

## РЕВЕРБЕРАЦИИ ПУЛЬСАРНОЙ ТУМАННОСТИ В СОЗВЕЗДИИ ПАРУСОВ

© 2023 г. А. Е. Петров<sup>1\*</sup>, К. П. Левенфиш<sup>1</sup>, Г. А. Пономарёв<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 18.09.2023 г.

После доработки 29.10.2023 г.; принята к публикации 21.11.2023 г.

Трансзвуковое (с числом Маха  $M_s \gtrsim 1$ ) движение пульсарной туманности относительно внешней среды может способствовать формированию внутри нее компактной двухторовой рентгеновской структуры. Этот двойной рентгеновский тор может реверберировать как целое под действием напорного давления натекающей среды. Если среда натекает на туманность параллельно оси вращения питающего ее пульсара, то реакция торов на этот напор однородна по азимуту. При натекании под углом к этой оси подветренные половинки торов откликаются на действие внешнего потока с некоторой задержкой относительно наветренных. Задержка может приводить к любопытному “повиливанию” среднего сегмента подветренного джета компактной двухторовой туманности. На основе релятивистской магнитогидродинамической модели такой туманности мы исследуем динамику ее плазменных течений, ответственных за это повиливание. Модель, в частности, позволяет естественным образом связать повиливание яркого сегмента подветренного (юго-восточного) джета туманности в созвездии Парусов (Vela) с реверберацией ее двойного тора.

*Ключевые слова:* пульсарные туманности, остатки сверхновых, рентгеновские источники.

**DOI:** 10.31857/S0320010823120069, **EDN:** RXSCPQ

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Компактные области яркого синхротронного свечения вокруг быстро вращающихся нейтронных звезд-пульсаров называют пульсарными туманностями (ПТ). Они являют собой пузырь, который пульсар своим ветром выдувает в окружающей плотной среде — остатке сверхновой звезды, породившей пульсар, или межзвездной. Пузырь заполняет сильно разреженная, бесстолкновительная, сильно замагниченная электрон-позитронная плазма ( $e^\pm$ ), поставляемая ветром пульсара; она излучает в диапазоне от радиоволн до гамма-лучей. Свойства такой плазмы мало изучены, что делает ПТ уникальными естественными лабораториями по ее исследованию. Некоторые из ПТ весьма динамичны и расположены близко к Земле, позволяя современным телескопам собирать подробную информацию об их строении, спектрах и эволюции. Наиболее интересны в этом смысле Крабовидная туманность и туманность в созвездии Парусов, сформированные пульсарами PSR B0531+21 и

PSR B0833-45 с собственными именами — Краб и Вела (Crab, Vela). Этими же именами часто называют и сами туманности этих пульсаров, что будет принято и в настоящей работе. Долговременные наблюдения Краба и Велы в мягком рентгеновском диапазоне 0.5–8 кэВ приборами орбитального телескопа Chandra позволили разрешить морфологию и динамику их синхротронного излучения на масштабах, составляющих сотые и даже тысячные доли от их размеров (см., например, Вайскопф и др., 2000; Гельфанд и др., 2001). Это открыло возможности для поиска связи между морфологиями этих ПТ и свойствами породивших их пульсаров, пульсарного ветра, плазмы самих ПТ, и окружающей их среды. Обычно эти свойства не поддаются прямому измерению; они либо неизвестны вовсе, либо сильно модельно-зависимы (т.е. судить о них можно лишь по косвенным признакам). Численное моделирование структуры ПТ с помощью релятивистских магнито-гидродинамических (рМГД) кодов, дополненных моделью синхротронного излучения  $e^\pm$  плазмы, позволяет получить информацию о вышеназванных

\*Электронный адрес: a.e.petrov@mail.ioffe.ru

свойствах через сопоставление модельных карт синхротронного излучения с реальными.

Рентгеновское излучение несет в себе информацию об устройстве внутренней, наиболее динамичной и замагниченной области ПТ. Эту область называют *компактной* туманностью. В работе мы ограничимся компактными ПТ с *джет-торовой морфологией*. Их надувают пульсары с до- или околосвуковой скоростью движения относительно среды. Джет-торовые ПТ бывают *одноторовыми* и *двухторовыми*; прототипом одноторовых является Краб, а двухторовых — Вела. К счастью, обе ПТ видны с Земли в схожей проекции на плоскость неба, что исключает влияние эффекта проекции на различие их рентгеновских морфологий. Более 20 лет с момента запуска Chandra рМГД-модели Краба активно развивались. К настоящему времени усилиями нескольких мировых научных групп разработана весьма реалистичная модель этой одноторовой рентгеновской ПТ (Комиссаров, Любарский, 2004; Дель Занна и др., 2004; Камю и др., 2009; Порт и др., 2014). Некоторые сложности, с которыми эта модель столкнулась, а также ее неспособность объяснить природу двухторовых ПТ, послужили основой нашего интереса к Веле и сподвигли нас на построение ее численной рМГД-модели.

Наше моделирование показало важность учета движения компактной ПТ относительно внешней среды даже для пульсаров с дозвуковой собственной скоростью. Прежние рМГД-модели Краба этим движением пренебрегали (по-видимому, из-за огромной ресурсоемкости вычислений) и считали ПТ покоящейся в центре радиально разлетающегося остатка сверхновой. Учет дополнительных параметров, описывающих движение среды или пульсара, избавил рМГД-модели от недостатков стационарного подхода. В результате модели стали уверенно воспроизводить (ранее невозпроизводимые) рентгеновские особенности Краба: *спрайт* (*Sprite*), *внутреннее кольцо* (*inner ring*) и куполообразную структуру на месте контр-джета (Левенфиш и др., 2021). Для Велы этот учет оказался еще важнее (Пономарёв и др., 2020, 2021, 2023; Фатеева и др., 2023). Наличие внешнего потока в системе покоя пульсара избавило рМГД-модели от чрезмерной турбулентности истечений ПТ. Сильная турбулентность несовместима с регулярностью двойного тора Велы и высокой упорядоченностью ее тороидального магнитного поля (Танг, Шевалье, 2011; Шевалье, Рейнольдс, 2011).

Наше исследование показало, что компактную двухторовую ПТ может надуть пульсар с большим *наклоном* магнитной оси к оси вращения, и низкой *начальной замагниченностью*<sup>1</sup> ветра ( $\alpha \gtrsim 70^\circ$  и  $\sigma_0 \sim 0.01-0.1$  соответственно). Чтобы обеспечить стационарность двойного тора, пульсару нужна помощь внешнего потока. Поток помогает в поддержании двух ключевых условий существования двойного тора — (1) регулярности геометрии ударной волны (УВ) торможения ветра и (2) пересжатости широкого слабомагнитного экваториального истечения почти на всем его протяжении. Эти условия поток обеспечивает путем регуляризации магнитных истечений ПТ. Он меняет их структуру и динамику (действуя как внешняя вынуждающая сила) и мешает им аккумулировать турбулентность, вытягивая с их периферийных участков крупные замагниченные вихри<sup>2</sup>.

Компактная ПТ Вела — яркая двухторовая рентгеновская туманность размером  $\sim 42''$ . Пульсар надул ее после того, как его прежнюю, реликтовую ПТ сбила асимметричная обратная УВ остатка сверхновой. УВ перекатила через пульсар  $\sim 2000$  лет назад (Шевалье, Рейнольдс, 2011; Маттана и др., 2011). С тех пор новая Вела взаимодействует с быстрым северным потоком вещества (остатка), увлеченного этой УВ. В системе покоя пульсара натекающий поток выглядит встречным и трансзвуковым (с числом Маха  $M_s \sim 1.3$ ; Шевалье, Рейнольдс, 2011). Учет взаимодействия Велы с внешним потоком помогает рМГД-моделям этой ПТ не только подавить избыточную магнитную турбулентность и поддержать высокую регулярность магнитного поля, но и воспроизвести двойной тор и прочие необычные особенности рентгеновской морфологии Велы. В их числе — двухчастный наветренный джет и трёхчастный подветренный джет (Пономарёв и др., 2021) с поперечной полоской в начале яркого сегмента (Фатеева и др., 2023) и цепочкой узелков поперек него (Пономарёв и др., 2023).

Помимо влияния на отдельные истечения компактной ПТ, внешний поток может вынудить ее двойной тор реверберировать как целое. В физике ПТ реверберациями называют ангармонические колебания и колыхания туманности как це-

<sup>1</sup> Замагниченностью релятивистского ветра  $\sigma$  называют отношение плотностей потока его магнитной и кинетической энергий. В лабораторной системе отсчета для ветра с плотностью  $\rho$ , давлением  $p$ , переносимого магнитное поле  $B$ , она определяется как  $\sigma = B^2 / (4\pi\Gamma^2 (\rho c^2 / \Gamma + 4p))$ , где  $\Gamma$  — лоренц-фактор течения ветра.

<sup>2</sup> В двухторовых моделях турбулентность начинает аккумулироваться с периферии ПТ (Пономарёв и др., 2020).

лого, сопровождающие ее попеременные сжатия-расширения под напором сильного внешнего потока (см., например, Блондин др., 2001; ван дер Свалюв и др., 2004; Бандиера и др., 2023). В сходящемся потоке могут ревербировать как одноторовые, так и двухторовые ПТ, а в обтекающем — только двухторовые, как будет пояснено ниже. В этой статье мы обсудим, как реверберации сказываются на динамике течений подветренной полусферы двухторовой ПТ, и к каким наблюдаемым проявлениям они могут приводить в Веле.

## 2. ОБЩАЯ СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЙ

Прежде чем обсудить динамику течений, остановимся на их структуре. Обсуждаемые результаты основаны на осесимметричной 2.5D рМГД-модели двухторовой ПТ (Пономарёв и др., 2023); в ее основе лежит модель пульсарного ветра, широко применяемая в современном моделировании ПТ (см., например, Порт и др., 2014; Бюлер, Джиоми, 2016). Параметры модели даны в Приложении, а структура ее течений показана на рис. 1 на примере карт тороидального магнитного поля, давления и скорости. Карты верхнего ряда отвечают упрощенной “стационарной” ПТ покоящегося пульсара (Пономарёв и др., 2019). Эта вспомогательная модель позволяет выявить все характерные истечения двухторовой ПТ, и механизмы их разрушения/поддержания. Экваториальные широты такой ПТ занимает широкое медленное слабозамагниченное истечение. Пересжатое и недорасширенное на всем протяжении, оно помогает обособлению двух быстрых разнополярных магнитных истечений, бегущих по обе его стороны. Не имея возможности сойтись и турбулизоваться, они сохраняют силу и регулярность в замороженном в них тороидальном магнитном поле до самых границ компактной ПТ. Там они резко тормозятся, и каждое разделяется на два регулярных крупномасштабных тороидальных магнитных вихря — *пограничный* с экваториальным потоком и *циркуляционный* на средних широтах.

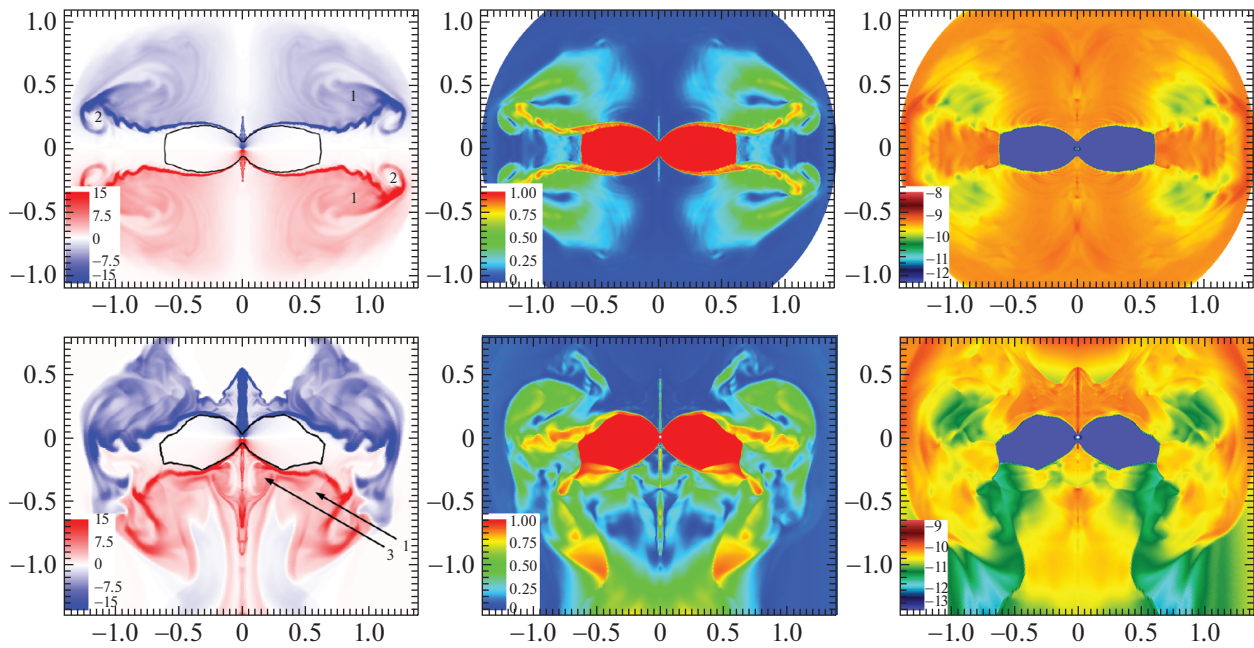
Отметим ключевое различие двухторовых и одноторовых ПТ. Двойной тор образован *регулярными* вихревыми течениями с масштабом порядка размера самой ПТ. Видимость же одиночного тора создается набором *случайных* мелкомасштабных магнитных неоднородностей в турбулентном экваториальном течении (см., например, Камю и др., 2009). Из-за различия их природы реакция одноторовых и двухторовых ПТ на внешнее возмущение принципиально различна. Локальное внешнее возмущение одиночного тора быстро размывается турбулентным потоком и не передается в иные части ПТ. Регулярные квазиламинарные течения

двойного тора способны переносить свое локальное возмущение на значительные расстояния: возмущение, скажем, периферии ПТ может откликнуться в приосевой зоне. Сверх того возмущение одного из торов неизбежно возмутит (с некоторой задержкой) и второй, так как торы коммуницируют посредством пересжатого экваториального течения (выравнивающего свое повышенное давление с окружающей плазмой посредством слабых косых и нормальных УВ).

В нижнем ряду рис. 1 показана структура течений более реалистичной модели двухторовой ПТ, обтекаемой трансзвуковым потоком. Такая ПТ по-прежнему имеет широкий, пересжатый и слабозамагниченный экваториальный пояс. Но внешний поток разрывает ее пограничные вихри, отводит наветренную циркуляцию дальше от оси, и поджимает к оси подветренную. Как следствие, меняется структура джетов, а в подветренной воронке УВ торможения ветра, из взаимодействия джета и циркуляции, возникает еще один регулярный тороидальный магнитный вихрь — рециркуляция. Положение вихрей указано цифрами и стрелками на картах туманности на рис. 1. Поле скоростей плазмы, в котором явно видны вихри и направление их вращения, наложено на магнитные карты на рис. 2.

## 3. СТРУКТУРА ПОДВЕТРЕННОГО ДЖЕТА

Начальный участок подветренного джета заэкранирован от внешнего потока телом компактной ПТ. Однако поток способен влиять на джет через циркуляцию. Поджимая циркуляционный вихрь к оси ПТ, поток определенной силы может вынудить его перекрыть или сильно сузить полярный канал оттока плазмы. В результате джет может быть заперт в объеме ПТ, занятом циркуляционным вихрем. Последний работает словно клапан, который приоткрывает полярный канал лишь тогда, когда внешняя сила позволяет вихрю отступить от оси ПТ (раздел 4). Как следствие, в джете выделяются два различных участка — внутренний (запруженный), и внешний, скудно питаемый редкими прорывами полярного истечения через запруду. Аккумуляция плазмы на запруженном участке делает его головную часть широкой в сечении и сильно замагниченной, а значит, яркой и заметной в рентгене. Циркуляция не только запирает джет, но и увлекает часть поставляемой им плазмы обратно в воронку УВ торможения ветра (см. поле скоростей на рис. 2). Там из нее формируется контр-вихрь — *рециркуляция*. Разрастаясь, этот динамичный контр-вихрь может пережимать начало запруженного участка джета, отделяя его тонкую начальную часть от утолщенной головной



**Рис. 1.** Структура плазменных истечений в модельной двухторовой туманности: стационарной (верхний ряд; Пономарёв и др., 2019) и обтекаемой трансзвуковым потоком с числом Маха 2.3 (нижний ряд; Пономарёв и др., 2023). В колонках с первой по третью приведены карты азимутального магнитного поля (в мкГс), скорости (в единицах  $c$ ) и логарифма давления (в  $\text{дин см}^{-2}$ ). Карты соответствуют моменту времени  $t = 10$  лет с начала надувания ПТ. Параметры моделей: наклонение пульсара  $\alpha = 80^\circ$ , начальная замагниченность ветра  $\sigma_0 = 0.03$  для стационарной модели и  $\sigma_0 = 0.1$  — для трансзвуковой. Трансзвуковая модель надувалась на сетке с адаптивным измельчением (AMR) третьего уровня с начала симуляции (см. Приложение). Стационарная модель развивалась на грубой сетке до выхода на самоподобное расширение ( $\sim 8$  лет), после чего — на сетке с AMR четвертого уровня (см. Пономарёв и др., 2019). Цветовые шкалы подобраны так, чтобы подчеркнуть структуры течений туманности; их крайние значения не отражают максимальных значений представляемых величин. Черные контуры на картах магнитного поля очерчивают зону холодного пульсарного ветра и отмечают приблизительное положение ударной волны его торможения. Черные стрелки на нижней карте указывают на центры двух из трех регулярных, крупномасштабных, сильно замагниченных вихревых торoidalных течений в нижней полусфере модельных туманностей: циркуляции на средних широтах (1), пограничного вихря (2) и рециркуляции (3) в воронке ударной волны. Этим центрам отвечают зоны пониженного давления на картах третьего столбца. Ориентация стрелок совпадает с ориентацией луча зрения земного наблюдателя относительно полярной оси туманности Вела. Направление вращения в вихревых течениях намечено на рис. 2, где на магнитные карты наложены тонкие стрелочки, показывающие поле скоростей магнитных истечений туманности.

(см. магнитную карту в нижнем ряду рис. 1). В тонкой части джета полярное истечение вынуждено ускоряться. Прорвавшись через контр-вихрь, оно резко тормозится при налете на плотную головную часть, из-за чего в месте прорыва возникает квазистационарная УВ<sup>3</sup>. В итоге подветренный джет модельной ПТ состоит из трех частей — едва различимого тонкого начала, яркой и толстой средней части, и тусклого диффузного продолжения вне тела компактной туманности. Заметим, что именно такую трехчастную структуру имеет подветренный (ЮВ) джет Велы (Пономарёв и др., 2021). Его яркий средний участок действительно внезапно об-

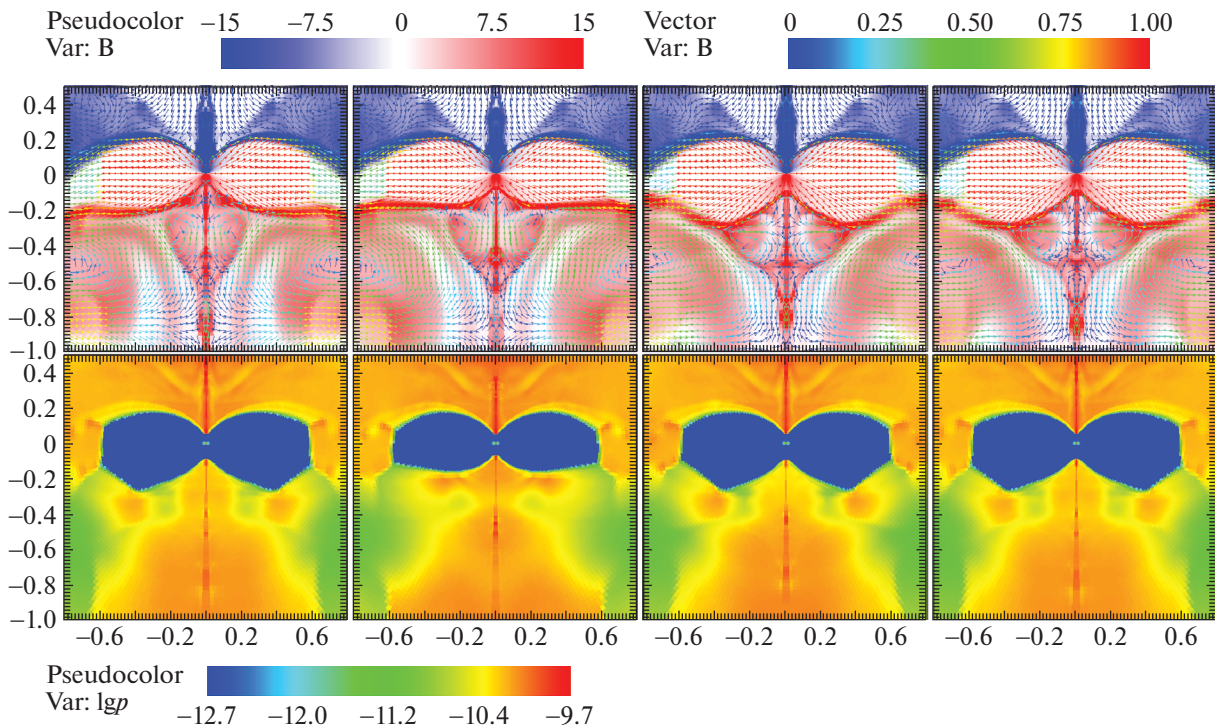
рывается на расстоянии  $\sim 10''5$  от пульсара, сопоставимом с толщиной ЮВ тора Велы ( $\sim 10'' - 12''$ ).

#### 4. ДИНАМИКА ПОДВЕТРЕННОЙ ПОЛУСФЕРЫ

Описанная выше картина не является статичной. Из-за накопления в подветренной воронке УВ торможения ветра избытка плазмы, стянутой циркуляционным вихрем с головной части запруженного участка джета, давление там растет. Это нарастание давления служит возвращающей силой, способной поддерживать квазипериодические осцилляции (суть реверберацию) двойного тора.

С ростом давления в воронке искажается равновесный профиль УВ. Ее касп — ближняя к пульсару точка — смещается в сторону пульсара, и свод

<sup>3</sup> Она, по-видимому, отвечает за поперечную полоску в начале яркого сегмента подветренного джета Велы (Фатеева и др., 2023).



**Рис. 2.** Динамика плазменных истечений в подветренной полусфере модельной двухторовой ПТ. Колонки с первой по четвертую отвечают различным моментам времени и покрывают один цикл квазипериодических осцилляций этой полусферы. Приведены карты азимутального магнитного поля  $B$  в мкГс (вверху, левая верхняя цветовая шкала) и десятичного логарифма давления  $\lg p$  (внизу, в дин·см<sup>-2</sup>; нижняя цветовая шкала) истечений в окрестности подветренного джета. На магнитную карту стрелками наложено поле скоростей плазмы в единицах  $c$  (правая верхняя цветовая шкала). Цветовые шкалы поля и давления подобраны так, чтобы подчеркнуть структуру течений, поэтому их пределы не отражают максимальных и минимальных значений  $B$  и  $p$ .

волны в районе оси укручается (см. рис. 2, первый столбец). Чтобы восстановить равновесное положение, волне необходимо сравнить повышенное давление в области своей воронки. Для этого УВ запускает наружу волну уплощения своего арочного свода. При уплощенном своде циркуляционное течение может глубже заныривать в воронку и эффективнее вычерпывать из нее избыточную плазму с высоким давлением, увлекая эту плазму с собой. Когда волна уплощения добегает до края компактной ПТ, она слегка раздвигает внешний поток. Туманность чуть расширяется, предоставляя своей циркуляции немного больший пространственный объем (второй столбец). Тогда циркуляция отходит от оси, открывает полярный канал, и он отводит наружу компактной ПТ оставшийся в воронке избыток магнитной плазмы (третий столбец). Давление в воронке падает, УВ восстанавливает равновесный профиль, и внешний поток возвращает границу компактной ПТ на прежнее положение, при котором циркуляция вновь запирает джет (четвертый столбец). Цикл начинается заново.

Вместе с фронтом УВ квазипериодическим вариациям подвержены все структуры компактной ПТ, а значит, и ее рентгеновская морфология. Квазипериод осцилляций двойного тора определяется временем оборота подветренного циркуляционного вихря и может составлять от нескольких месяцев до нескольких лет, в зависимости от параметров модели<sup>4</sup>. На основной квазипериод накладывается более короткая квазипериодичность, обусловленная динамикой контр-вихря рециркуляции. Хорошей иллюстрацией квазипериодических изменений структуры подветренной полусферы служат почти гармонические высокоамплитудные осцилляции подветренного каспа УВ (Левенфиш и др., 2021). Наветренный касп таких осцилляций не выказывает, ибо наветренная циркуляция кружит далеко от оси, и наветренный полярный канал всегда открыт, так что плазма в наветренной воронке не копится (ср. стабильность наветренного свода с изменчивостью подветренного на рис. 2). По-

<sup>4</sup> В первую очередь от плотности среды и мощности ветра, определяющих размер туманности.

этому наветренный касп обтекаемой двухторовой ПТ испытывает лишь слабые случайные смещения вдоль оси ПТ, вероятно, в ответ на случайные же вариации окружного напряжения сильного тороидального магнитного поля в основании джета. Такие же случайные смещения испытывают и оба каспа обтекаемой одноторовой ПТ.

## 5. РЕВЕРБЕРАЦИЯ ТОРОВ

Широкое пересжатое экваториальное истечение — неотъемлемая часть двухторовой структуры. Во-первых, оно отвечает за область пониженной рентгеновской яркости между торами (рис. 3). Во-вторых, оно разделяет разнополярные магнитные потоки от края до края ПТ. Без этого разделения потоки перемешались бы и не породили бы два крупных самостоятельных магнитных вихря, лежащих в основе рентгеновских торов из разных полушарий ПТ. В-третьих, экваториальное истечение не только разделяет торы, но и связывает их; оно обеспечивает их согласованный отклик на внешнее возмущение и позволяет компактной двухторовой ПТ реагировать на возмущение как единое целое. Через посредство экваториального истечения квазипериодические осцилляции подветренной полусферы в натекающем потоке передаются с некоторой задержкой истечениям наветренной (и наоборот). В результате торы реверберируют когерентно, и двухторовая ПТ откликается на поток как упругое тело.

Именно этот эффект, по всей видимости, и наблюдается в Веле. На рис. 3 представлены два рентгеновских изображения Велы, разделенных интервалом в 7 мес. На них видно, что арки Велы испытывают пространственное смещение, причем когерентное. В крыльях арок (с полным размахом в  $\sim 42''$ ) амплитуда этого смещения достигает  $2''-4''$  (Каргальцев и др., 2002).

## 6. НАКЛОННЫЙ ПОТОК И ПОВИЛИВАНИЕ ЯРКОГО СРЕДНЕГО СЕГМЕНТА ПОДВЕТРЕННОГО ДЖЕТА

Модельная ПТ Пономарёва и др. (2023), на которой основана настоящая работа, осесимметрична. В такой геометрии невозможно учесть, что в реальных ПТ есть, как правило, четыре несопадающих направления — собственных движений пульсара и среды, и двух осей — вращения у пульсара и полярной у ПТ. В Веле (в проекции на небесную/картинную плоскость) внешний поток натекает с севера; его скорость составляет угол в  $\sim 130^\circ$  с северо-западным концом оси ПТ и угол в  $\sim 120^\circ$  с собственной скоростью пульсара Велы (Додсон и др., 2003). В своей системе покоя пульсар видит этот поток как идущий с северо-востока

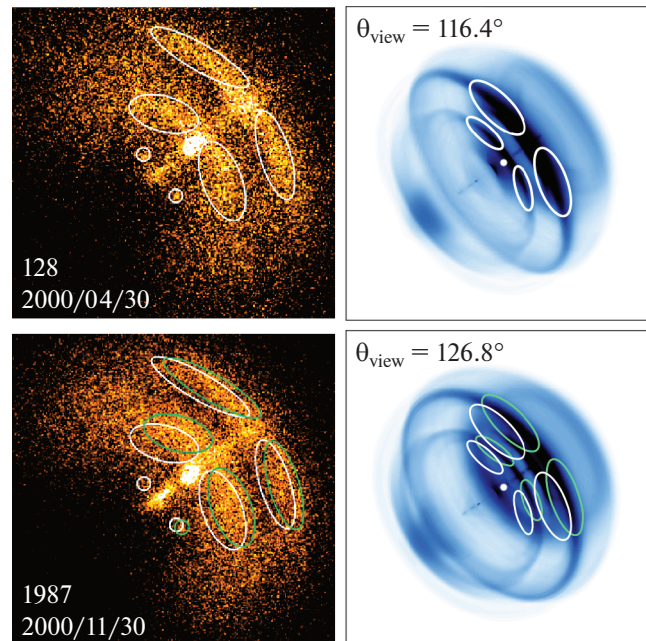
под тупым углом к СЗ концу оси вращения. Это косое падение внешнего потока имеет интересные наблюдательные последствия для динамики течения подветренной полусферы Велы.

При косом падении потока подветренные половинки торов реагируют на возмущения потока с некоторой задержкой относительно наветренных. Как следствие, линии тока подветренной циркуляции сходятся к оси ПТ асинхронно и асимметрично, а точка их схождения оказывается немного не на оси. Напомним, именно эта точка схождения определяет положение головной части яркого среднего участка подветренного джета. Из-за реверберации торов положение этой точки неизбежно будет осциллировать. Начало же среднего участка можно считать почти фиксированным: оно определяется точкой схождения линий тока рециркуляции. Она расположена в самых внутренних областях ПТ, реагирующих на внешние возмущения намного слабее наружных. В результате яркий средний участок джета, начало которого зафиксировано, а конец — квазипериодически смещается, должен повиливать, как купированный (укороченный) собачий хвостик. Интересно, что яркий участок подветренного джета Велы ведет себя именно таким образом (рис. 4).

## 7. ПРЕЦЕССИЯ ДВОЙНОГО ТОРА?

Свойства модельных двухторовых ПТ — высокая упорядоченность магнитного поля на масштабах всей ПТ, пересжатость экваториального пояса от края до края ПТ, регулярность и крупномасштабность циркуляционных истечений на средних широтах — предполагают, что двухторовые рентгеновские ПТ могут быть менее сжимаемыми и более связными объектами, чем одноторовые (при одинаковой мощности ветра и свойствах внешней среды). Весьма вероятно, что двухторовая структура может не только реверберировать, но и прецессировать в косом внешнем потоке. Чтобы подтвердить или опровергнуть это предположение, нужны трехмерные расчеты.

Между тем в поведении Велы уже просматриваются признаки, указывающие на возможную прецессию. Смещения рентгеновских деталей туманности на картах одиннадцати отдельных наблюдений Chandra 2000–2010 г. создают впечатление, что ее двухторовая структура не просто колеблется взад-вперед вдоль своей оси, но и слегка меняет угол наклона этой оси к лучу зрения наблюдателя. Независимые группы исследователей: Гельфанд и др. (2001) и Энг и Романи (2004), анализируя двойной тор Велы, по-разному оценили наклон его оси к лучу зрения наблюдателя:  $126.8^\circ$  и  $116.4^\circ$  соответственно. Возможно, это различие связано



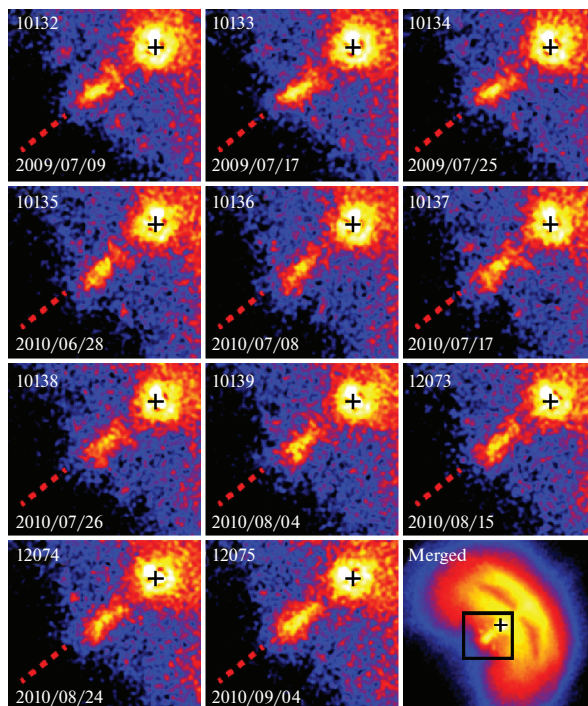
**Рис. 3.** Динамика (реверберация + прецессия) двойного тора Велы в трансзвуковом внешнем потоке. *Слева:* рисунок, аналогичный рис. 1 из работы Павлова и др. (2001). Представлены два рентгеновских изображения Велы, полученные с интервалом в 7 мес (наблюдения телескопа Chandra; даты и идентификаторы наблюдений — на рисунке). Белые эллипсы очерчивают положение крыльев арок, белые кружки — рентгеновских узелков Велы на 30.04.2000; зеленые контуры — положение их же на 30.11.2000. Амплитуда смещений арок за 7 мес —  $\approx 2''$ , за исключением левого (восточного) крыла нижней (юго-восточной) арки, у которого она достигает  $4''$ . *Справа:* карты синтетического синхротронного излучения рМГД-модели Велы, иллюстрирующие изменение рентгеновской морфологии модельной ПТ при изменении ее проекции на плоскость неба наблюдателя. В данном примере позиционный угол между проекцией оси ПТ и направлением на север был зафиксирован, а угол  $\theta_{\text{view}}$  между этой осью и лучом зрения наблюдателя варьировался. На верхней панели  $\theta_{\text{view}} = 116.4^\circ$  (по оценке Энга, Романи, 2004), а на нижней —  $\theta_{\text{view}} = 126.8^\circ$  (по оценке Гельфанда и др., 2001). Белые и зеленые эллипсы, аналогично таковым на левой панели, иллюстрируют смещение крыльев арок. На всех панелях север находится в верхней части рисунка.

не с погрешностями оценок, а с реальным покачиванием оси симметрии двойного тора вокруг равновесного положения, задаваемого осью вращения пульсара. Предположив, что ось вращения составляет угол в  $120^\circ$  с лучом зрения, а вышеозначенные оценки близки к крайним положениям оси симметрии при прецессии, мы построили ряд синхротронных изображений модельной туманности Велы, варьируя угол зрения и позиционный угол с амплитудой в  $5^\circ$  — и получили вариации положения торов, похожие на наблюдаемые (см. иллюстрацию на рис. 3).

Дюран и др. (2013), анализируя динамику наветренного джета Велы, пришли к выводу, что джет описывает спираль с углом раствора около  $10^\circ$ , и что это может быть следствием прецессии. Наши результаты согласуются с этим выводом, с той лишь разницей, что джет прецессирует вместе с компактной ПТ (частью которой он является), а не из-за прецессии нейтронной звезды. Отсутствие схожей динамики у подветренного джета Велы также легко объяснимо в нашей модели. Согласно

ей, внешний участок подветренного джета двухторовых ПТ находится уже *вне* тела компактной туманности; он состоит из череды несвязанных клочков замагниченной плазмы (образовавшихся при редких прорывах джета через подветренную циркуляцию), которые пассивно сносятся внешним потоком, постепенно сливаясь с ним (Пономарёв и др., 2021).

Для выяснения того, чем именно вызвано изменение положения рентгеновских структур (причем, не только торов) на каждом из одиннадцати изображений туманности Вела — реверберацией, прецессией или же их комбинацией — нужны трехмерные расчеты. До проведения таких расчетов авторы не считают себя вправе делать какие-либо заключения. Согласно нашему пониманию, смещения отдельных структур Велы от наблюдения к наблюдению, скорее всего, обусловлены комбинацией прецессии и реверберации. Какой из эффектов — прецессия или реверберация — дает наибольший вклад в различие положений торов на двух отдельных наблюдениях Велы, очевидно,



**Рис. 4.** Динамика среднего сегмента подветренного джета Велы. (Наблюдения телескопа Chandra; даты и номера наблюдений в архиве телескопа — на изображениях). Цветовая шкала подобрана так, чтобы подчеркнуть динамику деталей подветренного джета, изображение в правом нижнем углу — слито по данным этих наблюдений (показан общий вид ПТ Вела, черный квадрат — положение области, показанной на остальных панелях). Черный крест — положение пульсара Вела, красная штриховая линия приведена как ориентир.

зависит от разницы во времени между этими наблюдениями. Если разница составляет несколько дней или одну-две недели, смещения, скорее всего, обусловлены реверберацией. Если же разница составляет полгода, и при этом двухторвая структура выказывает явственное изменение проекции своей оси на небесную плоскость (как на двух наблюдениях на рис. 3), то основной вклад в смещение вносит, скорее всего, прецессия.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как сама пульсарная туманность, так и окружающий ее остаток сверхновой проходят несколько этапов эволюции. На одном из них сходящаяся внутрь остатка обратная ударная волна сверхновой сталкивается с пульсарной туманностью, вынуждая последнюю реверберировать как целое. Подобное столкновение моделировалось в целом ряде работ (см., например, Блондин и др., 2001; Торрес и др., 2019; Бандиера и др., 2023, и приведенные там ссылки). Поскольку этот этап эволюции ПТ может длиться от нескольких сотен до нескольких тысяч лет (напр., ван дер Свалув и др. 2004), ранее неявно предполагалось, что наблюдения ревербераций

ПТ как таковых в режиме реального времени маловероятны<sup>5</sup>. Однако наше исследование показало, что это не так.

На основе численного рМГД моделирования структуры и динамики истечений пульсарных туманностей мы выяснили следующее. (1) ПТ могут реверберировать как целое не только под действием сходящейся ударной волны, но и при обычном движении относительно внешней среды. (2) При движении реверберируют только ПТ с джетторвой рентгеновской морфологией, причем только те из них, у которых имеется *двойной* рентгеновский тор. Мы также отметили, что (3) двухторвые рентгеновские туманности могут не только реверберировать, но и прецессировать при движении относительно внешней среды, и что это обстоятельство нужно учитывать при интерпретации наблюдений двухторвых объектов.

Мы обратили внимание читателей, что на сегодняшний день уже известна одна двухторвая

<sup>5</sup> Мы оставляем в стороне обсуждение изменений в эффективности излучения и спектрах ПТ в фазе реверберации, которые, в принципе, могут быть наблюдаемы (см., например, Торрес и др., 2019).

ПТ — Вела, в которой эффекты прецессии и реверберации, по всей видимости, уже наблюдаются в режиме реального времени. Мы проиллюстрировали эффект прецессии на примере модельной туманности и показали, что наша модель способна качественно объяснить изменение проекции оси симметрии двойного тора Велы, наблюдаемое рентгеновским телескопом *Chandra* на временах порядка 7 мес (рис. 3). Мы также пояснили, какие морфологические и динамические особенности Велы, по всей видимости, связаны с ее реверберацией и прецессией. Среди этих особенностей — квазипериодические когерентные смещения крыльев двух ярких рентгеновских арок (выявленные в работах Павлова и др., 2001, и Каргальцева и др., 2002), квазипериодическое “повиливание” яркого среднего сегмента юго-восточного джета (рис. 4), а также квазипериодические прорывы этого джета за пределы компактной джет-торовой структуры (проиллюстрированные в работе Пономарёва и др., 2021). Обсуждаемая в работе Дюрана и др. (2013) спиральная структура северо-западного джета Велы также, по-видимому, является следствием прецессии ее двойного тора. Для анализа этой прецессии нужны трехмерные рМГД модели туманностей, которые учитывают тот факт, что внешний поток может натекать на туманность под углом к оси симметрии двойного тора (равновесное положение этой оси задается направлением оси вращения пульсара).

### ПРИЛОЖЕНИЕ

Численные модели двухторовых ПТ построены на базе рМГД модуля кода PLUTO (Миньоне и др., 2007). Размерность моделей — 2.5D (осесимметричные модели, с независимым моделированием “северной” и “южной” полусфер туманности); сетка — сферическая  $(r, \theta)$  с логарифмически растущим шагом по  $r$  и равномерным по  $\theta$ . Область моделирования:  $r = (0.0002 - R)$  св. лет. Базовая сетка содержит  $N$  узлов по  $r$  и 32 по  $\theta$ . Адаптивное измельчение сетки (AMR) уровня  $L$  включалось в момент  $t_1$  (в годах). Наклонение пульсара:  $\alpha = 80^\circ$ . Начальная замагниченность ветра:  $\sigma_0 = 0.03$  — в модели M1 (рис. 1, вверху), и  $\sigma_0 = 0.1$  — в моделях M2 (рис. 1, внизу) и M3 (рис. 2). Параметры моделей:

$$M1 : R = 1.40, N = 88, t_1 = 8, L = 4;$$

$$M2 : R = 3.13, N = 96, t_1 = 0, L = 3;$$

$$M3 : R = 3.13, N = 96, t_1 = 6, L = 2.$$

Плотность внешней среды  $\rho_a = 10^{-28} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ . Мощность ветра нормирована на темп потерь вращательной энергии пульсара Вела:  $\dot{E} = 6.9 \times 10^{36} \text{ эрг с}^{-1}$ . Модель ветра и способ расчета карт

синхротронного излучения подробно изложены в статье Пономарёва и др. (2023) и аналогичны таковым в моделях других авторов (см., например, Порт и др., 2014; Бюлер, Джиоми, 2016).

Авторы благодарят анонимного рецензента за внимательное прочтение работы и ряд полезных замечаний, а также разработчиков кода PLUTO (Миньоне и др., 2007). Численное рМГД моделирование ПТ выполнено А.Е. Петровым при поддержке гранта РНФ № 21-72-20020. Анализ наблюдательных данных ПТ Вела выполнен К.П. Левенфиш и Г.А. Пономарёвым в рамках базового проекта № 0040-2019-0025 ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Численное моделирование частично выполнено на подсистеме “Торнадо” суперкомпьютерного центра СПбПУ Петра Великого, частично — с использованием ресурсов МСЦ РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бандиера и др. (R. Bandiera, N. Bucciantini, B. Olmi, and D.F. Torres), *MNRAS* **525**, 2839 (2023).
2. Блондин и др. (J.M. Blondin, R.A. Chevalier, and D.M. Frierson), *Astrophys. J.* **563**, 806 (2001).
3. Бюлер, Джиоми (R. Bühler and M. Giomi), *MNRAS* **462**, 2762 (2016).
4. Вайсскопф и др. (M.C. Weisskopf, J.J. Hester, A.F. Tennant, R.F. Elsner, N.S. Schulz, H.L. Marshall, M. Karovska, J.S. Nichols, et al.), *Astrophys. J.* **536**, L81 (2000).
5. ван дер Свалуу и др. (E. van der Swaluw, T.P. Downes, and R. Keegan), *Astron. Astrophys.* **420**, 937 (2004).
6. Гельфанд и др. (D.J. Helfand, E.V. Gotthelf, and J.P. Halpern), *Astrophys. J.* **556**, 380 (2001).
7. Дель Занна и др. (L. Del Zanna, E. Amato, and N. Bucciantini), *Astron. Astrophys.* **421**, 1063 (2004).
8. Додсон и др. (R. Dodson, D. Legge, J.E. Reynolds, and P.M. McCulloch), *Astrophys. J.* **596**, 1137 (2003).
9. Дюран и др. (M. Durant, G.G. Pavlov, O. Kargaltsev, J. Kropotina, and K. Levenfish), *Astrophys. J.* **763**, 72 (2013).
10. Камю и др. (N.F. Camus, S.S. Komissarov, N. Bucciantini, and P. Hughes), *MNRAS* **400**, 1241 (2009).
11. Каргальцев и др. (O. Kargaltsev, G.G. Pavlov, D. Sanwal, and G.P. Garmire), *ASP Conf. Ser.* **271** (Ed. P.O. Slane, B.M. Gaensler, San Francisco: ASP, 2002), p. 181.
12. Комиссаров, Любарский (S.S. Komissarov and Y.E. Lyubarsky), *MNRAS* **349**, 779 (2004).
13. Левенфиш и др. (K.P. Levenfish, G.A. Ponomaryov, A.E. Petrov, et al.), *J. Phys.: Conf. Ser.* **2103**, 012020 (2021).
14. Маттана и др. (F. Mattana, D. Götz, R. Terrier, L. Bouchet, G. Ponti, M. Falanga, M. Renaud, I. Caballero, et al.), *Astrophys. J.* **743**, L18 (2011).

15. Миньоне и др. (A. Mignone, G. Bodo, S. Massaglia, T. Matsakos, O. Tesileanu, C. Zanni, and A. Ferrari), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **170**, 228 (2007).
16. Павлов и др. (G.G. Pavlov, O. Kargaltsev, D. Sanwal, and G.P. Garmire), *Astrophys. J.* **554**, L189 (2001).
17. Пономарёв и др. (G.A. Ponomaryov, K.P. Levenfish, and A.E. Petrov), *J. Phys.: Conf. Ser.* **1400**, 022027 (2019).
18. Пономарёв и др. (G.A. Ponomaryov, K.P. Levenfish, A.E. Petrov, and Yu.A. Kropotina), *J. Phys.: Conf. Ser.* **1697**, 012022 (2020).
19. Пономарёв и др. (G.A. Ponomaryov, K.P. Levenfish, and A.E. Petrov), *J. Phys.: Conf. Ser.* **2103**, 012021 (2021).
20. Пономарёв (Г.А., Фурсов А.Н., Фатеева С.С. и др.), *Письма в Астрон. журн.* **49**, 140 (2023) [G.A. Ponomarev, et al., *Astron. Lett.* **49**, 65 (2023)].
21. Порт и др. (O. Porth, S.S. Komissarov, and R. Keppens), *MNRAS* **438**, 278 (2014).
22. Танг, Шевалье (X. Tang and R.A. Chevalier), *Astrophys. J.* **752**, 83 (2012).
23. Торрес и др. (D.F. Torres, T. Lin, and F. Coti Zelati), *MNRAS* **486**, 1019 (2019).
24. Шевалье, Рейнольдс (R.A. Chevalier and S.P. Reynolds), *Astrophys. J.* **740**, L26 (2011).
25. Фатеева (С.С., Левенфиш К.П., Пономарёв Г.А. и др.), *Письма в Астрон. журн.* **49**, 130 (2023) [S.S. Fateeva, et al., *Astron. Lett.* **49**, 56 (2023)].
26. Энг, Романи (C.-Y. Ng and R.W. Romani), *Astrophys. J.* **601**, 479 (2004).