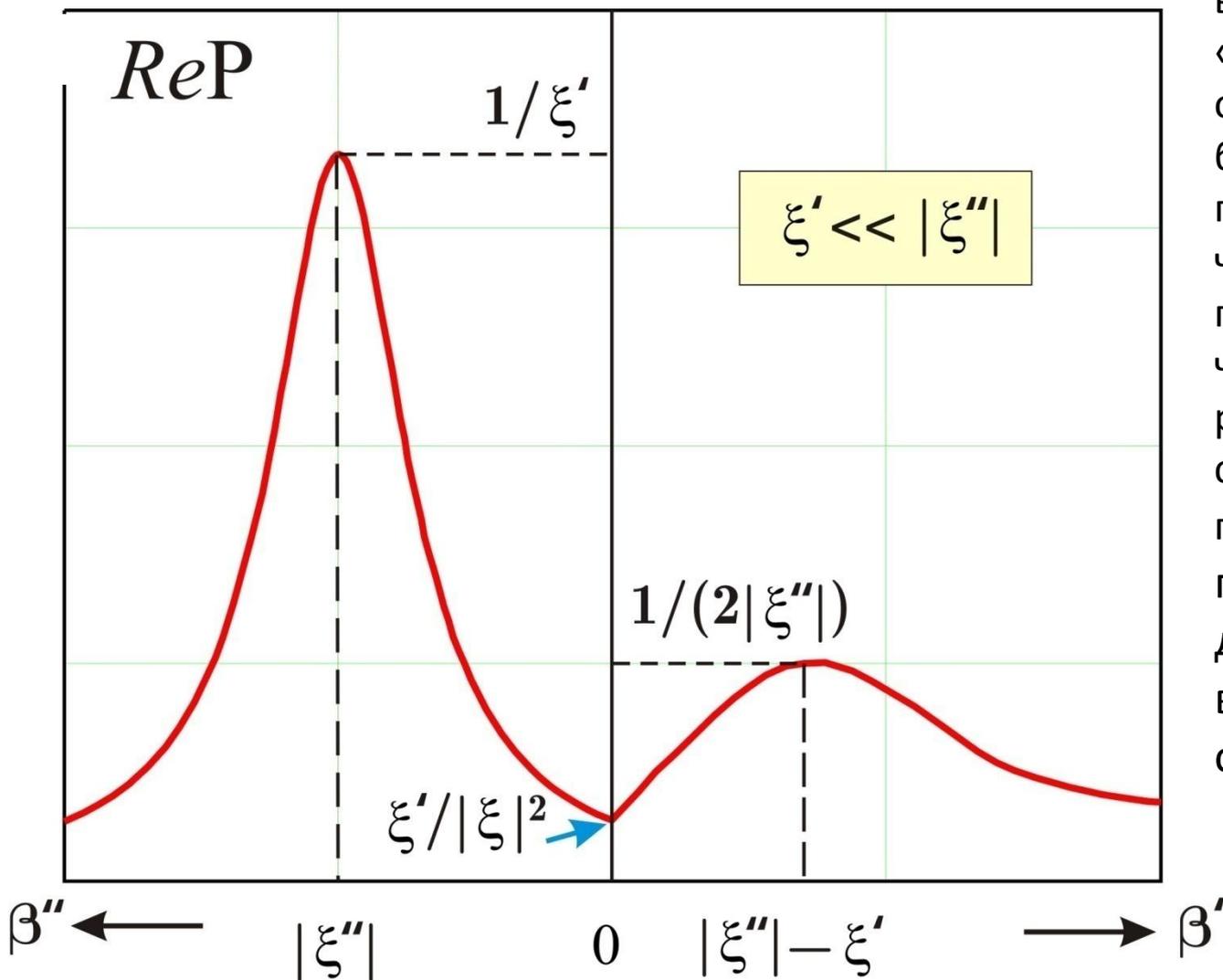
Области неустойчивости, соответствующие отрицательному квадрату частоты, проиллюстрируем на простейшем примере гравитационно-капиллярных волн. Дисперсионное уравнение, связывающее частоту волн и лежащий в плоскости раздела их волновой вектор \mathbf{q} , сводится в сильном постоянном вертикальном магнитном поле [9] (V_A - аналог альфвеновской скорости) к

$$\omega^2 = \frac{\alpha}{\rho} q^3 + gq - q^2 V_A^2, \quad V_A^2 = \mu^* \frac{H_z^2}{4\pi\rho}, \quad \mu^* = \mu \left(\frac{\mu-1}{\mu+1} \right)^2, \quad \alpha \propto \rho^{2/3}$$

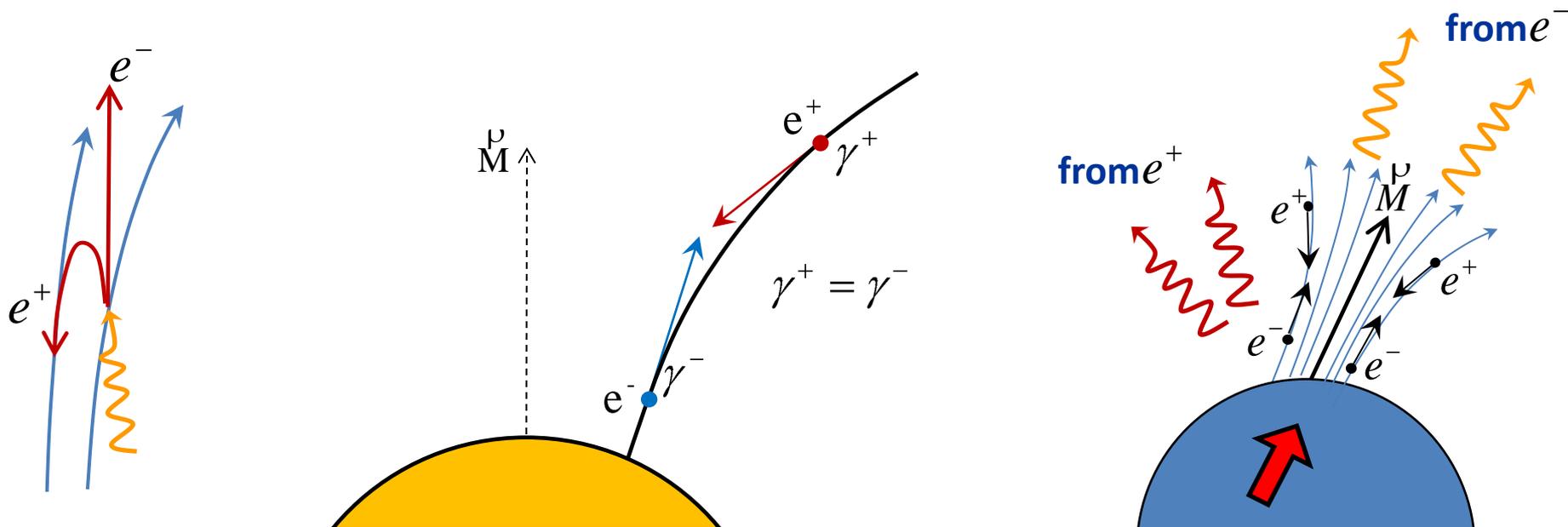
Поверхность предполагается расплавом из ядер железа и электронов при $T = 10^6$ градуса. Мы опустили вязкий член и не учитываем явно квантовую роль магнитного поля. При больших плотностях (на поверхности пульсара $g=10^{14}$, $H=10^{12}$, $\rho=10^4$ CGS и более **11**. Потехин А.Ю., УФН 2010, **180**, 1235; 2014, **184**, 793) капиллярный член можно опустить и условие неустойчивости сводится к $g/q < V_A^2$, т.е. выполняется для всех масштабов на полярной шапке вплоть до определяемых вязкостью. Физическая природа МПВ может быть иной, но это не столь существенно для нас, т.к. играет роль лишь кинематика волн. Т.о. хотя сильнейшее гравитационное поле разглаживает поверхность (если она существует, см. **11**) до зеркальной, неустойчивости делают её шероховатой в области полярных шапок.

Вудовские аномалии при резонансе

Зависимость вещественной части «коэффициента отражения» при КР от безразмерного поперечного волнового числа для хороших проводников. Левая часть рисунка отвечает резонансной дифракции с возбуждением ПЭВ, правая часть отвечает приповерхностной дифрагированной волне и максимуму суммарных потерь [5].



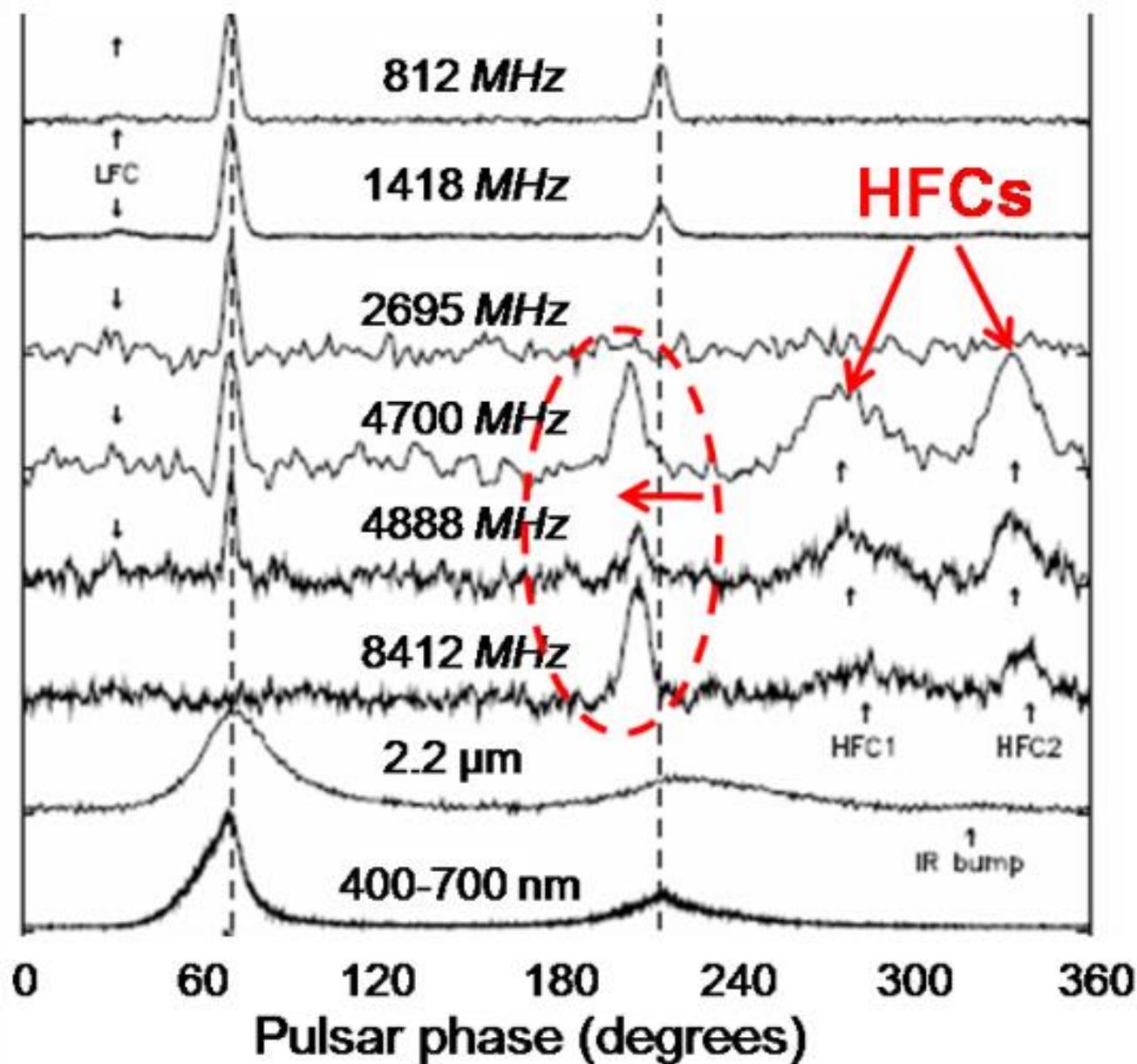
Отражённое излучение возвратных позитронов в наклонном магнитном поле



Ускоряющее поле возвращает парные позитроны к звезде. Их излучение объясняет наблюдаемый в пульсаре Краба сдвиг положения ИИ. По мощности это излучение сравнимо с прямым излучением электронов. Появление в этом же диапазоне ВЧ-компонент Моффета и Хэнкинса объясняется **КР** отраженного излучения от поверхности.

Рисунки из работы автора и С.В.Трофименко , 2017.

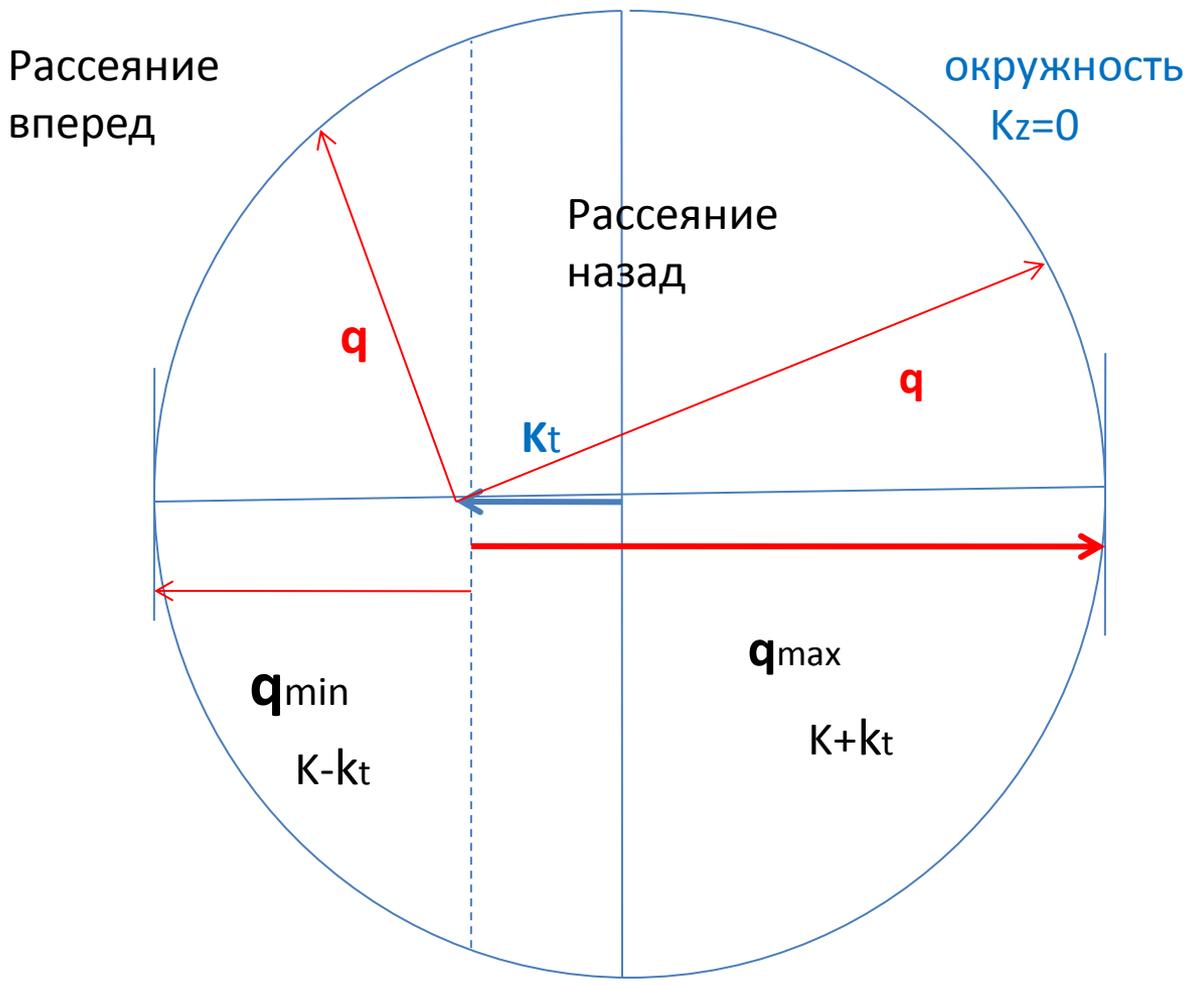
Сдвиг связан с наклоном диполя, создаваемого ф-м кором и св. провод. током в недрах пульсара



Сдвиг ИИ в отраженном излучении позитронов, летящих к звезде, и дополнительные ВЧ-компоненты НФС в сантиметровом диапазоне электромагнитных волн, объясняемые КР 4,5 на поверхности пульсара. Из работы автора и С.В.Трофименко **12 J. Phys. Sci. Appl.** 2017, **7**, №4, 11.

Данные многочастотных наблюдений излучения пульсара в Крабе из работы Д. Моффета и Т. Хэнкинса **13 Ap J.** **468**,. 779 (фрагмент). С благодарностью авторам.

Серп как результат КР в условиях резонанса с поверхностной волной



«Актуальная» область волновых чисел МПВ (материальных поверхностных волн), в которой реализуется аномалия Вуда

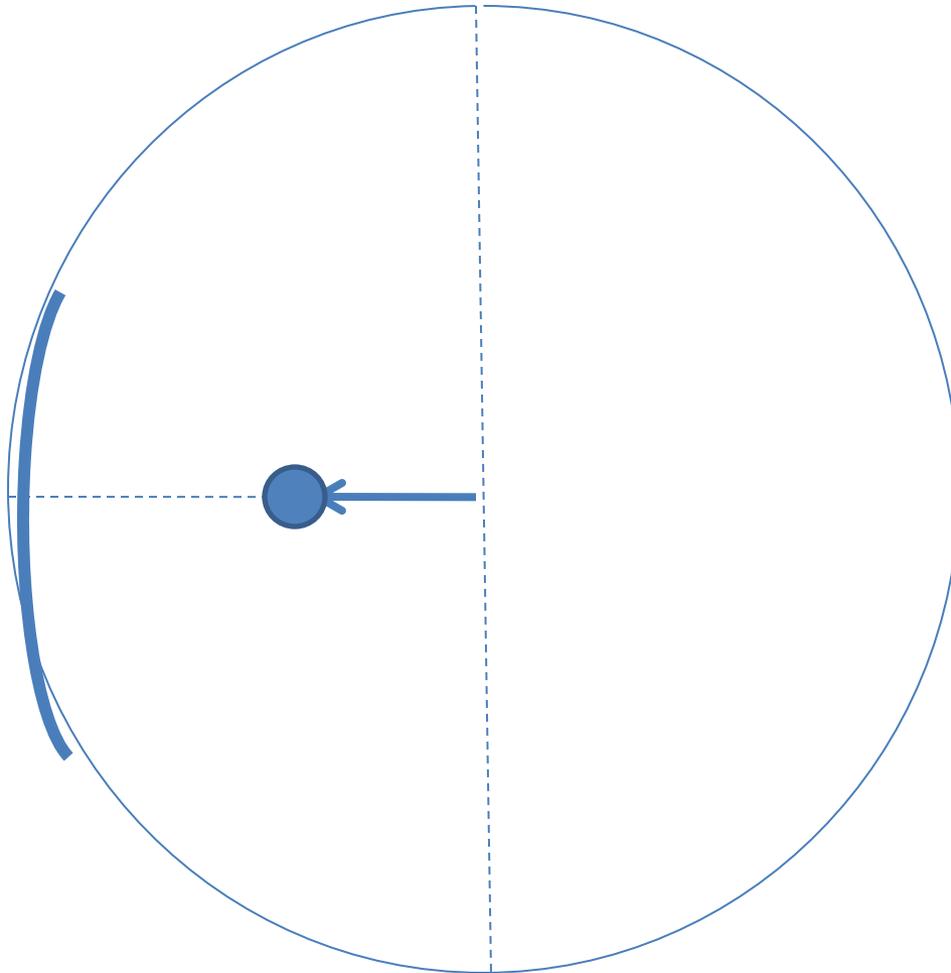
$$K - k_t < q < K + k_t$$

КР. Вид сверху на плоскость отражения.

Положение и форма серпа

- Распределение яркости вдоль дуги окружности (серпа) определяется спектрами турбулентности возвышений (поверхностных волн).
- Положение и форма серпа определяется тем, на какой участок турбулентного спектра попадает интервал актуальных волновых чисел при комбинационном рассеянии .

Полюс и серп



Убывающий спектр возвышений в актуальной области волновых чисел МПВ, попадающий в инерционный интервал «турбулентности», ограничивает размеры дуги. При этом максимальная интенсивность МПВ достигается при их минимальном волновом числе в актуальной для аномалии Вуда области. Несимметричное положение горячего пятна (полюса) соответствует наклону магнитного поля.

Иллюстрация горячих пятен из видео по работам группы Т.Райли (Амстердамский университет и НАСА, слева, виден серп) и коллектива под руководством К. Миллера из Мэрилендского Университета (справа, три пятна, одно на полюсе)

