

Реконфигурация пульсарных туманностей после прохождения обратной ударной волны сверхновой

Ксения Левенфиш¹, Георгий Пономарёв^{1,2}, Алексей Петров¹

¹ФТИ им А.Ф. Иоффе РАН, ²СПбПУ Петра Великого

В рамках численных релятивистских МГД моделей пульсарной туманности (ПТ) показано, что после прохождения по остатку сверхновой обратной ударной волны, развивающаяся в этом остатке ПТ может изменить (иногда радикально) структуру своих течений. При этом изменится не только её рентгеновская морфология, но и её интегральная рентгеновская светимость.

Последние станут зависимыми от того, обращена ли туманность к наблюдателю своей наветренной или подветренной стороной.

Наличие у туманности с джет-торовой морфологией одного или нескольких следующих признаков:

- лишь одного яркого джета,
- стабильно-яркого «внутреннего кольца»,
- стабильно-яркой двухторовой структуры,

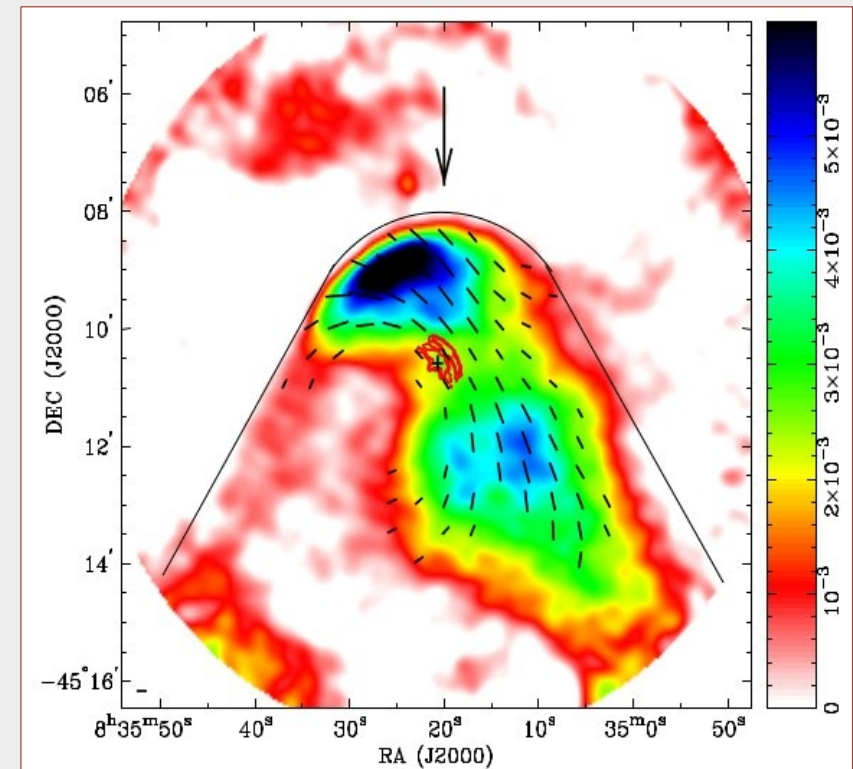
свидетельствует, вероятно, о том, что в своей системе отсчета ПТ сталкивается со значительным (дозвуковым или трансзвуковым) натекающим потоком внешней среды.

Введение

Пульсарная туманность (ПТ) формируется внутри остатка (выброса) родительской сверхновой, и ее эволюция неразрывно связана с эволюцией этого остатка. Последний имеет два начальных этапа эволюции — до и после прохождения по остатку обратной ударной волны сверхновой. На 1-ом этапе ПТ развивается внутри радиально разлетающегося выброса сверхновой; на 2-ом этапе ПТ может столкнуться с натекающим потоком выброса сверхновой, (локально) увлеченным прохождением (асимметричной) обратной ударной волны сверхновой. Пример -- на Рис. 1.

Рис.1 Взаимодействие ПТ Vela с трансзвуковым потоком выброса сверхновой, увлеченным обратной ударной волной сверхновой. Из работы Chevalier & Reynolds (2011).

Цвет: интенсивность радио излучения (5 ГГц); красные контуры: рентгеновское излучение (0.5-8 кэВ); чёрн. контур: контактный разрыв между ПТ и выбросом сверхновой; черточки: структура магнитного поля в ПТ.



Возникновение двухторовой структуры ПТ

Моделирование показывает [6,7], что ПТ пульсара с большим наклоном магнитной оси к оси вращения ($\alpha \gtrsim 70^\circ$) и со слабой начальной замагниченностью пульсарного ветра ($\sigma_0 \sim 0.03—0.1$) склонна к формированию двухторовой структуры, как показано на Рис. 2.

Однако накопление турбулентных движений в туманности может быстро разрушить эту структуру. Предотвратить накопление турбулентности может транзвуковой поток внешней среды (Рис. 3). Он увлекает турбулентные вихри с периферии ПТ, тем самым предотвращая их каскадирование на более мелко-масштабные вихри.

Рис.2 : магнитная (сверху) и синхротронная (снизу) карты осесимметричной РМГД модели ($\alpha=80^\circ$ и $\sigma_0=0.03$) двухторовой ПТ в стационарной среде [6]. На синтетической рентгеновской синхротронной карте ПТ показана в проекции туманности Vela, чьё рентгеновское изображение дано на Рис.4 ($\vartheta_{view}=120^\circ$, PA=310°). Магнитное поле - в [мкГс], рентгеновская яркость - в произв. ед.

Рис. 3: та же модель, но в транзвуковом потоке (показан стрелкой) внешней среды со звуковым числом Маха $M=1.3$.

Рис. 4: рентгеновское изображение туманности Vela (0.1—10 keV). 3

Возникновение двухторовой структуры ПТ

Рис.2

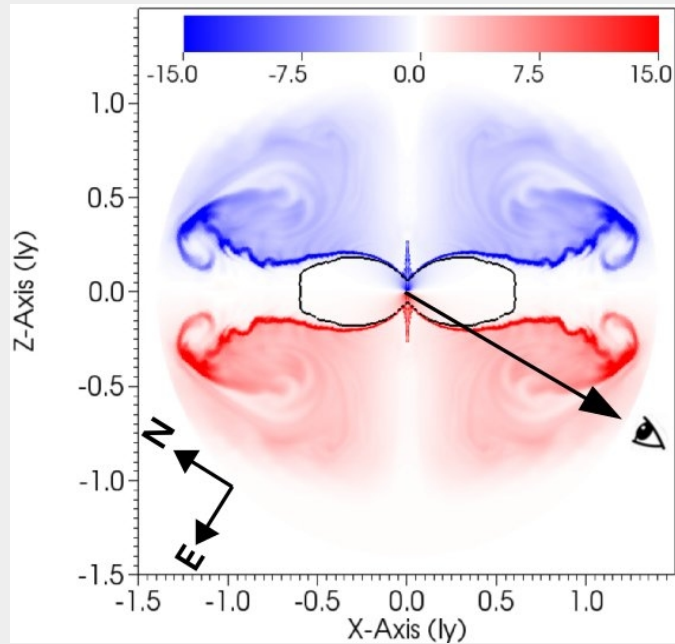


Рис.3

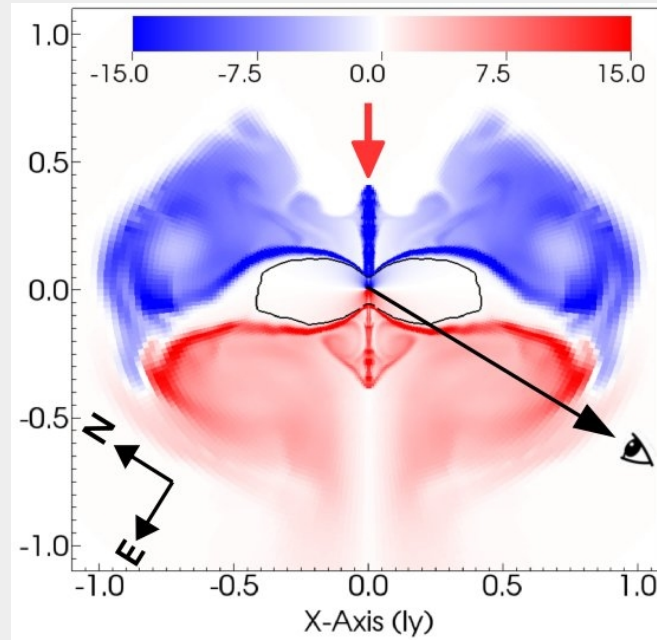
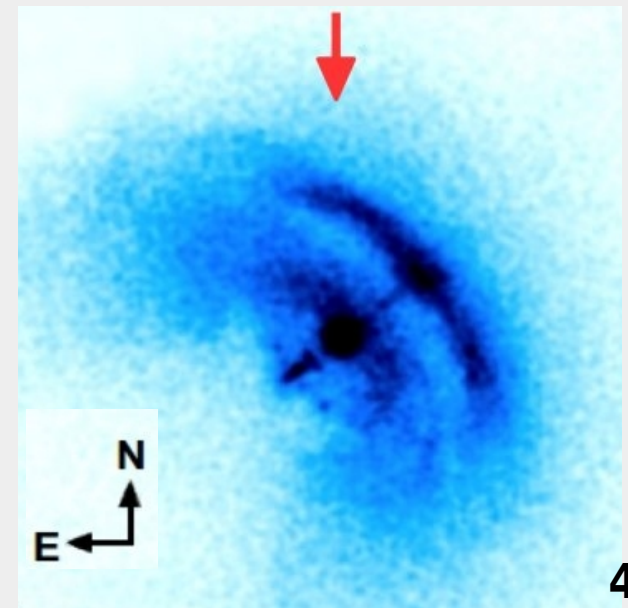
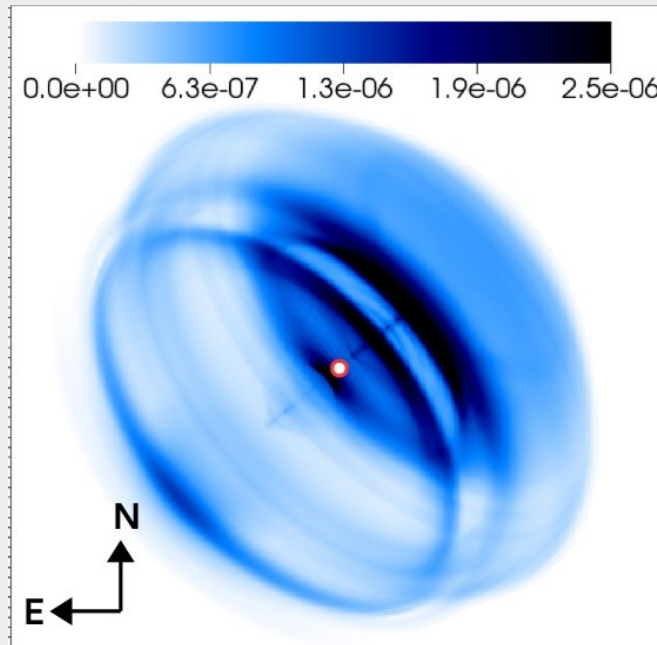
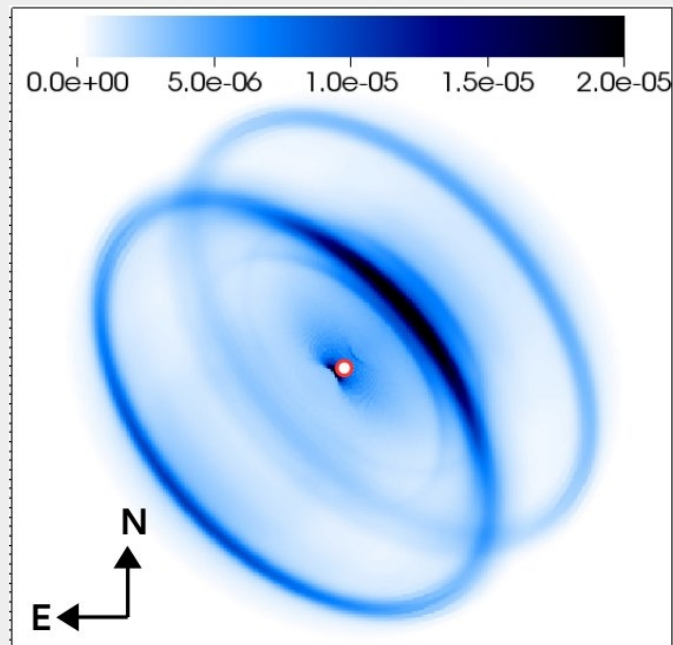


Рис.4

Туманность Vela
(Chandra HRC, 0.1-10 keV,
after Helfand et al. 2001)



Формирование одиночного джета и внутреннего кольца

Моделирование [6,7] показывает, что при наличии заметного (в т.ч. дозвукового) потока внешней среды в системе отсчета ПТ, у ПТ формируется **лишь один яркий (наветренный) джет** (Рис. 3 и 5).

В подветренном же джете рентгеновски-яркая часть либо не выходит за пределы рентгеновского тора (как у двухторовых ПТ, рис.3), либо отсутствует вообще (как у одноторовых ПТ, где взамен подветренного джета образуется лишь диффузная структура; рис. 5, верхний ряд).

Под напором потока вся ПТ изгибается «коромыслом». При наблюдении такой ПТ с наветренной стороны (Рис. 5, верхний ряд), на ее рентгеновской карте часто формируется яркое **стабильное «внутреннее кольцо»**, схожее с подобной структурой (*inner ring*) в ПТ Краб, показанной на Рис. 6. Схожая яркость дальней и ближней сторон «внутреннего кольца» в ПТ Крабе до сих пор является загадкой. Наше моделирование показывает, что это свойство «внутреннего кольца» может быть естественным образом объяснено при учете движения ПТ относительно внешней среды [7].

Рентгеновская морфология ПТ, наблюдаемой с наветренной и подветренной сторон

Рис. 5 показывает, что даже в дозвуковом потоке туманность имеет совершенно **разную рентгеновскую морфологию при наблюдениях с наветренной и подветренной сторон** [7].

Приведены карты синтетического рентгеновского синхротронного излучения РМГД модели ПТ ($\alpha=45^\circ$ и $\sigma_0=0.03$), которая в своей системе отсчета видит натекающий дозвуковой поток (красные стрелки) внешней среды с числом Маха $M=0.7$ [7].

С наветренной стороны (верхний ряд) :

ПТ похожа на одноторовую ПТ Краб: в ней видно стабильное яркое «внутреннее кольцо», разбегающиеся от кольца яркие динамичные арочные структуры («виспы»), один яркий (ЮВ) джет с диффузной структурой в своем основании («спрайт»), и диффузная структура взамен (СЗ) контр-джета.

С подветренной стороны (нижний ряд):

ПТ похожа на двухторовую ПТ Vela (показана на Рис 7): в ней видны две стабильно-яркие арки, нет «виспов», есть лишь один яркий наветренный (СЗ) джет; подветренный же контр-джет едва различим [6,7].

Рентгеновская морфология ПТ, наблюдаемой с наветренной и подветренной сторон

Рис. 5 из статьи [7]:
Рентгеновская яркость (произв. единицы)

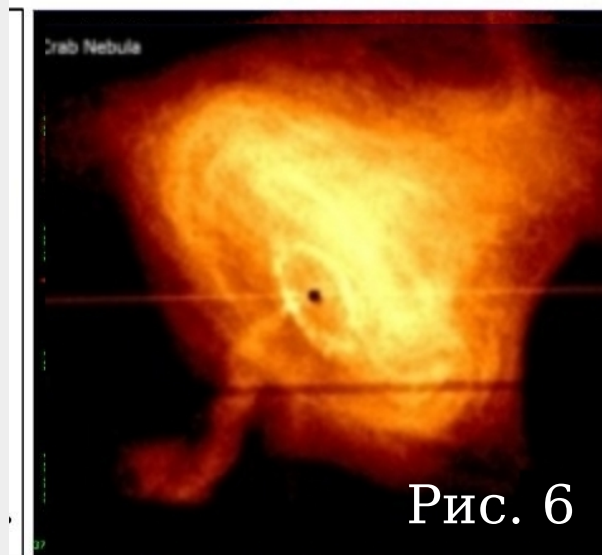
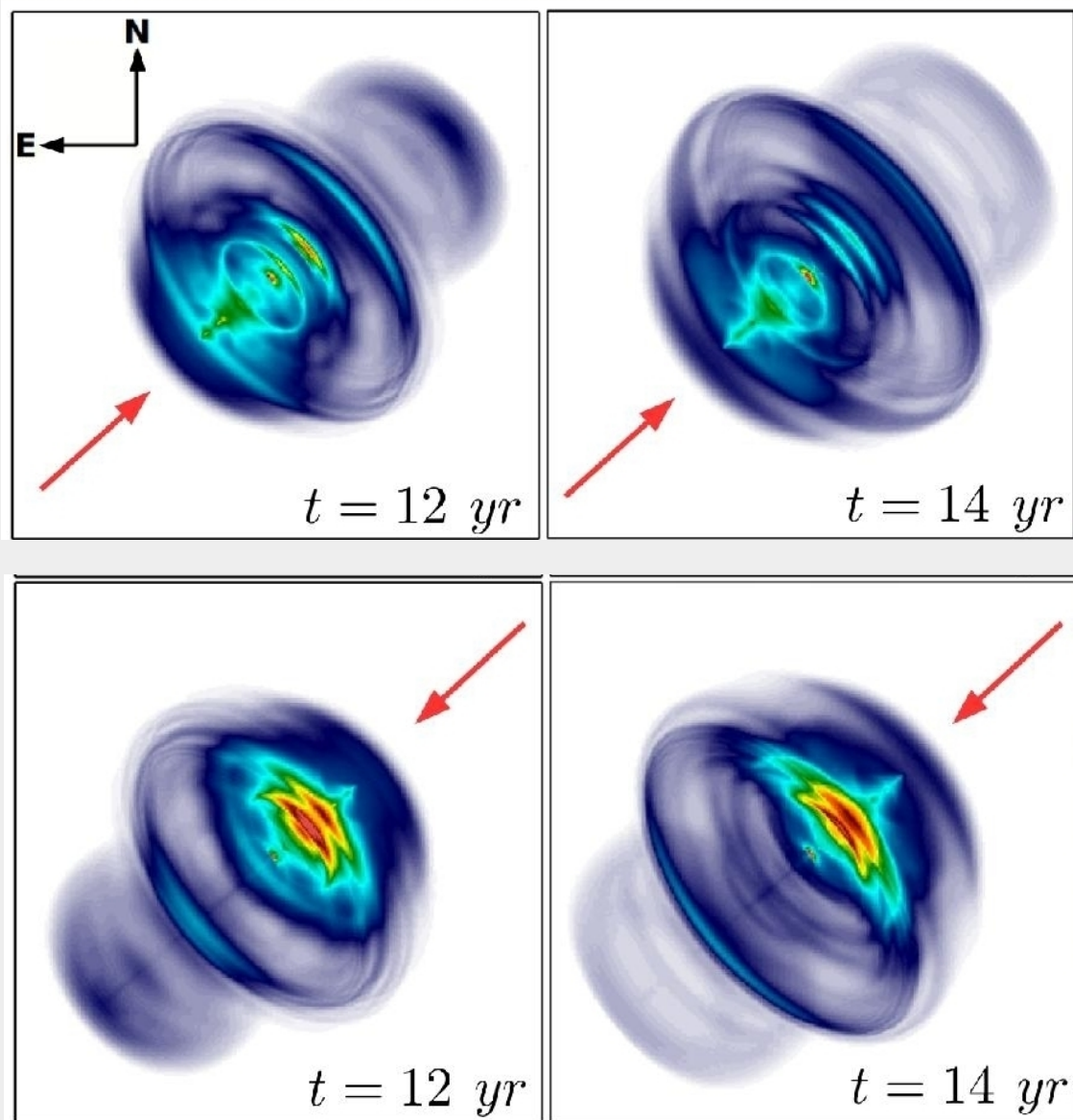


Рис. 6

Туманность Crab
Krassilchikov
et al. 2017

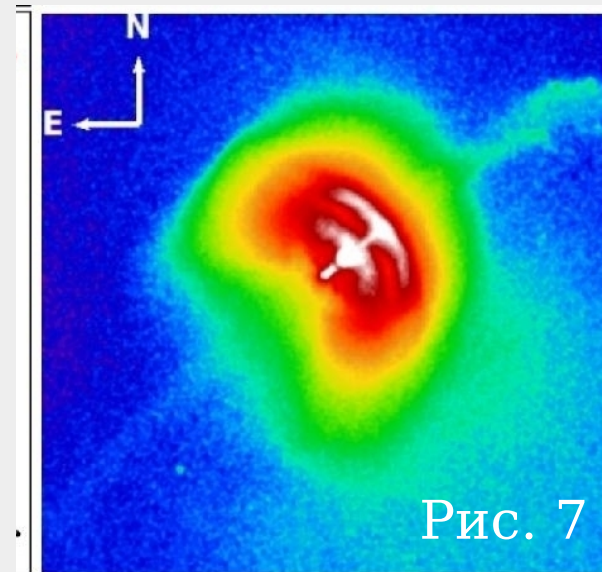


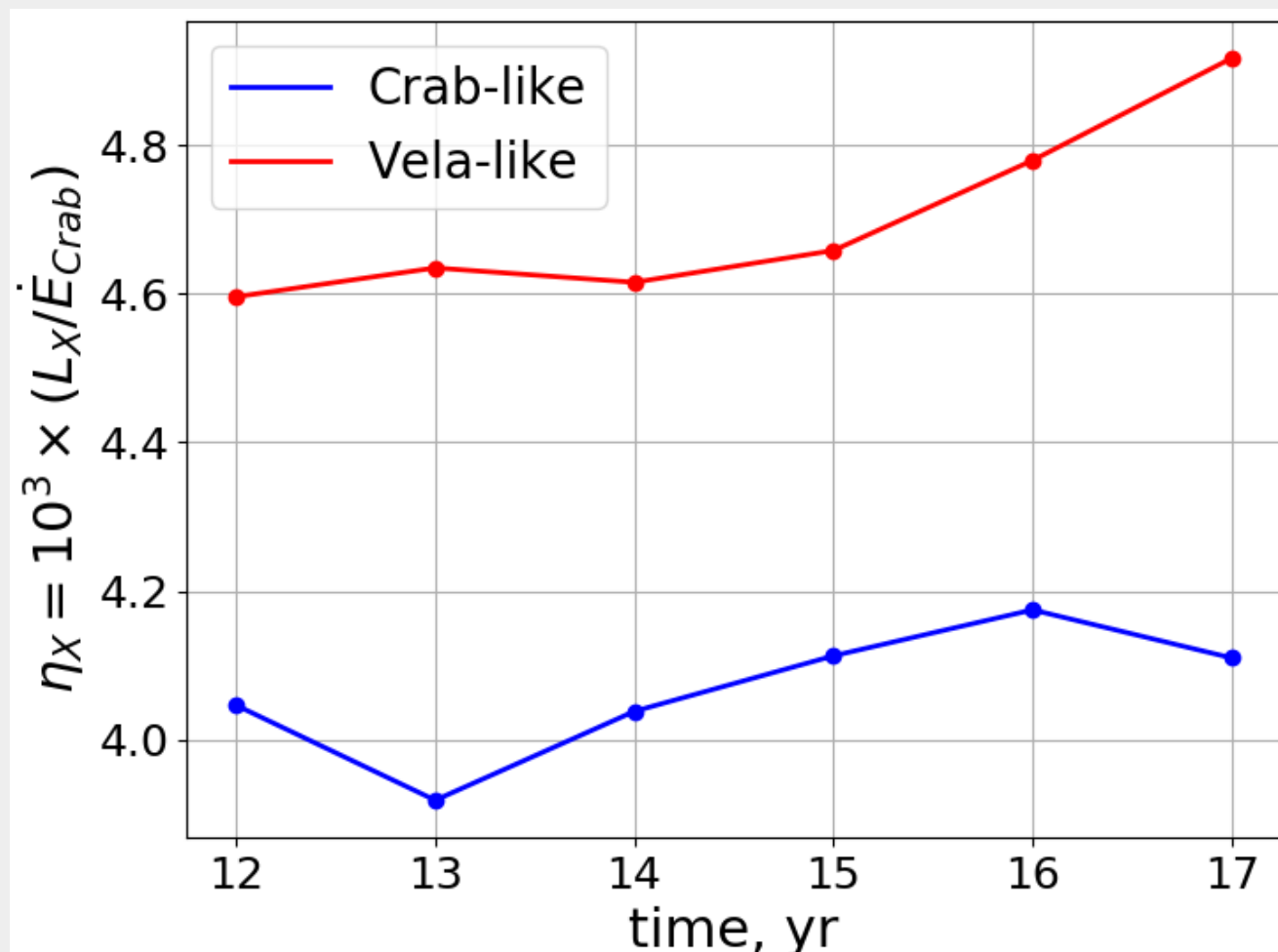
Рис. 7

Туманность Vela
Chandra (0.5-8 keV),
PI: G.G.Pavlov

Интегральная рентгеновская светимость ПТ, наблюдаемой с наветренной и подветренной сторон

Интегральная рентгеновская светимость ПТ зависит от числа и размера ярких деталей на рентгеновской карте ПТ. На Рис.8 приведены интегральные светимости РМГД модели ПТ с рисунка 5, при наблюдении с наветренной (синяя линия) и подветренной (красная линия) сторон.

Рис. 8:



Выводы

Учет относительного движения компактной рентгеновской пульсарной туманности (ПТ) и внешней среды:

- важен для правильной интерпретации структуры туманности (одноторовая? двухторовая?) [7];
- естественным образом объясняет многие структуры ПТ, необъяснимые в стационарных моделях, как то [6,7]:
 - выраженную асимметрию джета и контр-джета, наблюдаемую в ПТ с джет-торовой морфологией;
 - формирование двойного тора в ПТ с большим наклоном и низкой замагниченностью пульсарного ветра;
 - видимость наветренного джета между торами двуторовой ПТ, наблюдаемой с подветренной стороны;
 - яркость короткого основания и диффузность внешнего участка подветренного джета в двухторовой ПТ;
 - появление яркого «внутреннего кольца» (с дальней и ближней к наблюдателю половинками схожей яркости) и «спрайта» в ПТ с низким наклоном и слабо-замагниченным ветром, наблюдаемой с наветренной стороны ;
 - и еще целый ряд более тонких деталей [см. 6,7].

Список литературы

1. Chevalier R A & Reynolds S P, 2011, ApJ, 740, L26
3. Dodson R. et al., 2003, MNRAS, 343, 116
3. Mignone A et al., 2007, ApJS, 170, 228
4. Porth O et al., 2014, MNRAS, 438, 278
5. Buhler R and Giomi M, 2016, MNRAS, 462, 2762
6. Ponomaryov G A et al., 2021, J. Phys.: Conf. Ser., 2103, 012021
7. Levenfish K P et al., 2021, J. Phys.: Conf. Ser., 2103, 012020
8. Helfand D J et al., 2001, ApJ, 556, 380-91
9. Krassilchtchikov A M et al., 2017, J. Phys.: Conf. Series 798 012003

РМГД модели: основаны на численном коде PLUTO [3]. Установки численного года, параметры пульсарного ветра, и рецепт построения карт синтетического синхротронного излучения ПТ те же, что и в [4, 5].

А.Е.П. и Г.А.П. поддержаны грантом РНФ 21-72-20020.

СПАСИБО ВСЕМ ОРГАНИЗАТОРАМ НЕА-2021 !!!