

Отдел Релятивистской астрофизики

Отчет – 2015-2019 гг

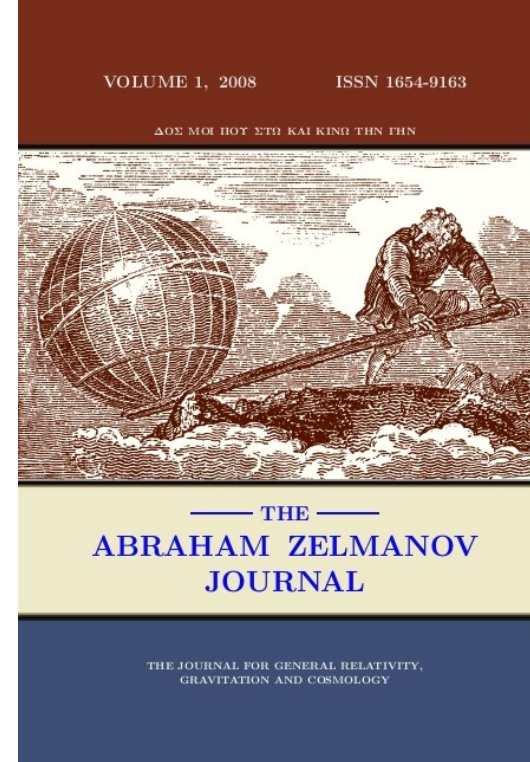
+

Программа – 2020-2024 гг



Отдел Релятивистской астрофизики ГАИШ
МГУ им. М. В. Ломоносова был организован
академиком Я. Б. Зельдовичем в 1980 г.

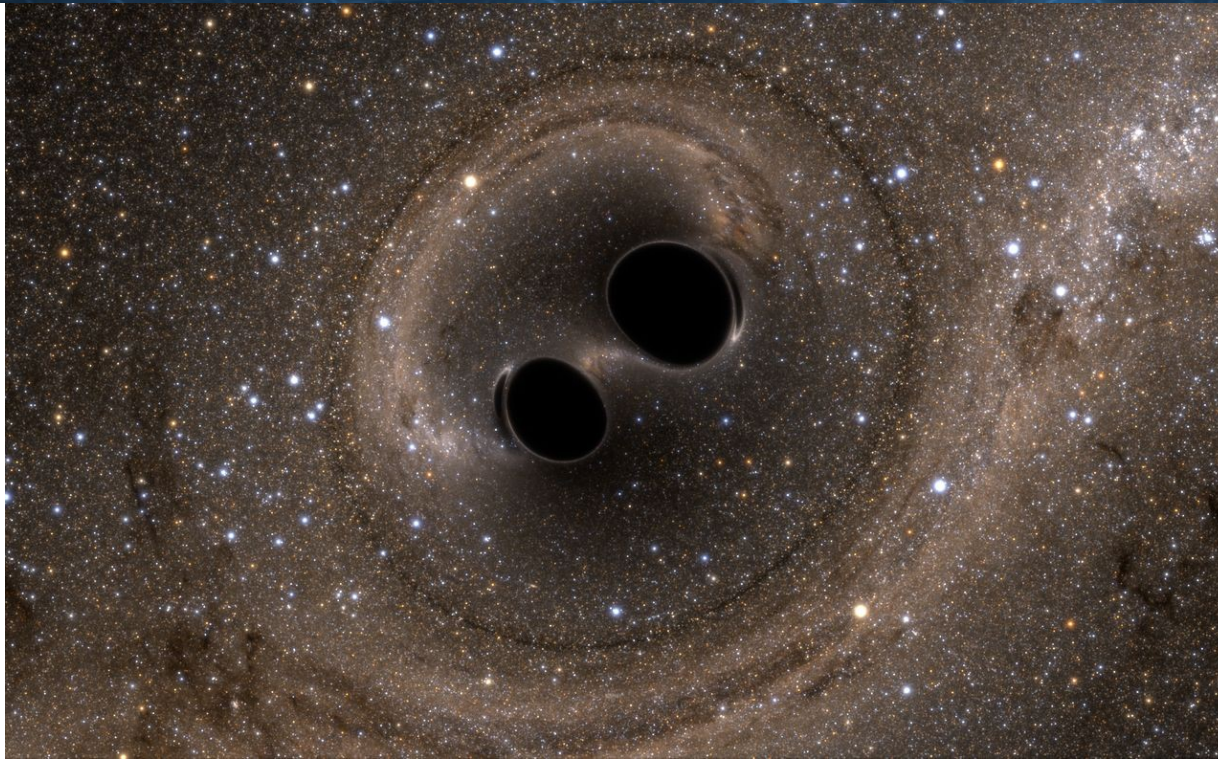






Современная космология и гравитационно-волновая астрономия

Москва, ГАИШ МГУ, 16-18 ноября 2016



Конференция проводится в связи с фундаментальным научным открытием — экспериментальным обнаружением гравитационных волн от астрофизических источников — сливающихся массивных черных дыр, ознаменовавших рождение новой области науки — гравитационно-волновой астрономии.

Из постановления президиума РАН от 11.02.2014

Учредить золотую медаль имени академика Я. Б. Зельдовича, присуждаемую Российской академией наук за выдающиеся работы в области физики и астрофизики

Присвоить имя академика Я. Б. Зельдовича одной из улиц г. Москвы

Установить мемориальные доски в память об академике Я. Б. Зельдовиче

на здании института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН,

на здании института космических исследований РАН,

на здании института химической физики им Н. Н. Семёнова РАН



В настоящее время в отделе работают 20 штатных сотрудников, в том числе 5 аспирантов

Среди них:

- ✧ 1 заведующий отделом
- ✧ 1 главный научный сотрудник
- ✧ 6 ведущих научных сотрудников
- ✧ 3 старший научный сотрудник
- ✧ 2 научных сотрудника
- ✧ 7 ведущих инженеров, среди них 3 аспиранта
- ✧ 2 ведущих программистов-аспирантов

Кроме того члены научной школы ректора МГУ:

- ✧ 9 студентов

Защищены три кандидатские (Дядина, Маланчев, Раздобурдин) и одна докторская (Пширков) диссертации

Гранты, полученные сотрудниками отдела (2015—2020)

Научная школа МГУ:

- 2018-2019, 2019-2020, сорук. Н.И. Шакура

РФФИ:

≈ 3 гранта, рук. Н. И. Шакура

≈ 2 гранта, рук. К. А. Постнов

≈ 1 грант, рук. С.О. Алексеев

≈ 1 грант, рук. П.И. Дядина

≈ 1 грант, рук. М.И. Горностаев

РНФ:

≈ 2 гранта, рук. Шакура

≈ 1 грант, рук. Постнов

Грант президента:

- 1 грант, М.С. Пширков

Научная тематика отдела

- ✧ Космология
- ✧ Теория гравитации
- ✧ Астрофизика чёрных дыр и нейтронных звёзд

М. В. Сажин и О. С. Сажина

Кандидаты в космические струны, найденные в радиоданных космических миссий WMAP и PLANCK, проанализированы оптическими методами. Из всего множества оптических кандидатов выбран один, наиболее достоверный для дальнейших исследований. Разработаны уравнения релятивистской редукции для низкоорбитальных спутников с целью исследования гравитационного поля Земли. Разработан совместный российско-китайский проект космического детектора гравитационных волн в виде кластера спутников TIAN QIN. Получено точное решение для масштабного фактора во Вселенной, доминированной пылью и темной энергией.



М. В. Сажин является соруководителем общемосковского семинара им. Л. А. Зельманова. О. С. Сажина — секретарь этого семинара

М. В. Сажин и О. С. Сажина

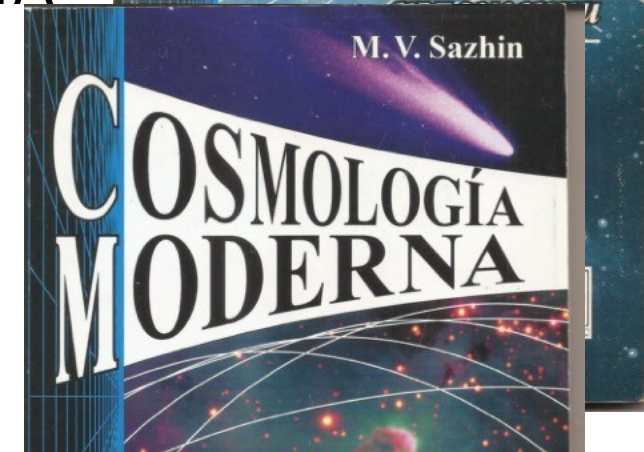
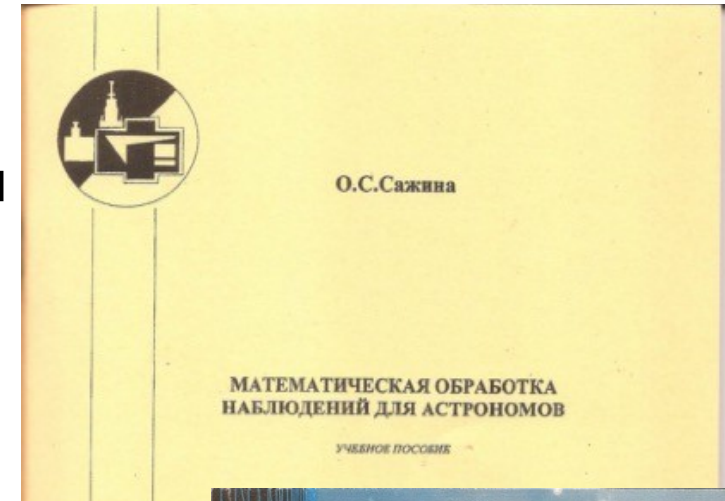
М. В. Сажин читает ежегодные спецкурсы «Современная космология» и «Общая теория относительности для астрономов»

О. С. Сажина читает обязательный курс «Математическая обработка наблюдений» и спецкурсы «Математическая обработка наблюдательных и экспериментальных данных», «Космические струны в современной космологии»

М. В. Сажин удостоен премии имени М. В. Ломоносова I степени, МГУ, 2012 г.

М.В. Сажин является иностранным членом SOCIETÀ NAZIONALE DI SCIENZE, LETTERE E ARTI IN NAPOLI с 2014 года

О. С. Сажина удостоена премии имени И.И. Шувалова II степени, МГУ, 2014 г.

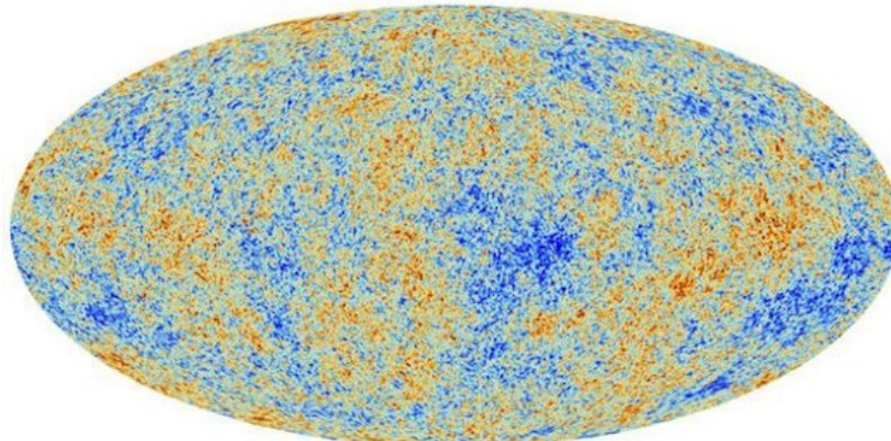


М. В. Сажин и О. С. Сажина

План работ на 2020 — 2024 годы:

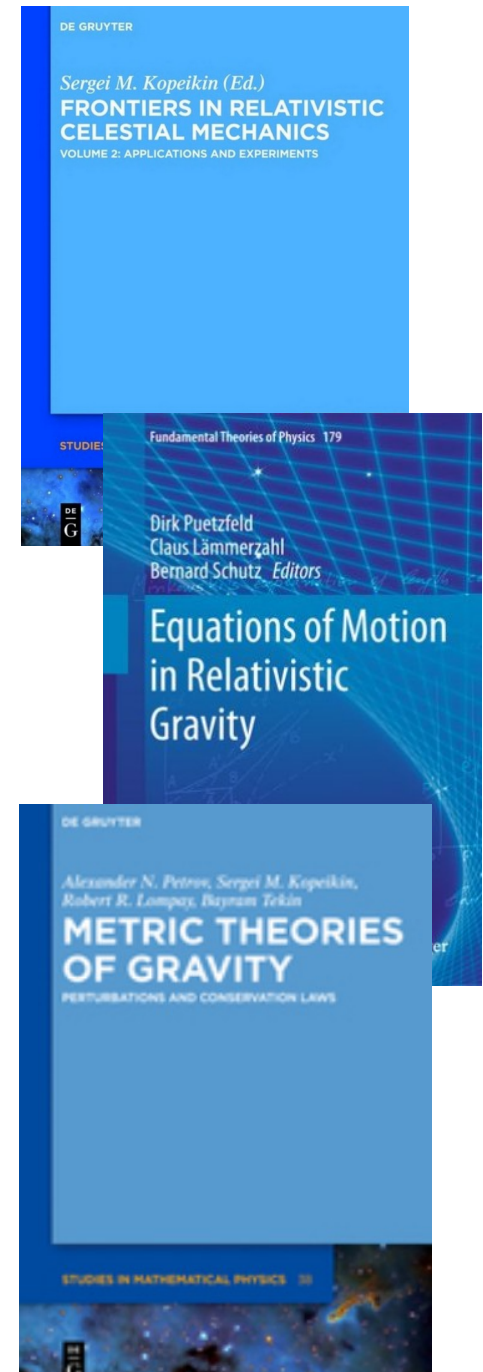
Планируются поиск и изучение космических струн. Исследования будут состоять из двух частей: теоретических и наблюдательных. В теоретических исследованиях будут рассмотрены связь космических струн и суперструн, а также наблюдательные проявления космических струн. В наблюдательных исследованиях предполагаются спектроскопические и морфологические исследования с высоким угловым разрешением кандидатов в гравитационно-линзовые события. Обнаруженный статистический избыток гравитационно-линзовых пар указывает на существование космической струны в исследуемом поле небесной сферы.

Будут рассмотрены эффекты теории относительности для измерений гравитационного поля Земли в экспериментах на низких околоземных орбитах.



А. Н. Петров

- Изучены черные дыры Маеды-Дэдича на предмет возможности их детектирования;
- Исследованы решения черных дыр постоянной кривизны и установлено, что они не представляют реальных физических объектов;
- Методами теоретико-полевого подхода смоделирован непрерывный коллапс к точечной массе в пространстве Минковского, представляющей шварцшильдову черную дыру;
- построены сохраняющиеся токи и суперпотенциалы для произвольных возмущений на произвольно искривленных фонах в теории Лавлока.
- Соавтор трех монографий



А. Н. Петров

План работ на 2020 — 2024 годы

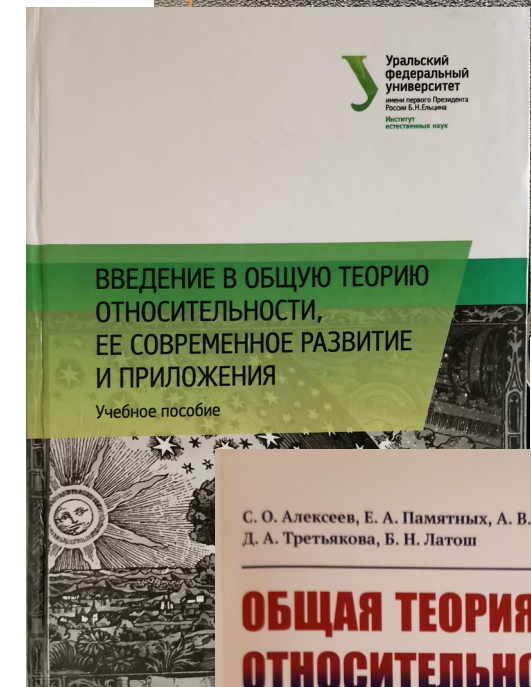
- 1) Продолжение исследований свойств телепараллельных теорий гравитации: построение законов сохранения и их приложения в рамках различных физических моделей.
- 2) Развитие теоретико-полевого подхода в гравитации Лавлока и использование теоретических результатов для изучения характеристик известных точных решений.



С. О. Алексеев

Рассмотрены ограничения на модель Старобинского с исчезающей космологической постоянной, показано полное соответствие предсказание этой модели и ОТО на существующем уровне точности получения наблюдательных данных. В продолжение работы в 2019м году окончательно получены ограничения на значения констант связи скалярных полей в модели Хорндески

Рассмотрены физические эффекты, возникающие при добавлении в разложение членов следующего порядка малости, пропорциональных r^{-3} . При этом, за счет расширения пространства параметров модели, появляются новые виды теней, отсутствующие в рассмотрении предыдущих авторов. Таким образом, подобное расширение решения Рейсснера-Нордстрема способствует расширению возможностей интерпретации наблюдательных результатов проектов Black Hole Cam и Event Horizon Telescope, новые результаты все с нетерпением ожидают.



С. О. Алексеев

План работ на 2020—2024 годы:

В ближайшие 5 лет мы планируем сосредоточиться на задаче объединения тестов современных теорий гравитации на разных масштабах в единую систему. В настоящее время разработаны и используются тесты в Солнечной системе (параметризованный пост-ньютоновский формализм), с использованием пульсаров (пост-кеплеровский формализм), теней от черных дыр и их различных интерпретаций. На больших расстояниях мы планируем использовать независимые способы вычисления радиуса разворота для оценки соответствия теорий данным по ускоренному расширению Вселенной, моделям с космологической постоянной, а также оценки радиуса Вайнштейна. Мы планируем адаптировать это направление для дальнейшего развития моделей гравитации с конформной симметрией, а также теорий Хорндески в различных реализациях.



М. С. Пширков

1. Внегалактические магнитные поля. Из наблюдений фарадеевских мер вращения внегалактических источников получены лучшие на сегодняшний день ограничения на силу внегалактических магнитных полей ($\sim \text{нГс}$ для длины когерентности Мпк).
2. “Пузыри Ферми” в M31. Обнаружен протяженный избыток гамма-излучения высоких энергий вокруг галактики M31 и исследована его морфология, которая напоминает морфологию «пузырей Ферми» в Галактике. Это может свидетельствовать о широкой распространённости данного феномена во Вселенной.
3. Гамма-излучение от систем с сталкивающимся звёздным ветром. В данных гамма-телескопа Fermi LAT было обнаружено излучение в диапазоне высоких энергий, пространственно совпадающее с двойной системой типа WR+O (WR11, Гамма² Парусов) с спектром, схожим с спектром единственного на данный момент известного источника среди систем такого типа (система Эта Киля).

М. С. Пширков

План работ на 2020—2024 годы:

1. Исследование переменных источников в различных диапазонах (радио, рентгеновский, гамма) с использованием данных XMM-Newton, Fermi LAT, БСА ПРАО АКЦ ФИАН и др.
2. Исследование анизотропии распределения космических лучей сверхвысоких энергий ($>10^{18}$ эВ) на различных масштабах и поиск их астрофизических источников.
3. Исследование свойств быстрых радиовсплесков и постановка ограничений на их модели.



П. И. Дядина

- Показано, что помимо квадрупольного гравитационного излучения, совпадающего с общей теорией относительности (с точностью до величины эффективной гравитационной постоянной), подкласс теории Хорндески с массивным скалярным полем (без учета экранирования) предсказывает наличие скалярного монопольного, дипольного, квадрупольного и диполь-октупольного излучений.
- Найдено, что масса скалярного поля гибридной $f(R)$ -гравитации не превышает $2 \times 10^{(-19)}$ эВ.
- Установлено, что наличие легкого скалярного поля в гибридной $f(R)$ -гравитации не противоречит наблюдательным данным для всех 10 постньютоновских параметров.
- В 2019 защитила кандидатскую диссертацию

П. И. Дядина

План работ на 2020—2024 годы:

- Доказать равенство постньютоновского параметра γ , вычисленного напрямую из метрики, и параметра γ , полученного из задержки Шапиро, для всех массивных скалярно-тензорных теорий.
- Разработать параметризованный посткеплеровский формализм для гибридной $f(R)$ -гравитации.
- Вычисление формы гравитационно-волновых сигналов в постньютоновском приближении для теории Хорндески.



А. В. Топоренский

1. Построена модель компактификации дополнительных измерений в теории гравитации Эйнштейна - Гаусса - Бонне, не требующая тонкой подстройки начальных данных.
2. Определены области начальных данных в моделях инфляции на поле Хиггса и инфляции Старобинского, приводящие к инфляционным решениям.
3. Исследованы космологические решения в модифицированной телепараллельной гравитации.

План работ на 2020—2024 годы:

1. Распространить результаты п.2 на ситуацию с ненулевой пространственной кривизной.
2. Распространить результаты п.1 на гравитацию с высшими Лавлоковскими членами.
3. Исследовать космологические возмущения в модифицированной телепараллельной гравитации.



С. Б. Попов

В 2015-2019 гг. был решен ряд задач, связанных с эволюцией магнитных полей нейтронных звезд: построены популяционные модели для эволюции радиопульсаров с учетом затухания поля, изучено поведение полей молодых нейтронных звезд после эпизода мощной возвратной аккреции, интерпретированы данные по рентгеновскому пульсару SXP1062, а также проанализированы возможности проявления стадии холловского аттрактора в одиночных и двойных нейтронных звездах. Кроме того, были рассмотрены наблюдательные следствия пульсарной модели быстрых радиовсплесков и написаны обзоры, посвященные этому типу транзиентов.

С. Б. Попов

План работ на 2020—2024 годы:

Основные направления планируемых исследований на ближайшие пять лет включают в себя эволюцию нейтронных звезд, в том числе изучение влияния изменения магнитного поля на наблюдаемые параметры нейтронных звезд; быстрые радиовсплески; исследования экзопланет. Особое внимание будет уделяться различным аспектам эволюции нейтронных звезд, которые можно будет исследовать с помощью инструментов спутника Спектр-РГ.



А. Г. Куранов, К. А. Постнов

- ✧ Расчет частоты взрывов SN Ia, обусловленных слиянием пар карликов, различающихся по химическому составу компонентов — гелиевых, углеродно-кислородных и гибридных. (Юнгельсон, Куранов, 2017, MNRAS 464, 1607Y);
- ✧ Расчет распределения нейтронных звезд по начальным периодам с использованием двузонной модели (ядро - оболочка) эволюции вращения звезд и одновременным учетом эволюции в двойных системах. (Postnov et al. 2016, MNRAS 463, 1642P)
- ✧ Серия работ, посвященных расчету темпа слияний и ожидаемых распределений по параметрам (массам и спинам) сливающихся двойных черных дыр и пока не открытых двойных систем из черных дыр в паре с нейтронными звездами с учетом эволюции темпа звездообразования и металличности звезд во Вселенной. (Постнов, Куранов (2018, Ядерная Физика 81,1) и Postnov, Kuranov (2019, MNRAS 483, 3288P)).

А. Г. Куранов, К. А. Постнов

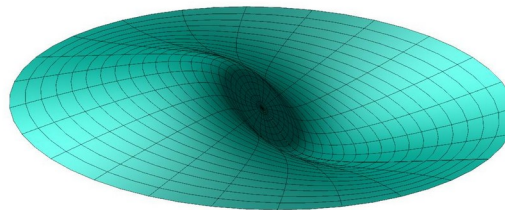
План работ на 2020—2024 годы:

Дальнейшая работа планируется в области моделирования эволюции различных классов рентгеновских источников с учетом магнито-вращательной эволюции нейтронных звезд и различными режимами взаимодействия с окружающей плазмой (построение функции рентгеновской светимости рентгеновских источников в галактике).



В. В. Журавлёв

Совместно с Ивановым П.Б. и Папалойзу Дж. исследована динамика искривленного аккреционного диска, сформировавшегося в результате разрыва звезды после ее сближения с вращающейся сверх-массивной черной дырой. Форма диска определялась как результат совместного действия на вещество диска гравитомагнитной силы и ударной силы струи, поставляющей в диск вещество с моментом импульса, несоосным с вращением черной дыры. Показано, что на радиусе, где струя бьет в диск, его наклон по отношению к экваториальной плоскости черной дыры может составлять значительную долю от величины наклона самой струи, что влечет за собой важные наблюдательные следствия, которые в будущем могут быть использованы для независимого определения физических параметров сверх-массивных черных дыр.



В. В. Журавлёв

План работ на 2020—2024 годы:

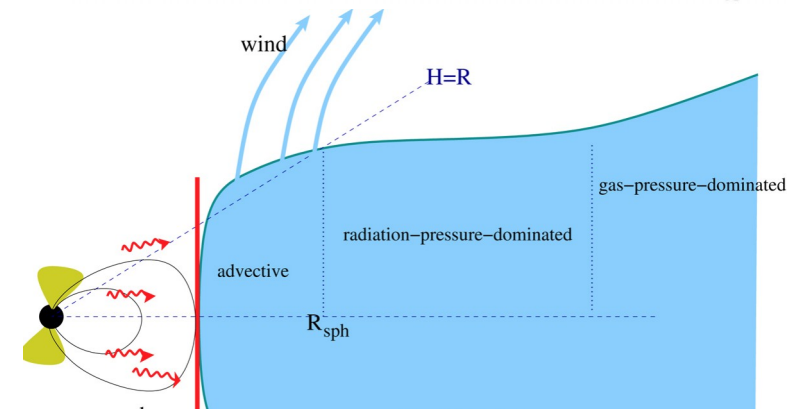
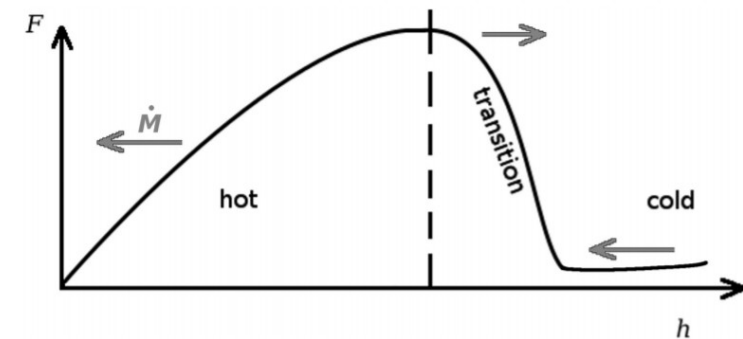
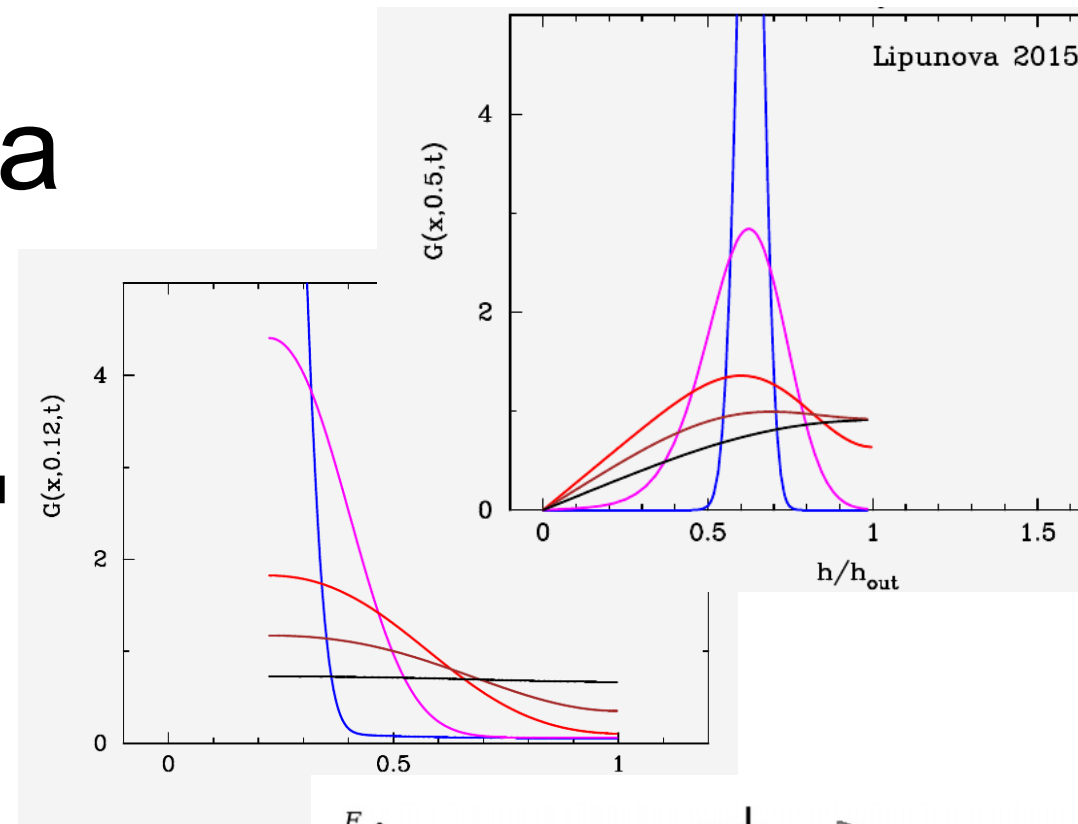
- ✂ Планируется исследование гидродинамических механизмов роста пылевых сгущений в протопланетных дисках и роль этих механизмов в образовании планетезималей.



Г. В. Липунова

- Вывод функции Грина вязкого аккреционного диска с ограниченным внешним радиусом и нулевым или конечным внутренним радиусом.
- Построение численной модели вспышки рентгеновской новой 4U 1543-47 2002 года (совместно К.Л.Маланчевым).
- Построение численной модели радиальной структуры сверхкритического диска вокруг намагниченной нейтронной звезды
- Описание движения частицы в рамках логарифмического потенциала гравитационного поля Шварцшильдовской черной дыры (Шакура Н.И., Липунова Г.В.)

$$\Phi = \frac{c^2}{2} \ln \left(1 - \frac{R_g}{r} \right) = c^2 \ln \sqrt{1 - \frac{R_g}{r}}$$



Г. В. Липунова

План работ на 2020—2024 годы:

1. Исследование нестационарных дисков в рентгеновских двойных системах с компактными объектами. Учет влияния теплового ветра с поверхности диска.
2. Изучение устойчивости α -дисков вокруг сверхмассивных черных дыр.



К. Л. Маланчев

- ✧ Проведено исследование нестационарной дисковой аккреции в рентгеновских новых, разработка модели вертикальной конвекции в дисках с учетом энергосвечения.
- ✧ Найдены критерии вязко-тепловой неустойчивости в оптически и геометрически тонком аккреционном потоке с микроскопическими коэффициентами вязкости и теплопроводности. Сделано обобщение для оптически толстого случая.
- ✧ Создание новой программы для просмотра изображений формата FITS, использующего графический ускоритель
- ✧ Применение методов машинного обучения для поиска аномальных объектов в Open Supernova Catalog
- ✧ В 2017 защитил кандидатскую диссертацию

К. Л. Маланчев

План работ на 2020—2024 годы:

1. Применение методов машинного обучения для классификации и поиска аномальных объектов в крупных каталогах кривых блеска, таких как Zwicky Transient Facility
2. Развитие методов моделирования нестационарной дисковой аккреции, учет взаимодействия с магнитным полем нейтронной звезды, расчет вертикальной структуры для различных масштабов плотностей, температур и масс аккректоров



Д. А. Колесников

- ✂ Проведено моделирование орбитальных кривых блеска HZ Her/Her X-1 в фильтрах В и V в рамках модели, содержащей прецессирующий изгибный диск, и свободно прецессирующую нейтронную звезду. Обнаружено периодическое изменение наклона и угла линии узлов внутреннего края диска, связанного с моментом сил, действующим со стороны магнитного поля нейтронной звезды. Модель также хорошо описывает модуляцию рентгеновского потока.
- ✂ [План работ](#) на 2020—2024 годы:
Моделирование главных орбитальных минимумов рентгеновской двойной системы HZ Her/Her X-1. Моделирование динамики струй и диска HZ Her/Her X-1. Моделирование различных рентгеновских источников в двойных системах кодами звёздной эволюции.



П. Ю. Голышева

- ✧ По полученным фотометрическим наблюдениям нескольких объектов, относящихся к дисковым катаклизмическим переменным, проведена обработка первичного материала, и проведены исследования и анализ данных. Некоторые объекты исследованы и во время вспышки, и в спокойном состоянии. Наблюдения во время вспышек представляют большое значение и интерес у исследователей, так как классификация катаклизмических переменных звезд проводится в первую очередь по характеру вспышечной активности. В то время как, располагая наблюдательными данными в спокойном состоянии звезды, можно детально исследовать орбитальную переменность ТДС, уверенно определить орбитальный период, оценить вклад в общий блеск системы от различных компонент (белого карлика, аккреционного диска, горячих образований на диске, звезды-донора) – например, по цветовым изменениям звезды во время ее орбитального движения или с применением методов математического моделирования.

П. Ю. Голышева

План работ на 2020—2024 годы:

1. Планируется продолжать исследования новой звезды КТ Eri, вспыхнувшей в ноябре 2009 г., фотометрические наблюдения этой звезды проводятся с 2010 г. и продолжаются по настоящее время, располагая этим материалом, представляется возможным провести поиск периодичностей у этой системы и выяснение их природы
2. Исследование звезды V392 Per во время вспышки 2018 г.
3. Звезда ТСРJ21040470+4631129 открыта как переменная во время вспышки в июле 2019 г., по имеющимся во время этой вспышки фотометрическим наблюдениям будет уточнен период суперхампов, а также звезда будет исследована и в спокойном состоянии блеска.



Гранты, полученные сотрудниками отдела (2015—2020)

Научная школа МГУ:

- 2018-2019, 2019-2020, сорук. Н.И. Шакура

РФФИ:

≈ 3 гранта, рук. Н. И. Шакура

≈ 2 гранта, рук. К. А. Постнов

≈ 1 грант, рук. С.О. Алексеев

≈ 1 грант, рук. П.И. Дядина

≈ 1 грант, рук. М.И. Горностаев

РНФ:

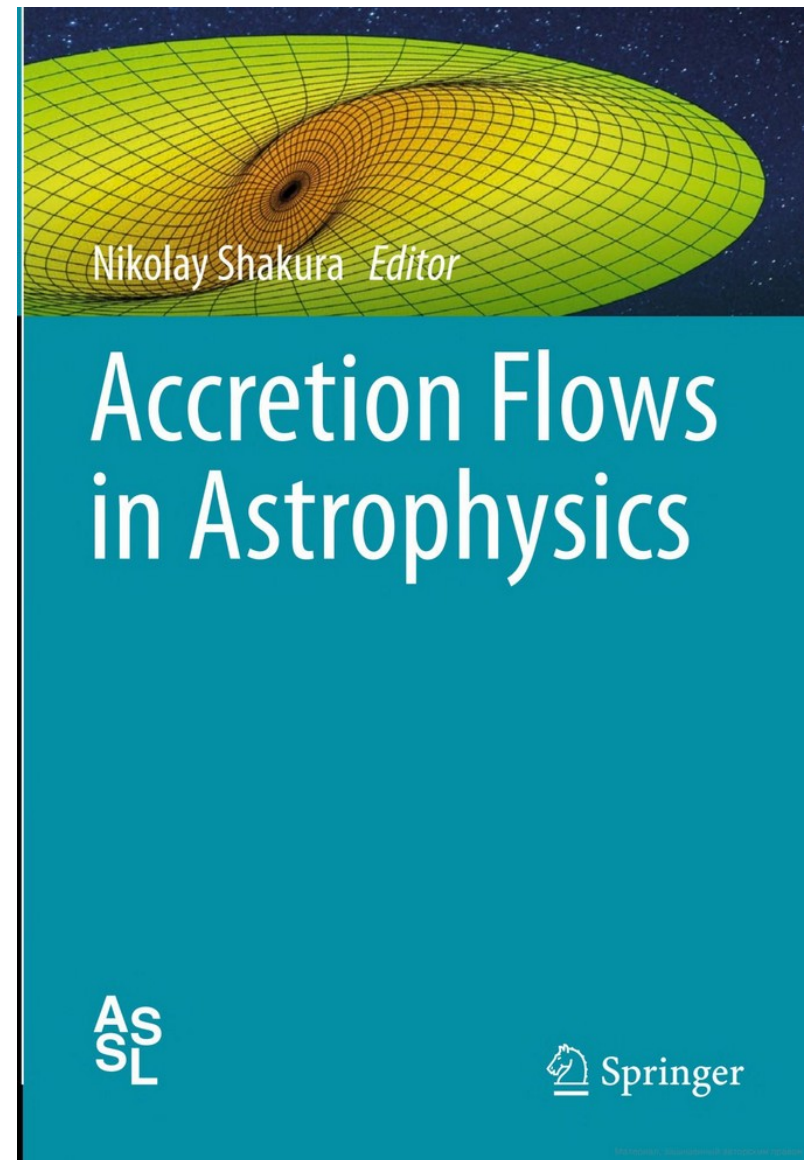
≈ 2 гранта, рук. Шакура

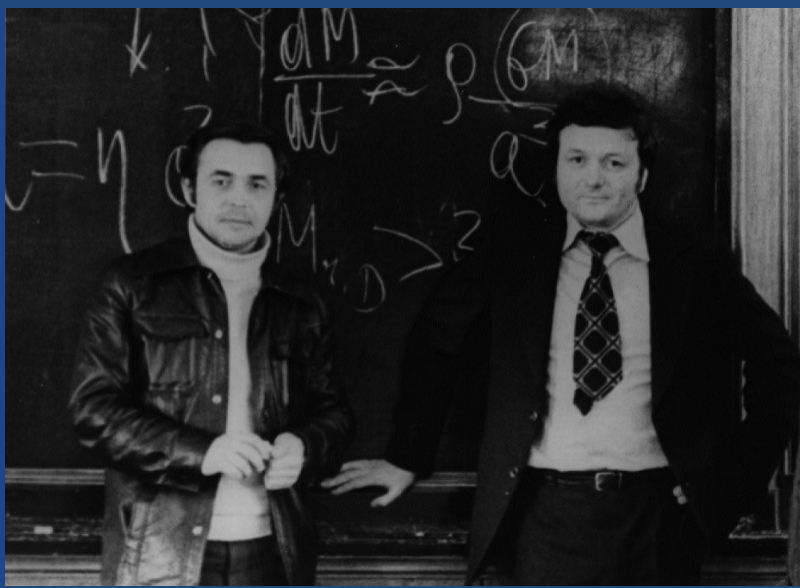
≈ 1 грант, рук. Постнов

Грант президента:

- 1 грант, М.С. Пширков

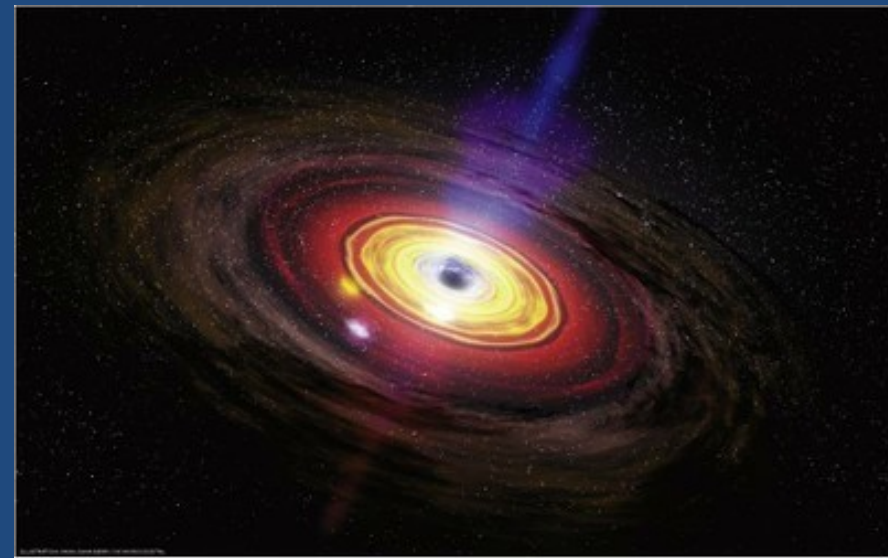
Аккреционные процессы в астрофизике





α

Shakura-Sunyaev
alpha-discs
1972



- A long-standing problem: angular momentum transfer in Keplerian flows
- Angular momentum transfer $\rightarrow$ gas heating $\rightarrow$ huge energy release during accretion onto neutron stars and black holes

Viscous time:

$$t_{\text{visc}} \sim \frac{R^2}{\nu}, \quad \nu \sim u l$$

Laminar:

$$l \sim \frac{1}{n\sigma}, \quad u \sim u_{\text{thermal}}$$

Turbulent:

$$\nu_{\text{turb}} \sim l_{\text{turb}} u_{\text{turb}}$$

$$\nu_{\text{turb}} = \alpha c_s z_0$$

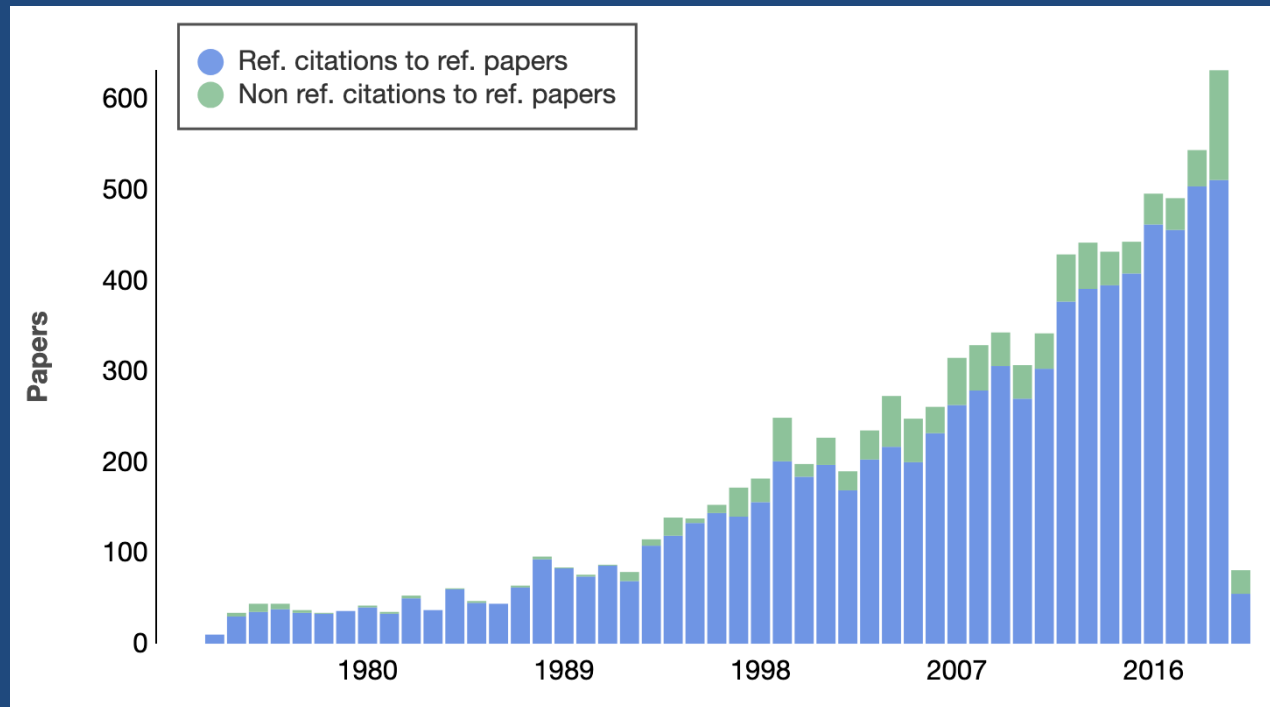
Hydrostatics:

$$c_s \sim \Omega z_0$$

Viscous stresses:

$$W_{r\phi}^t = \nu_t \rho r \frac{d\Omega}{dr} = \alpha c_s z_0 \rho r \frac{d\Omega}{dr} \Rightarrow W_{r\phi}^t = \alpha' \rho c_s^2$$

Цитируемость Shakura & Sunyaev 1973



Н. И. Шакура и Р. А. Сюняев были удостоены за эту работу Государственной премии РФ 2016 года

- Почетное звание Eminent Scientist, институт RIKEN, Япония, с 1995
- Медаль ордена «За заслуги перед Отечеством второй степени» (2019)



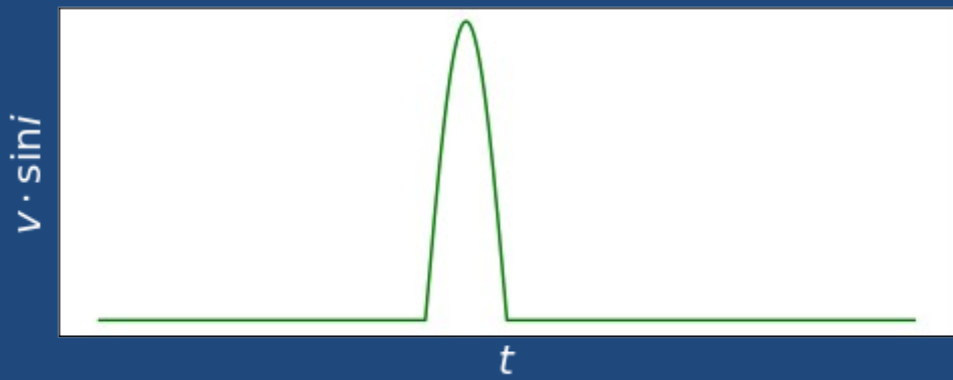
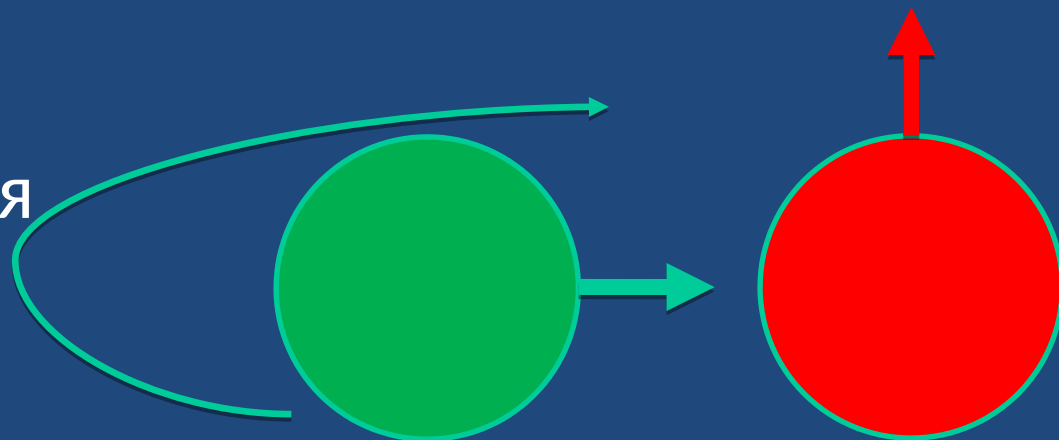
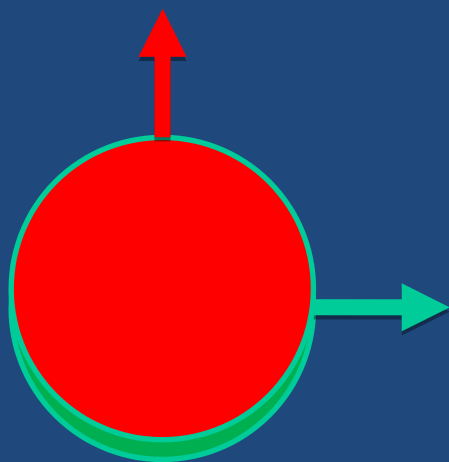
Нестационарная дисковая аккреция

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\omega r} \frac{\partial}{\partial r} \Sigma \nu_t \omega r^2 \right)$$

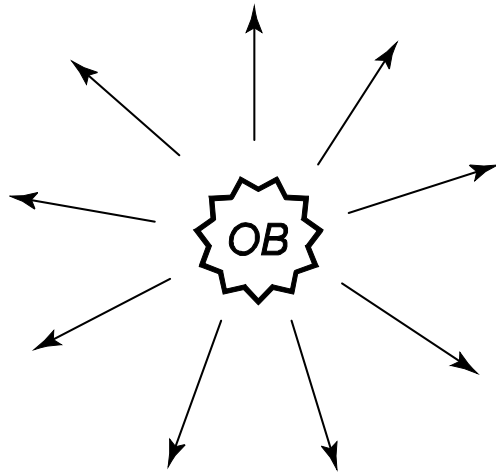
$$\tau_d \sim \frac{r^2}{\nu_t}$$

DI Her

» Решена проблема
апсидального движения
в двойной системе DI
Her



Subsonic settling accretion without shock near magnetosphere

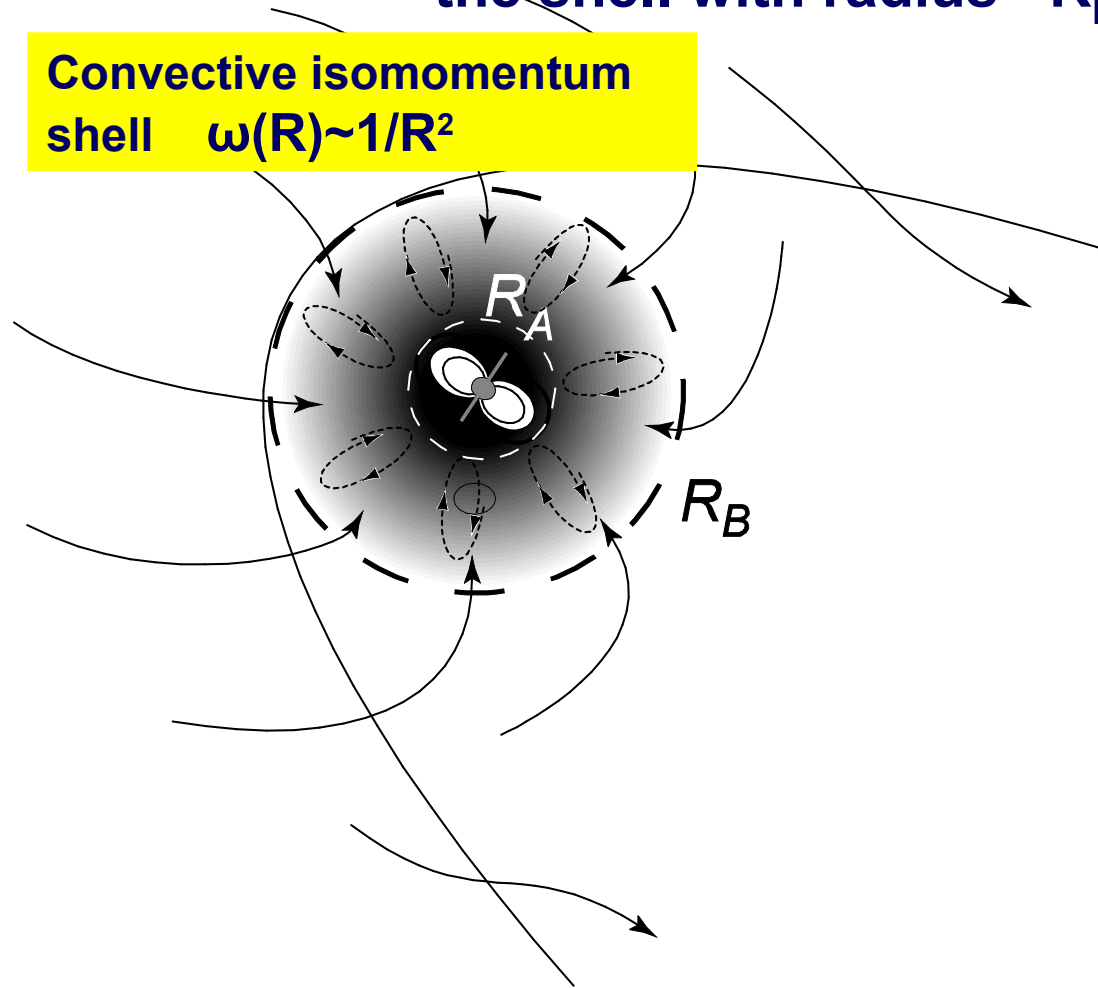


$$t_{cool} \gg t_{freefall}$$

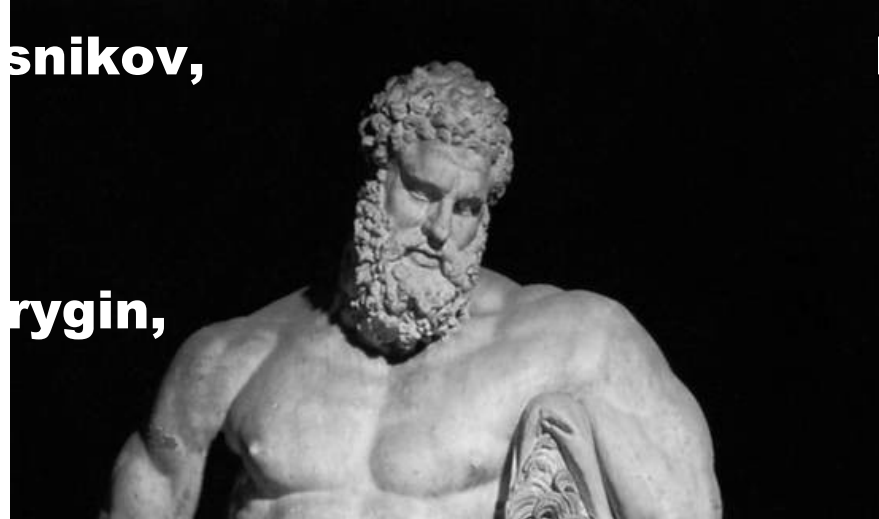
$$\dot{M} \sim \dot{M}_{Bondi} \left(\frac{t_{ff}}{t_{cool}} \right)^{1/3}$$

Matter subsonically settles down inside the shell with radius $\sim R_B$

Convective isomomentum shell $\omega(R) \sim 1/R^2$



Shakura et al. 2012-2015

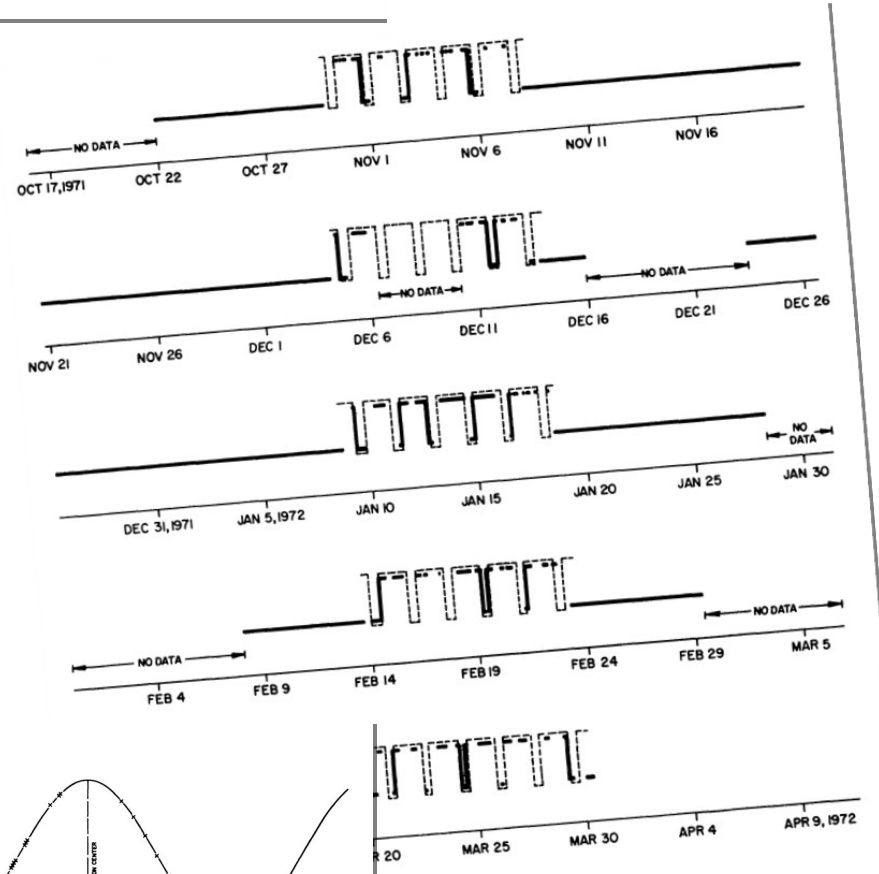
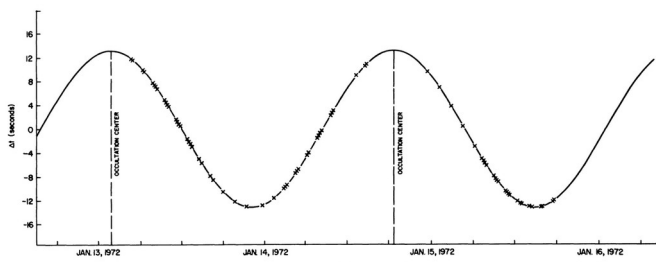
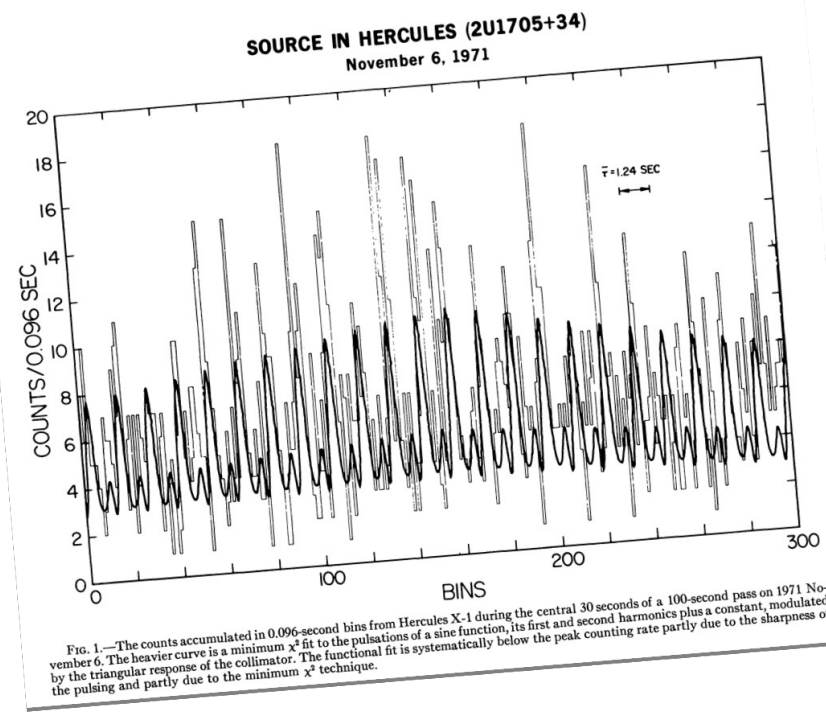


**The 35-day cycle and the
warped accretion disc in the
X-ray binary Her X-1=HZ Her**



DISCOVERY OF A PERIODIC PULSATING BINARY X-RAY SOURCE IN HERCULES FROM *UHURU*

H. TANANBAUM, H. GURSKY, E. M. KELLOGG, R. LEVINSON,
E. SCHREIER, AND R. GIACCONI

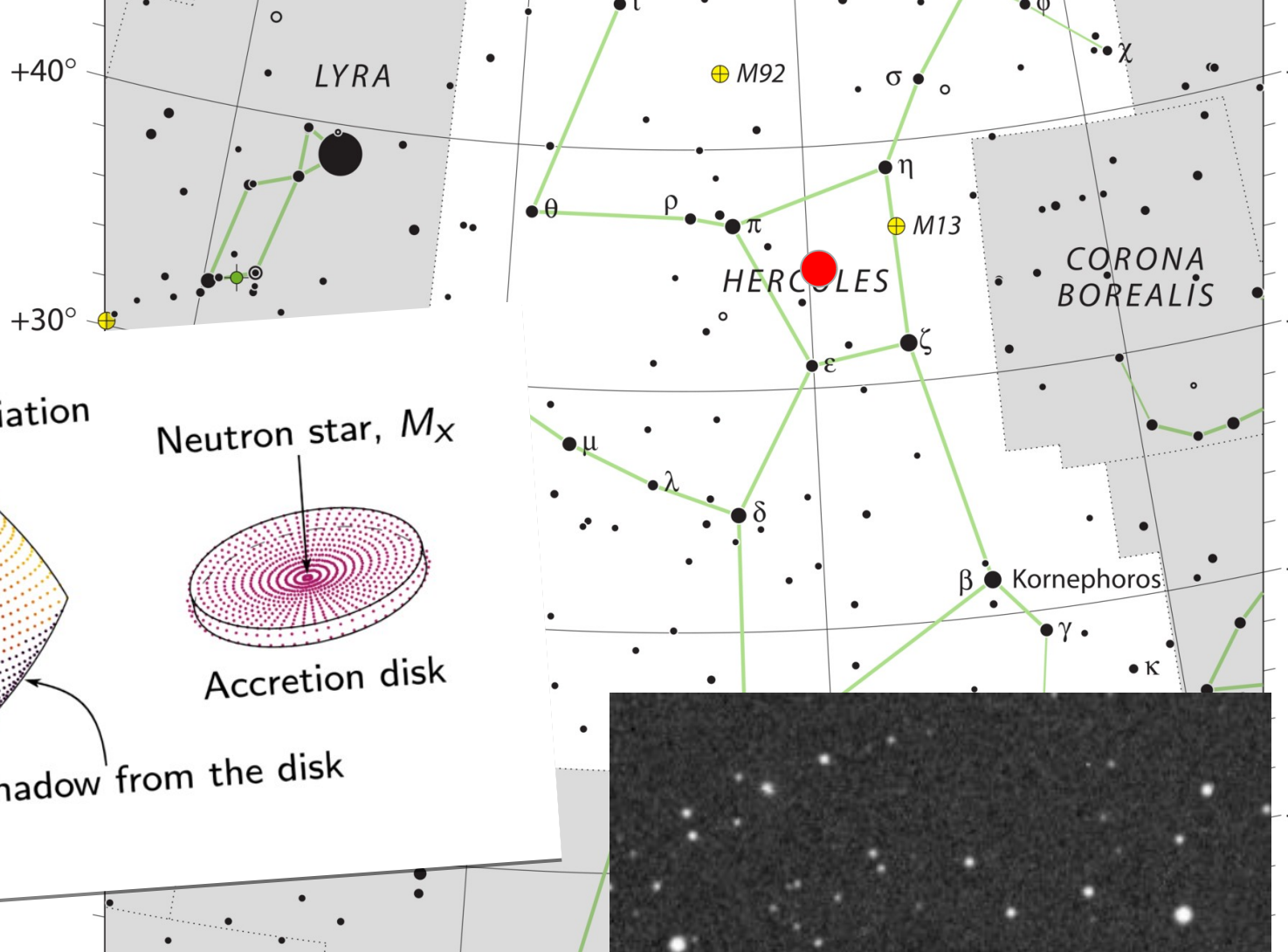


at schematically the observations of Hercules X-1 as either high- or not observed sightings. Short-term breaks are due to blocking dropouts in Quick Look data transmission. Intervals where the Hercules source are marked no data. The lighter dashed curve of all of the observations. Each row in the figure has a duration of 35.7 days and the 9-day high-intensity pulsed intervals demonstrates the 35.7-

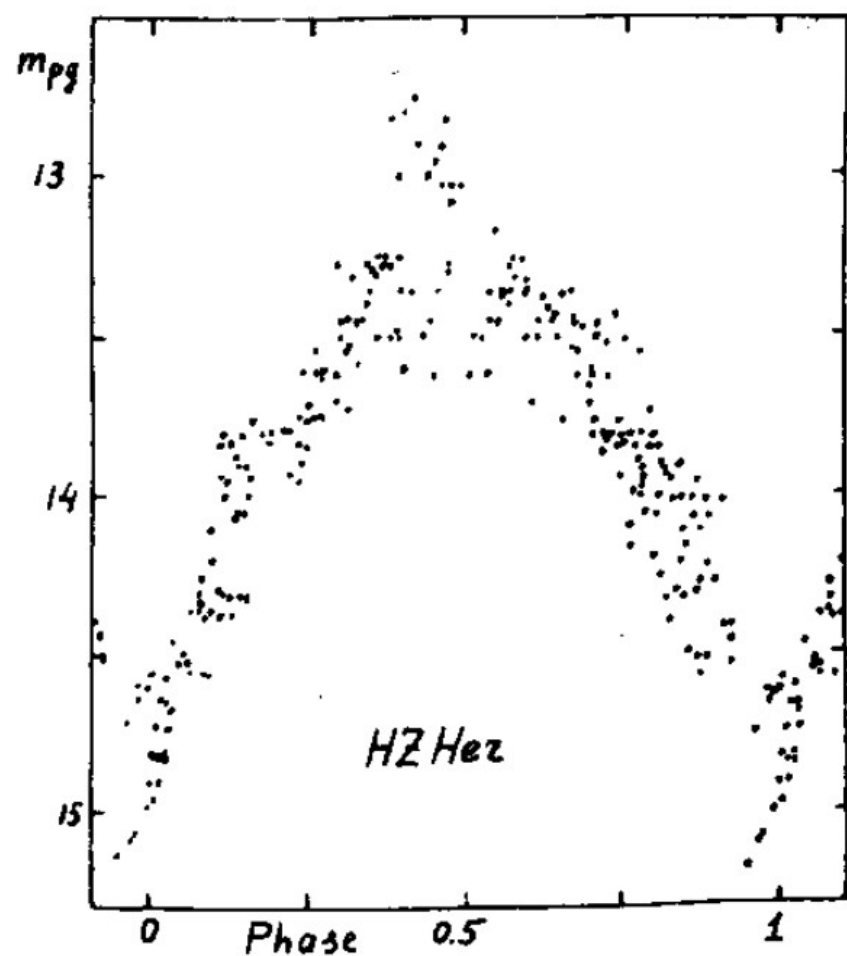
35.7 days and the 9-day high-intensity pulsed intervals demonstrates the 35.7-day cycle discussed in the text.

Received 1972 April, 26

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 174:L143-L149, 1972 June 15



Orbital period, P_{orb}	1.7^d
Period of rotation of neutron star, P_{ns}	1.24^s
Disk precession period, P_{pr}	$\approx 35^d$
Donor star mass, M_V	$2.3 - 2.4 M_{\odot}$
Neutron star mass, M_X	$1.4 - 1.6 M_{\odot}$



A.M. CHEREPASHCHUK, YU.N. EFREMOV,
N.E. KUROCHKIN, N.I. SHAKURA,
R.A. SUNYAEV.

COMMISSION 27 OF THE I. A. U.
INFORMATION BULLETIN ON VARIABLE STARS
NUMBER 720

1972

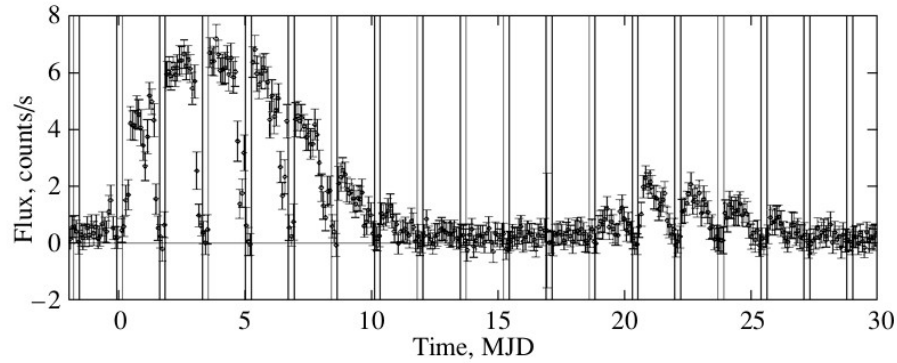


Fig. 3. Averaged X-ray light curves of Her X-1/HZ Her for cycles with the turn-on near orbital phase ~ 0.2 . The vertical lines indicate the intervals of X-ray eclipses.

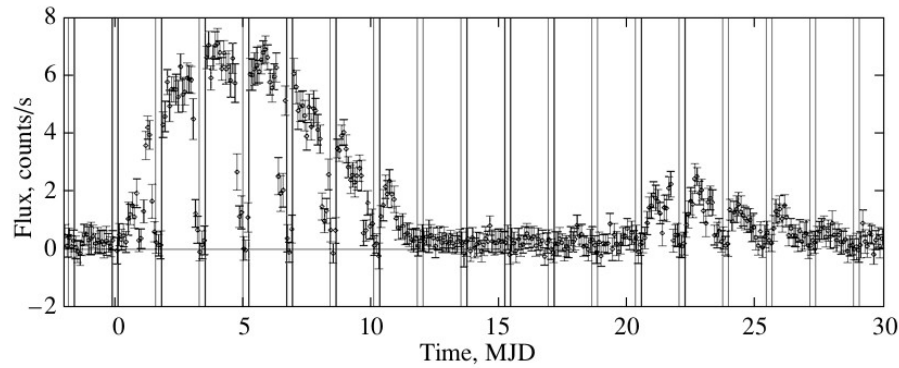
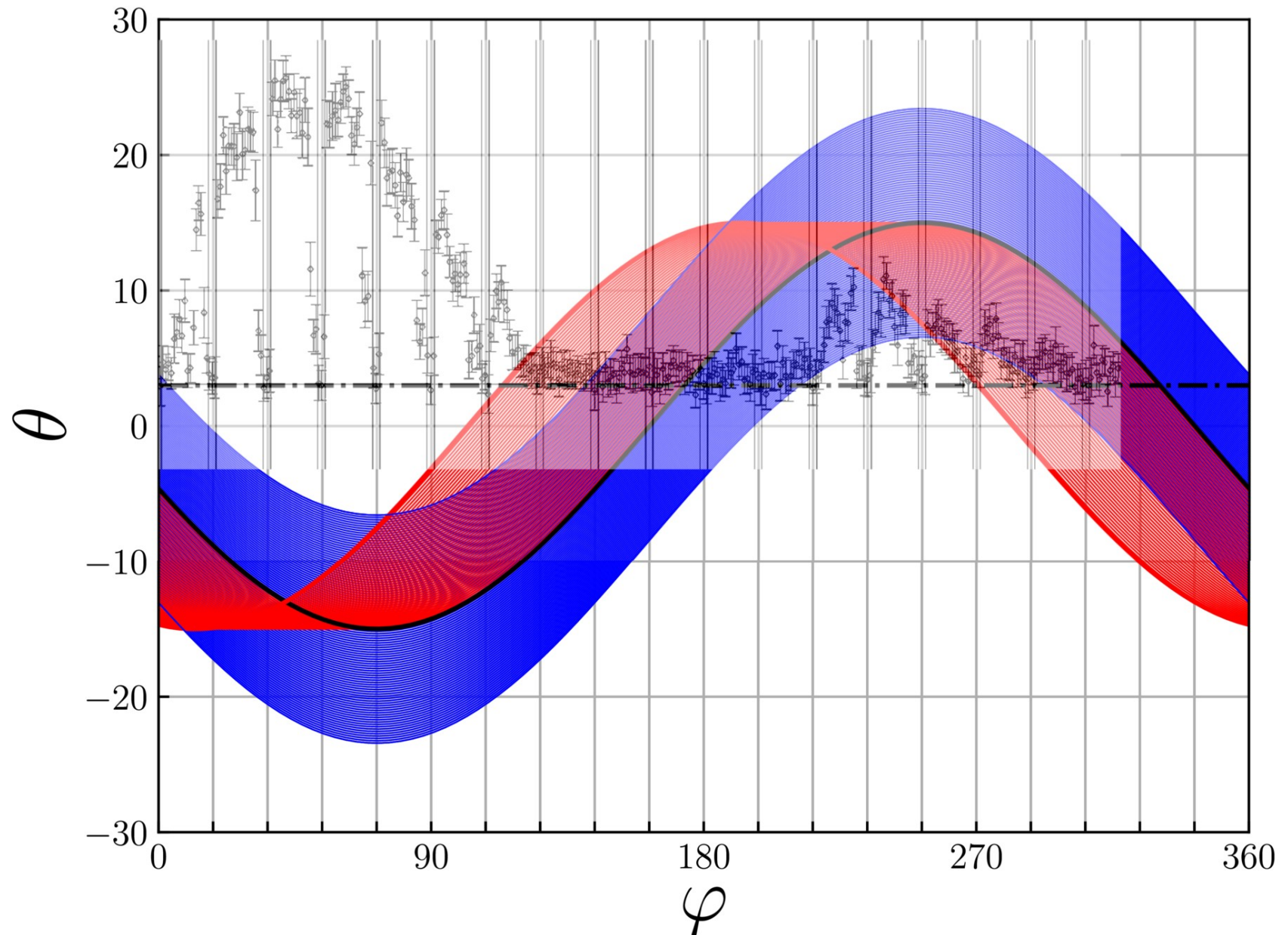


Fig. 4. Same as Fig. 3 for cycles with the turn-on near orbital phase ~ 0.7 .

Projection of the warped disk on the neutron star's sky



On the origin of X-ray dips in Her X-1

N.I. Shakura¹, M.E. Prokhorov¹, K.A. Postnov², and N.A. Ketsaris¹

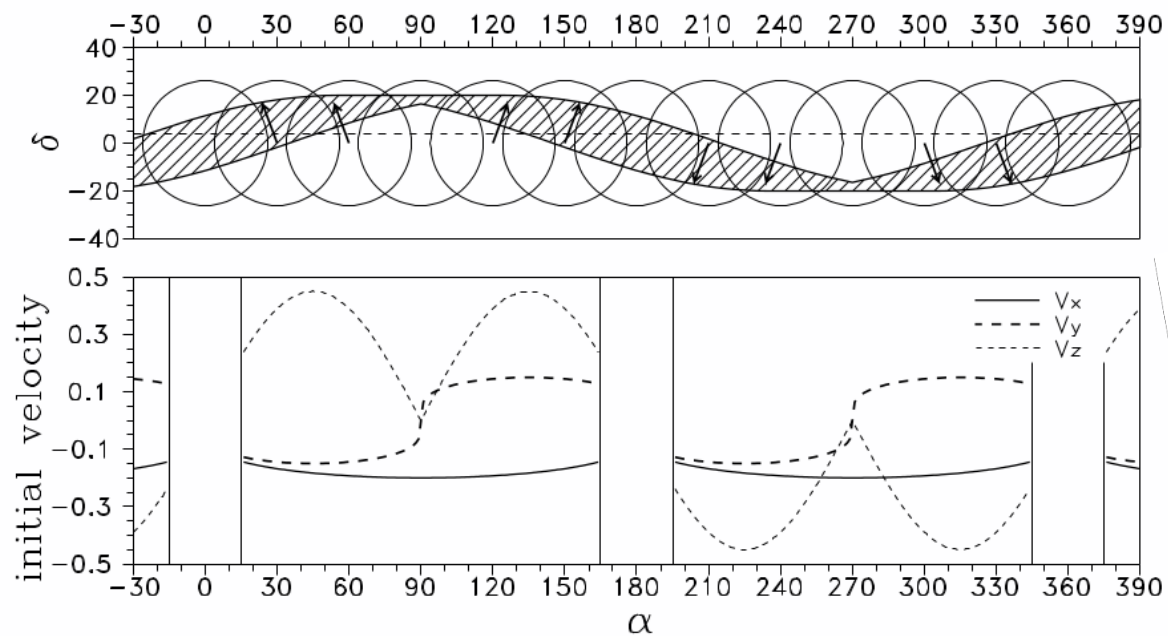


Fig. 1. *Upper panel:* the passage of HZ Her through the shadow formed by a tilted twisted accretion disk. The coordinates α and δ count from the line of nodes of the middle part of the disk along the orbital motion and from the orbital plane, respectively. The dashed line indicates the position of an observer inclined by $i = 86^\circ$ to the orbit. The arrows show the projection of the initial accretion stream velocity on the plane YZ perpendicular to the orbit. *Bottom panel:* The initial stream velocity components at the L_1 point in units of the relative orbital velocity 270 km s^{-1} . The flows disappear inside the shadow sector between the outer and inner disk node lines.

Astron. Astrophys. 348, 917–923 (1999)

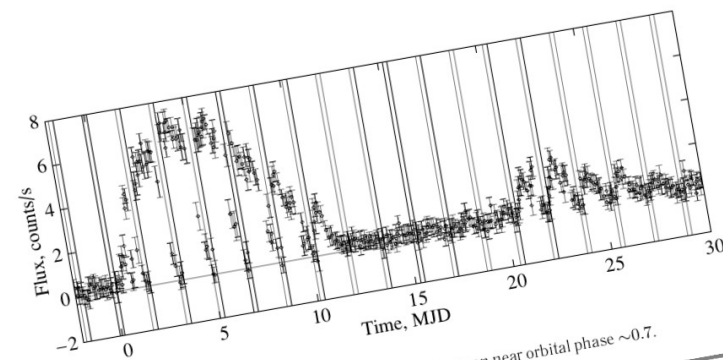
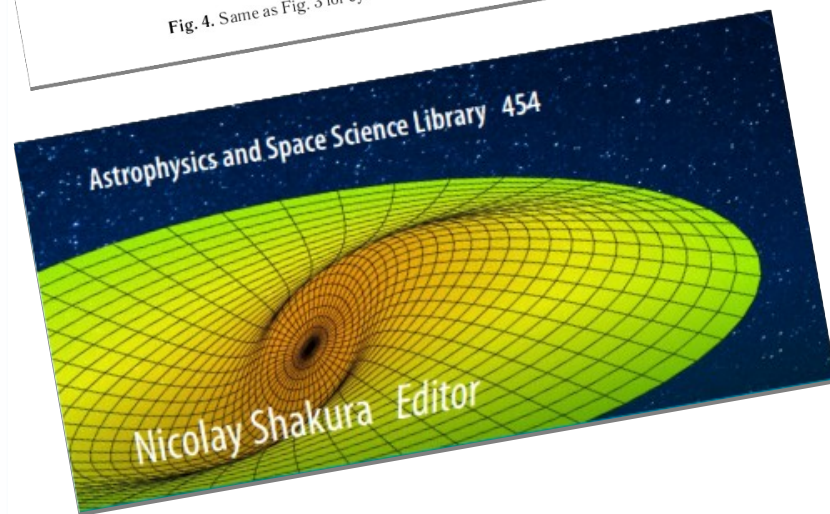


Fig. 4. Same as Fig. 3 for cycles with the turn-on near orbital phase ~ 0.7 .



K. Postnov, N. Shakura, R. Staubert, A. Kochetkova, D. Klochkov and J. Wilms

MNRAS 435, 1147–1164 (2013)

and J. Wilms

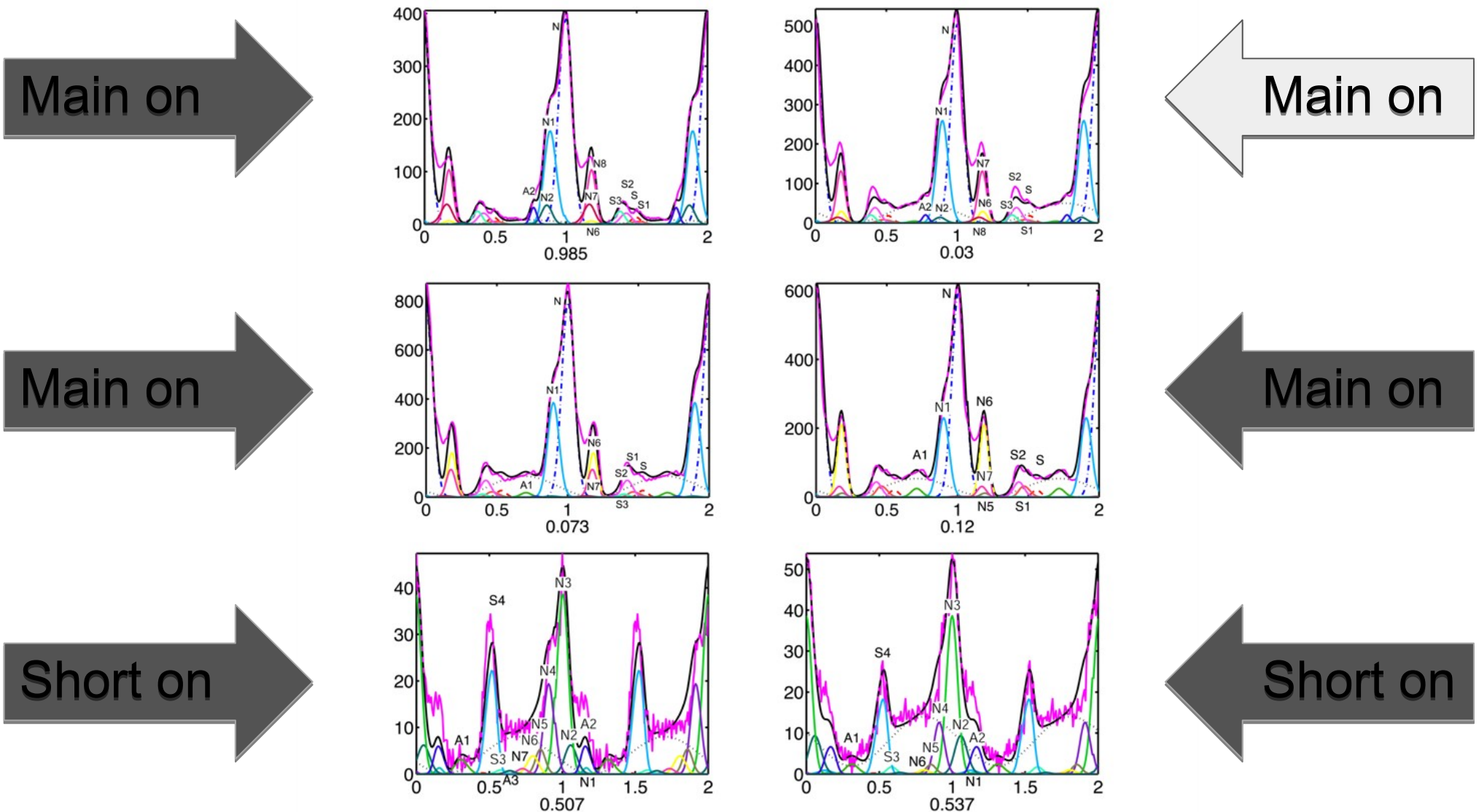
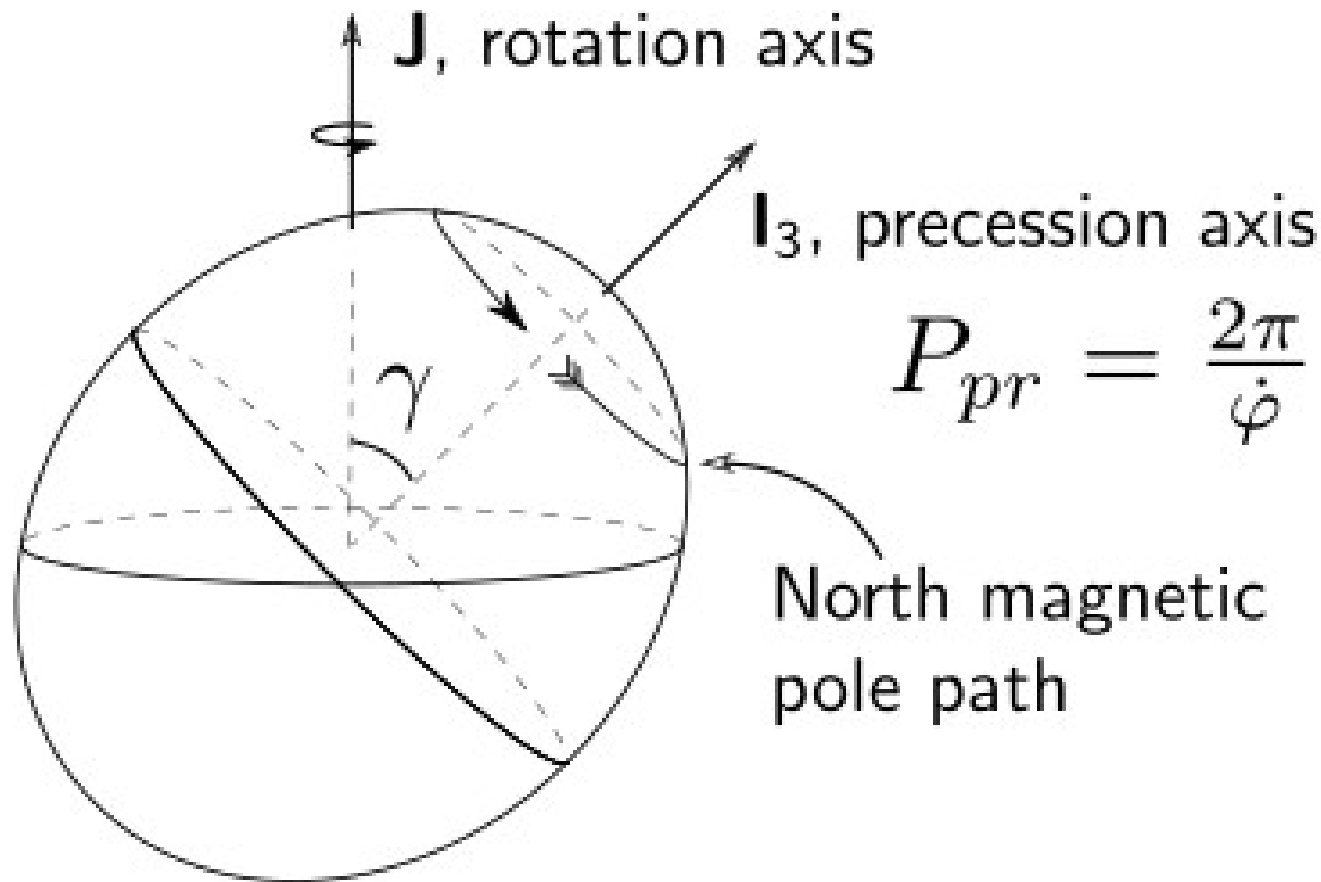


Figure 3. Model *RXTE* profiles (9–13 keV) for cycle #308 with identified emission features (notations as in Table 1). A constant baseline component has been subtracted from the observed profiles. The model total flux is shown in solid black line. The observed profiles with a constant baseline component subtracted are shown in grey solid line. Model NS free precession phase is indicated.

Free precession of the neutron star

$$P_{rot} = \frac{2\pi}{\Omega} = 1.24 \text{ s} \quad \dot{\varphi} = \Omega \frac{I_1 - I_3}{I_1} \cos \gamma$$



$$P_{pr} = \frac{2\pi}{\dot{\varphi}} \simeq 35 \text{ d}$$

Brecher (1972), Novikov (1973), Trümper et al. (1986), Shakura (1995)

Variable neutron star free precession in Hercules X-1 from evolution of *RXTE* X-ray pulse profiles with phase of the 35-d cycle

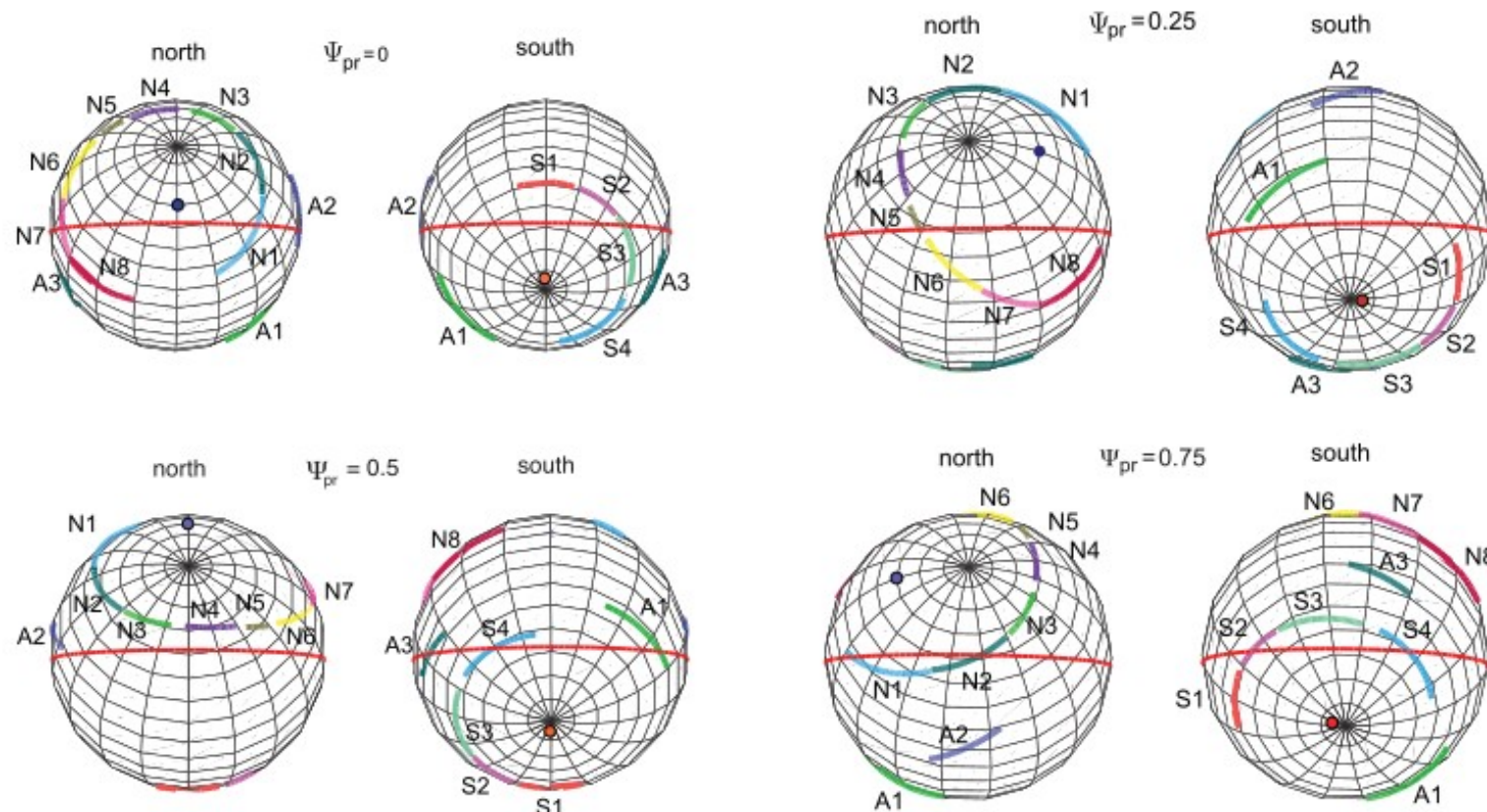
K. Postnov,^{1★} N. Shakura,¹ R. Staubert,² A. Kochetkova,¹ D. Klochkov² and J. Wilms³

¹*Moscow M.V. Lomonosov State University, Sternberg Astronomical Institute, Universitetskij pr., 13, 119992 Moscow, Russia*

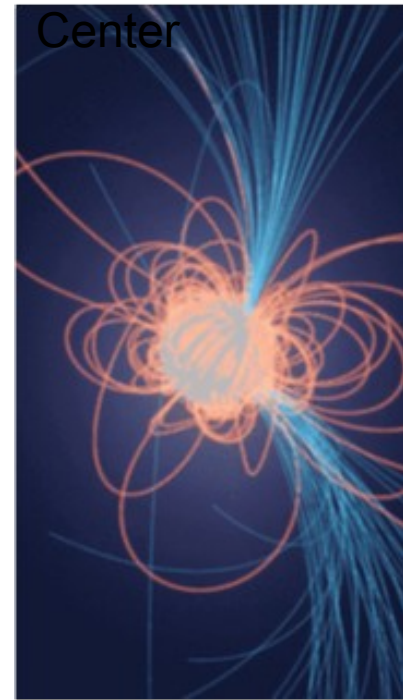
²*Institut für Astronomie und Astrophysik, Universität Tübingen, Sand 1, D-72076 Tübingen, Germany*

³*Dr. Karl Remeis-Observatory & ECAP, Universität Erlangen-Nürnberg, Sternwartstraße 7, D-96049 Bamberg, Germany*

2013



NASA's Goddard
Space Flight
Center



K. Postnov, N. Shakura, R. Staubert, A. Kochetkova, D. Klochkov and J. Wilms

MNRAS 435, 1147–1164 (2013)

and J. Wilms

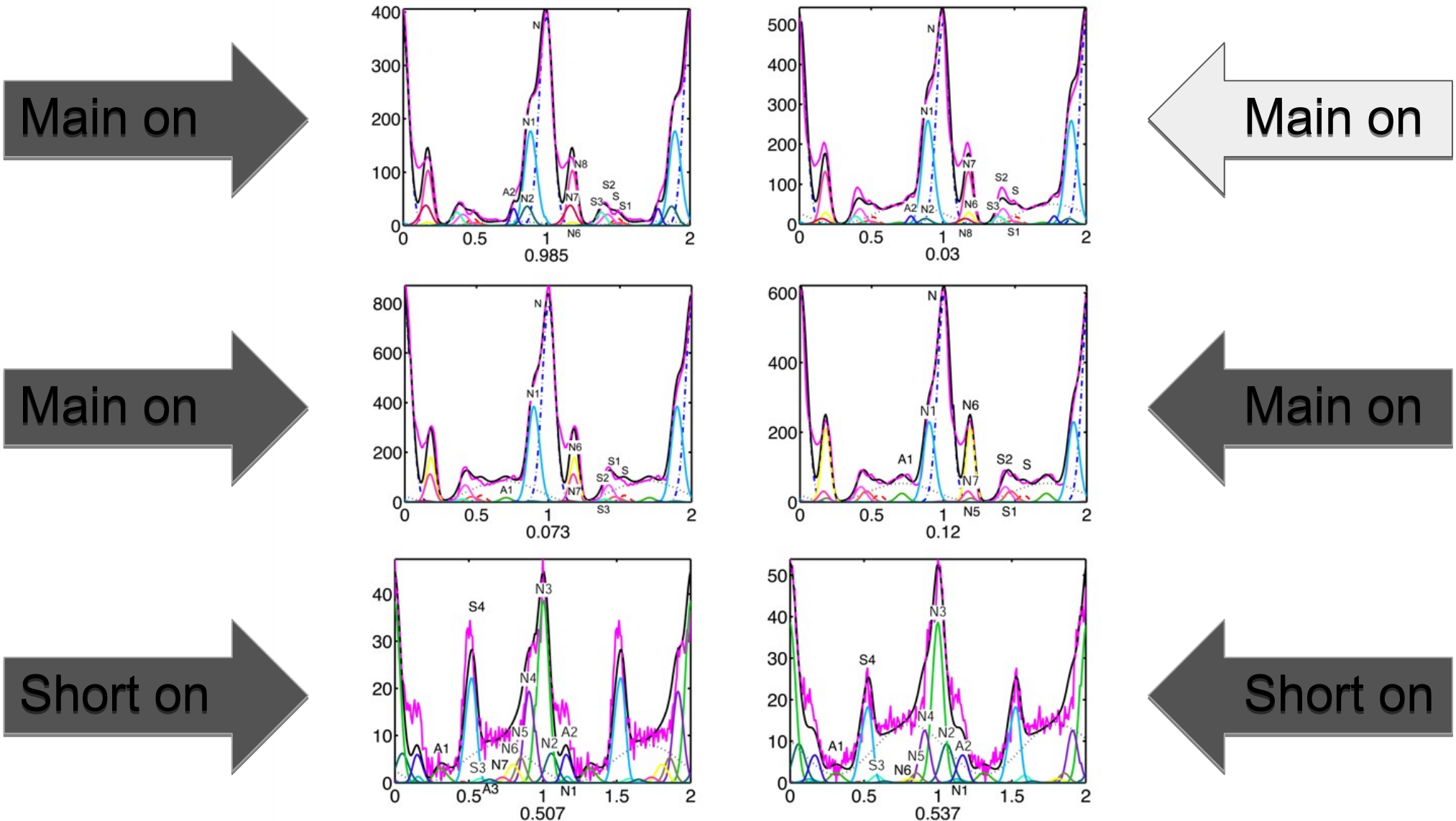


Figure 3. Model *RXTE* profiles (9–13 keV) for cycle #308 with identified emission features (notations as in Table 1). A constant baseline component has been subtracted from the observed profiles. The model total flux is shown in solid black line. The observed profiles with a constant baseline component subtracted are shown in grey solid line. Model NS free precession phase is indicated.

1972 —1994

B: approx. 5800 points

V: approx. 5300 points

Petro L., Hiltner W. A.,

ApJ, vol. 181, L93-L42, 1973

Davidson A. et al,

ApJ, vol. 177, L97-L102, 1972

Boynton P. E. et al,

preprint of Seattle University Group, 1973

Luytyi V. M.,

Peremennye Zvezdy, vol. 18, p. 41, in Russian, 1973

Grandi S. A. et al,

ApJ, vol. 190, p. 365, 1974

Luytyi V. M. et al,

Astron Journal, vol. 50, p. 3, in Russian, 1973

Cherepashchuk A. M. et al,

Peremennye Zvezdy, vol. 19, p. 305, in Russian, 1974

Voloshina I. B. et al,

2010—2019
Pisma v Astron Journal, vol 16, p. 125, in Russian, 1990

B: approx. 14000 points

V: approx. 8700 points

Volkov I.,

Bikmaev I.,

Irsambetona T.,

Golysheva P.,

Shugarov S.,

Nikolenko I.,

Broadband UBV observational data

Luytyi V. M., Voloshina I. B.,

Pisma v Astron Journal, vol. 15, p. 806, in Russian, 1989

Kilyachkov N. N., Shevchenko V.

S.,

Pisma v Astron Journal, vol. 4, p. 356, in Russian, 1978;

Pisma v Astron Journal, vol. 6, p. 717, in Russian, 1980;

Pisma v Astron Journal, vol. 14, p. 438, in Russian, 1988

Kilyachkov N. N. et al,

Pisma v Astron Journal, vol. 20, p. 664, in Russian, 1994

Thomas H.-C. et al.,

observational journal, 1985

Gladyshev S. A.

PhD thesis, unpublished, 1985

Mironov A. V. et al,

Astron Journal, vol. 63, p. 113, 1986

Goransky V. P., Karitskaya E. A.

unpublished, 1976

New UBV data

Trunkovsky E.,

Schoenherr G.,

Schwoppe A.,

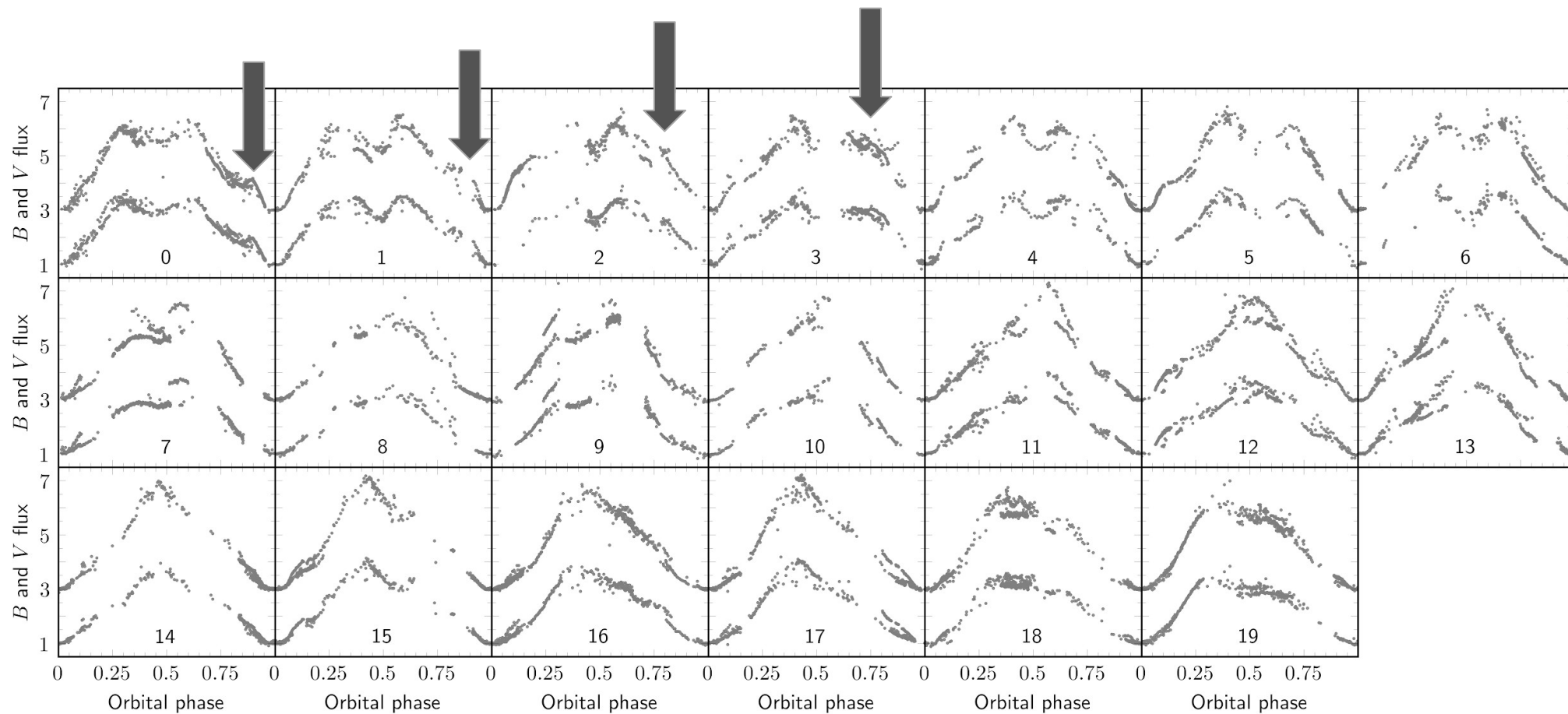
Klochkov D.,

Irtuganov E.,

Shurygin P.

B : approx. 20000 points

V : approx. 14000 points

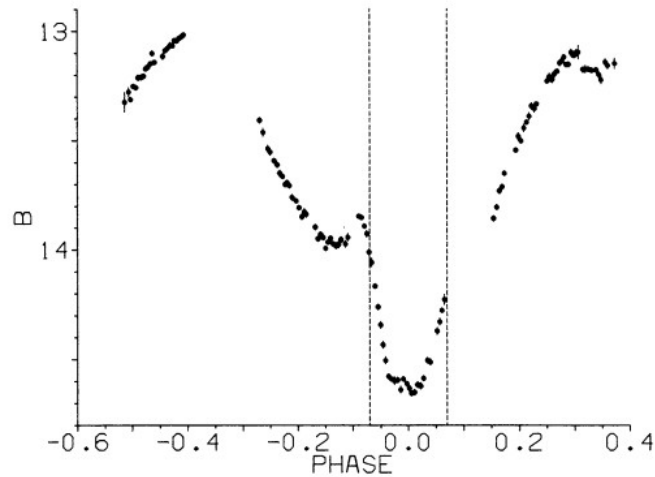


UBV Photometry of HZ Herculis: the Shape of the Primary Minimum

R. Kippenhahn, H. U. Schmidt, and H.-C. Thomas

Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Straße 1, D-8046 Garching b. München, Federal Republic of Germany

Received December 4, 1979; accepted February 5, 1980



ASTRONOMY
AND
ASTROPHYSICS

BEHAVIOR OF MATTER NEAR THE OUTER REGION OF THE ACCRETION DISK IN HER X-1

Nikolai G. BOCHKAREV

Sternberg Astronomical Inst., Moscow 119899, USSR

Eugenia A. KARITSKAYA

Inst. for Astronomy, USSR Acad. Sci., Moscow 109017, USSR

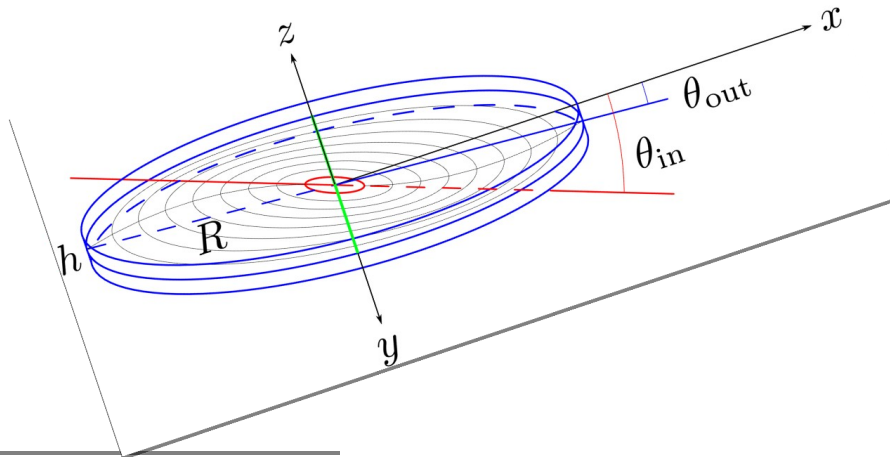
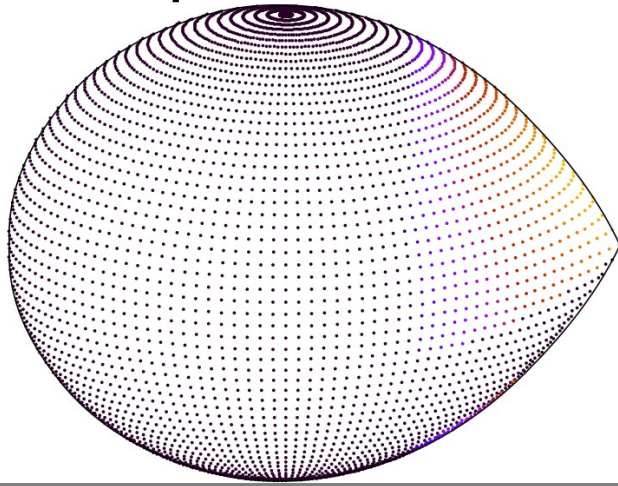
Proceedings of the 151st.

Symposium of the International Astronomical Union, 1992

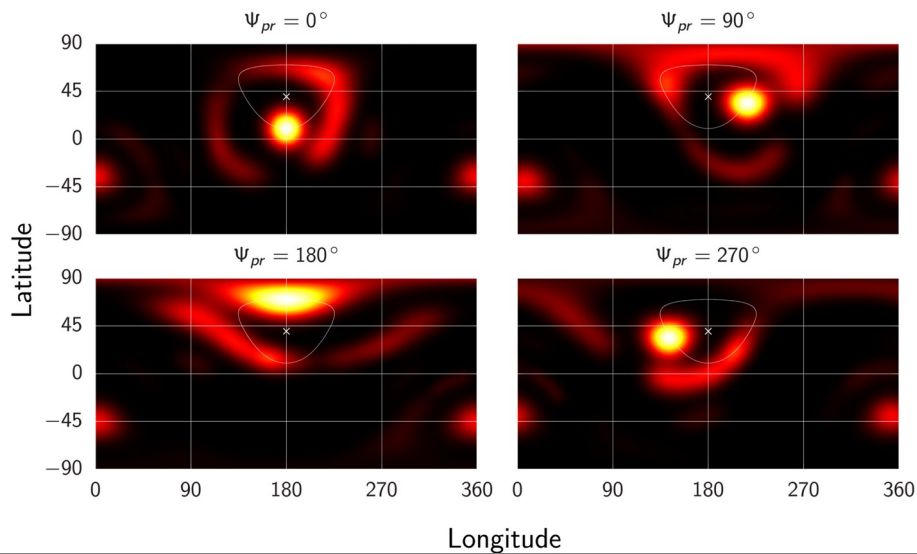
Discostar

<https://github.com/eliseys/discostar>

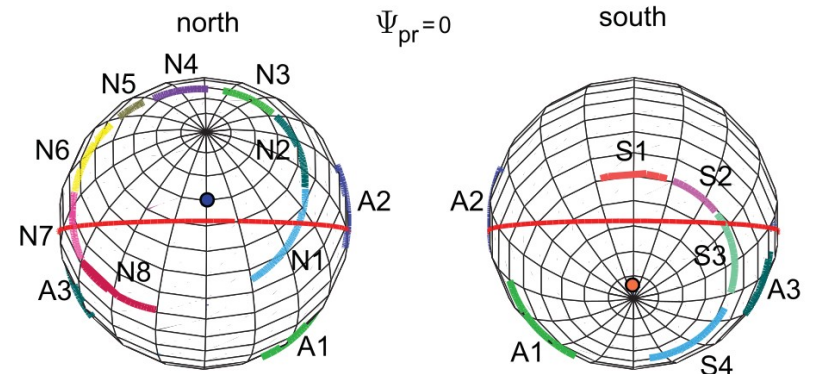
Warped accretion disk



Non-isotropic X-ray intensity



**Postnov et al.,
2013**



Fixed parameters of the model

Mass ratio, $q = M_x/M_v$	0.6448
Roche lobe overflow, μ	1.0
X-ray reprocessing factor	0.5
Disk's radius, R/a	0.24
Superorbital phase where $\Psi_{ns} = 0$	0.05
Star's polar temperature, T_0	7794 K
NS's orientation angle, θ_{ns}	-3.0°
NS's orientation angle, κ_{ns}	$-20^\circ \dots 20^\circ$, step 10°
Angle between disk's inner and outer nodal lines, Z	$-90^\circ \dots 90^\circ$, step 10°
Max opening phase, $\Phi_d = 0$	0.175 ... 0.25, step 0.025
Semi-major axis, a	$(6.525 \dots 6.501) \times 10^{11}$ cm
Inclination, i	$85^\circ \dots 90^\circ$, step 1°

Total: 12

Optimized parameters of the model

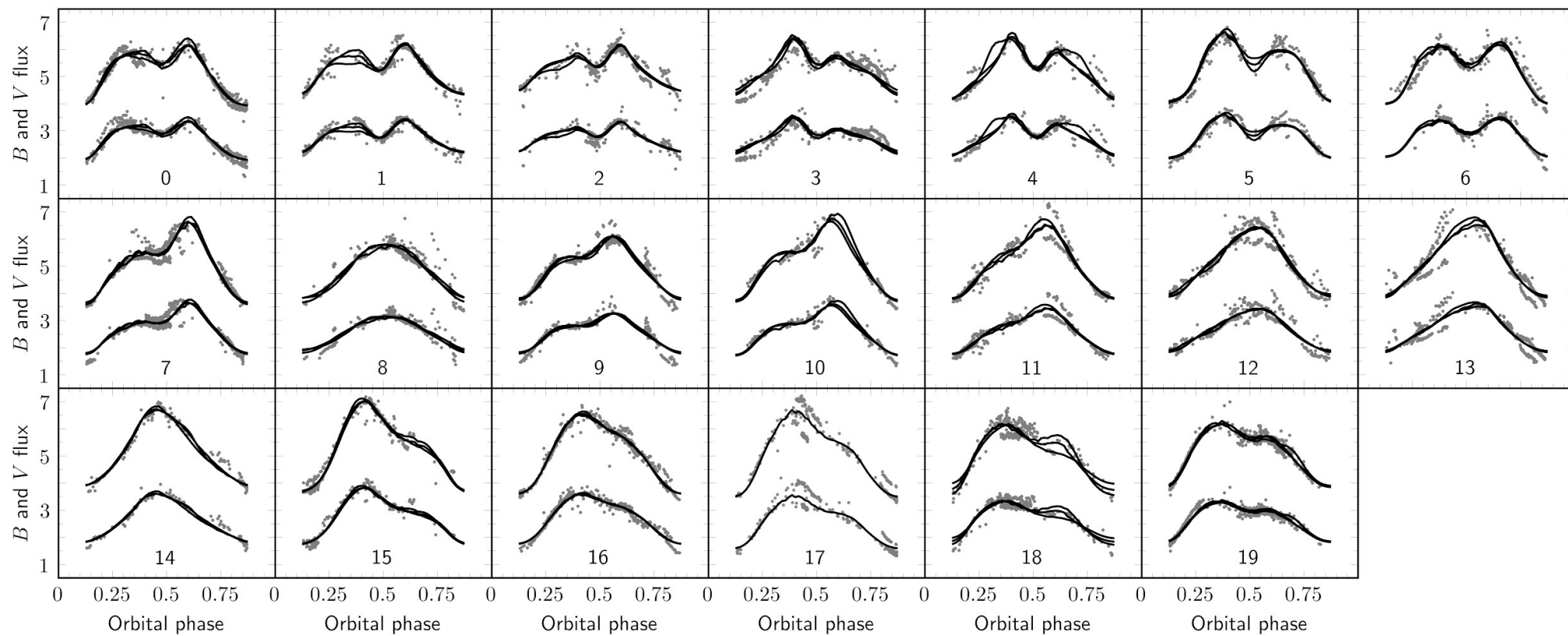
Parameters	Limits
NS's X-ray luminosity, L_x	$0.1 \dots 10 \times 10^{37} \text{ erg/s}$
Tilt of the disk's inner edge, θ_{in}	$0^\circ \dots 40^\circ$
Tilt of the disk's outer edge, θ_{out}	$0^\circ \dots 40^\circ$
Phase angle of the disk, Φ_d	$\Phi_{lin} \pm 20^\circ$
Disk's relative width, h/R	$0.2 \dots 0.4$
Disk's specific flux normalized to flux from the non-irradiated side of the donor star,	
F_B	$0 \dots 4$
F_V	$0 \dots 4$

Total: 7

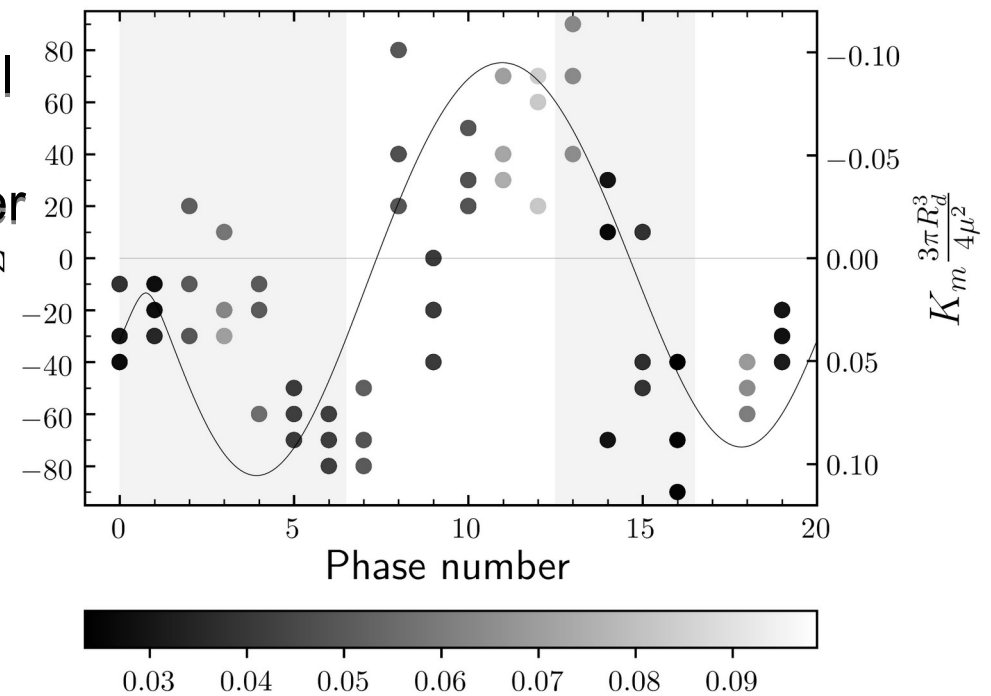
Optimized parameters of the model

Parameters	Limits
NS's X-ray luminosity, L_x	$0.1 \dots 10 \times 10^{37} \text{ erg/s}$
Tilt of the disk's inner edge, θ_{in}	$0^\circ \dots 40^\circ$
Tilt of the disk's outer edge, θ_{out}	$0^\circ \dots 40^\circ$
Phase angle of the disk, Φ_d	$\Phi_{lin} \pm 20^\circ$
Disk's relative width, h/R	$0.2 \dots 0.4$
Disk's specific flux normalized to flux from the non-irradiated side of the donor star,	
F_B	$0 \dots 4$
F_V	$0 \dots 4$

~~Total: 7~~ Total: 4

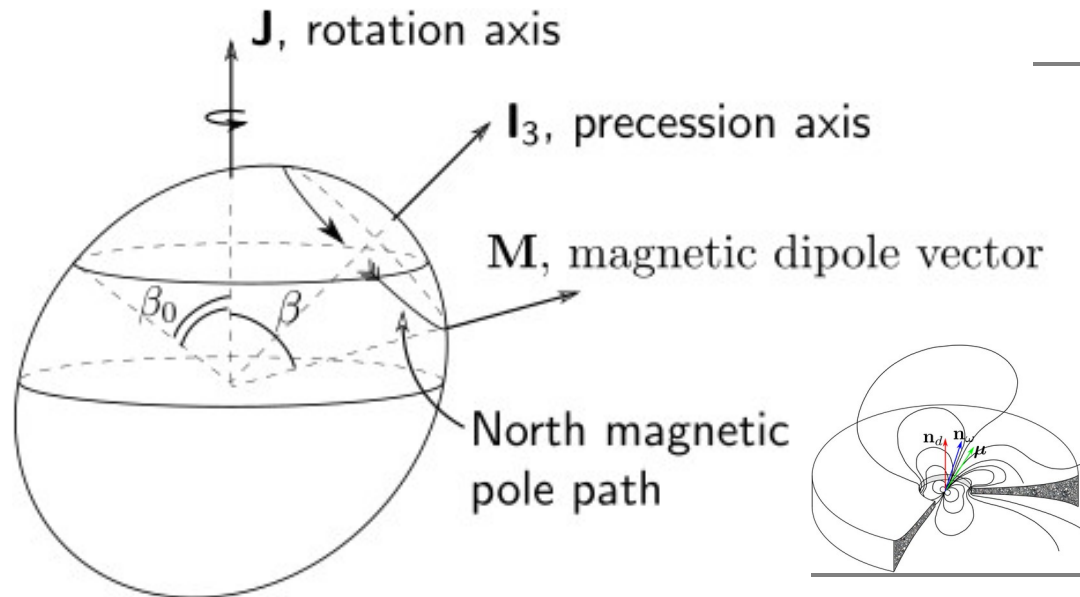


Z — angle
between nodal
lines of the
outer and inner
edges of the disk



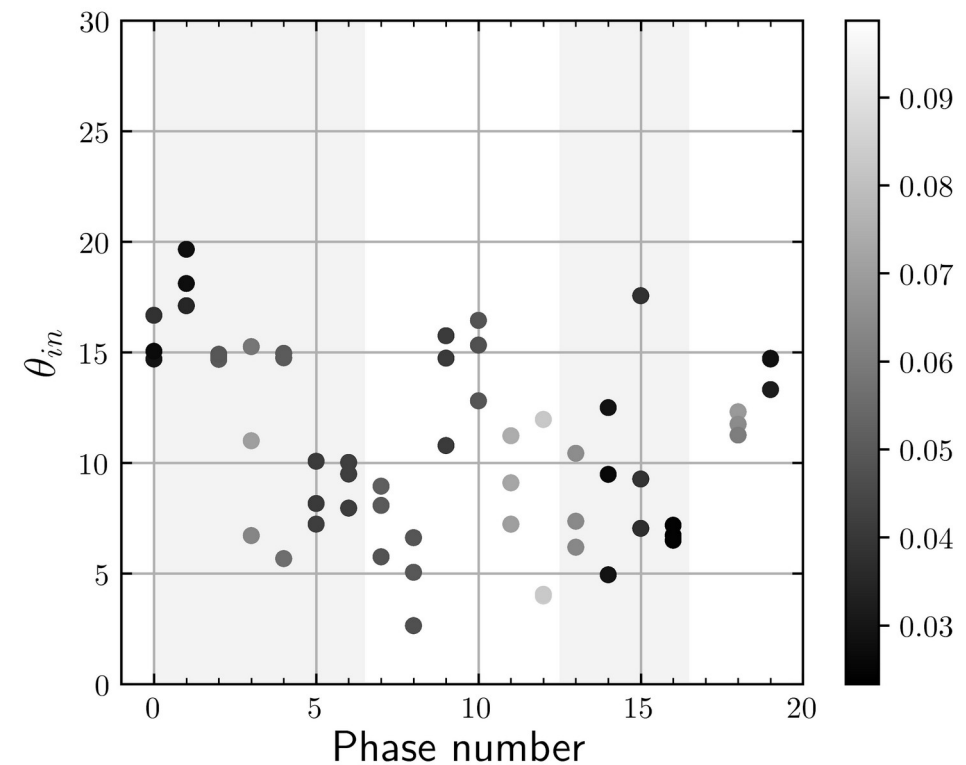
Lipunov, Shakura (1980)

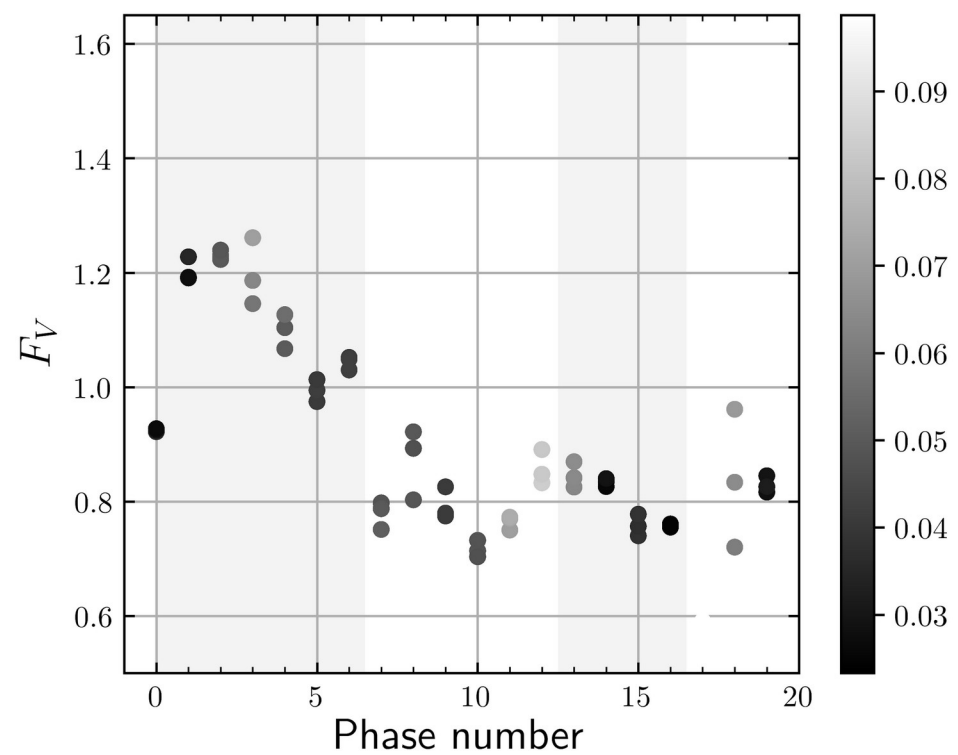
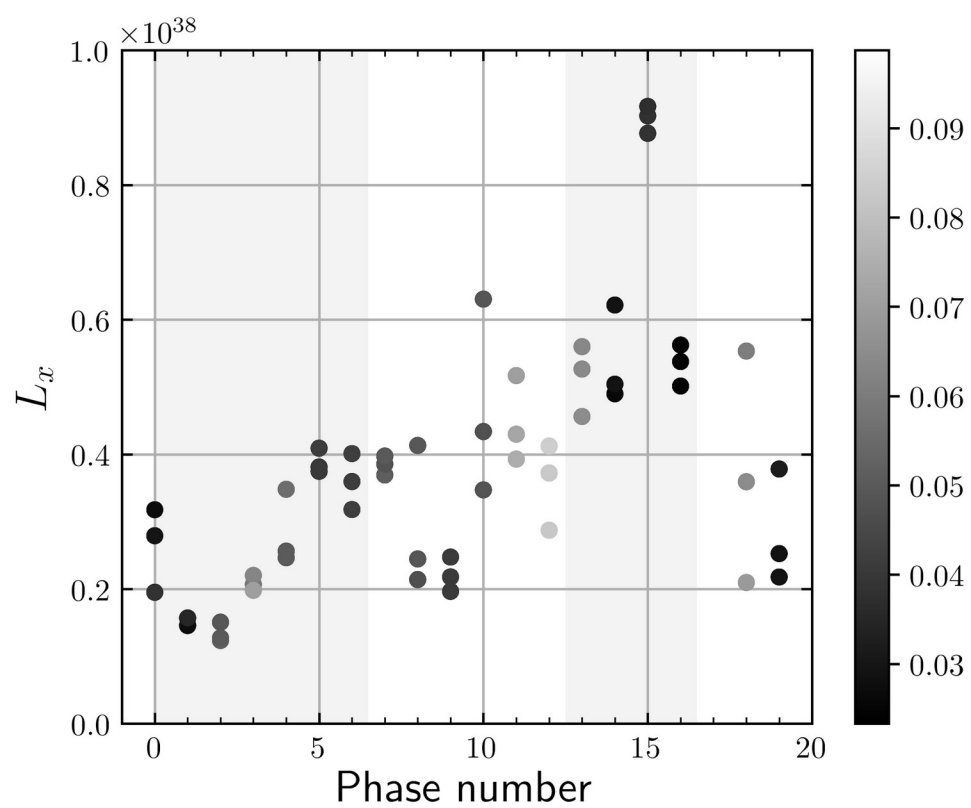
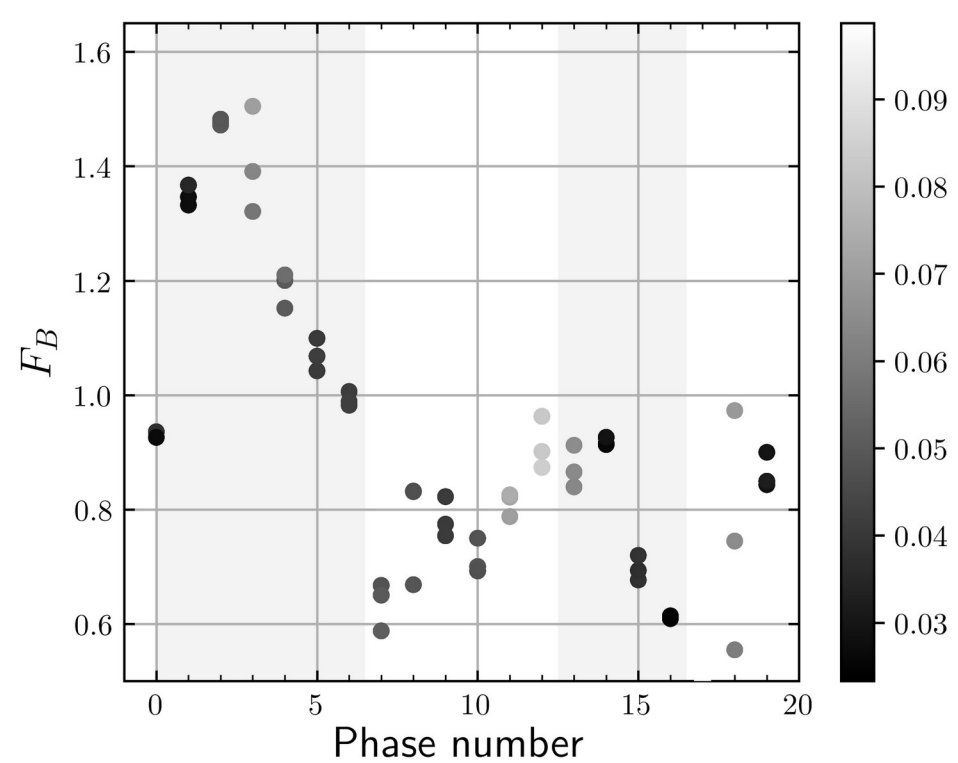
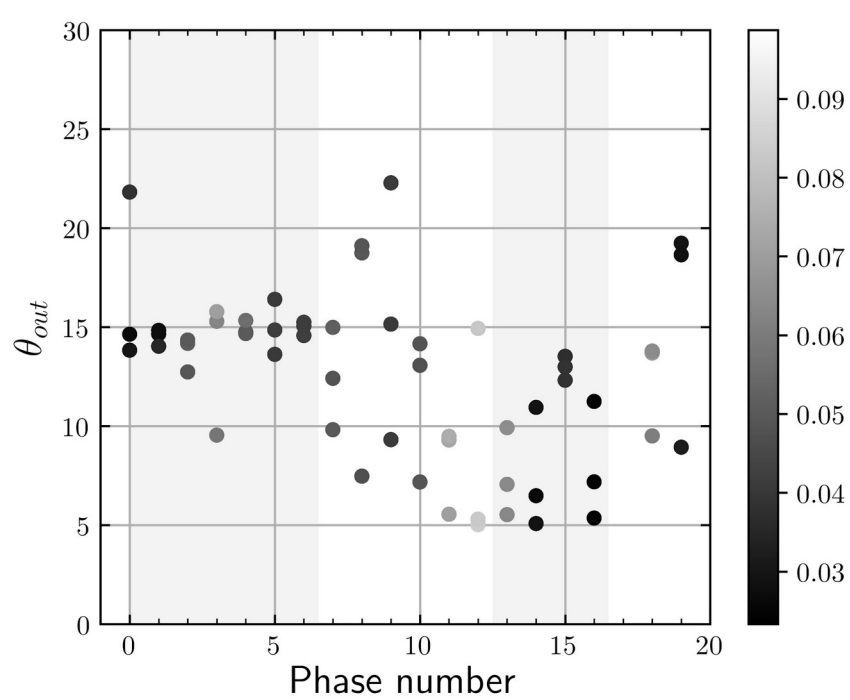
Lipunov, Semionov, Shakura (1981)

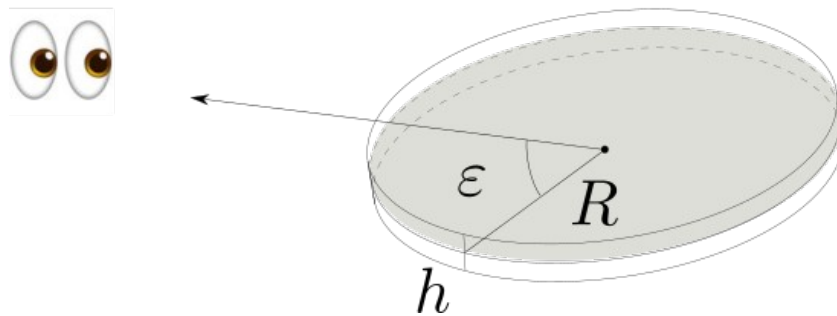
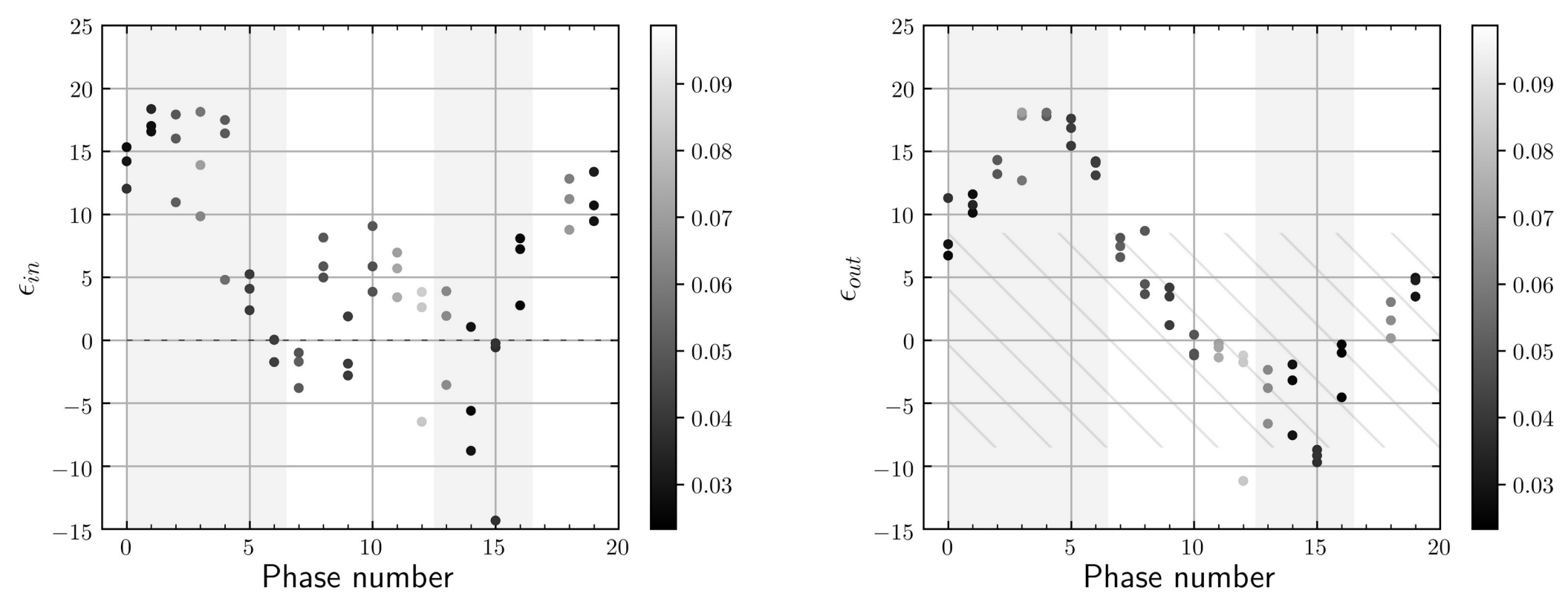


$$K_m = \frac{4\mu^2}{3\pi R_d^3} \cos \alpha \sin \alpha (3 \cos^2 \beta - 1)$$

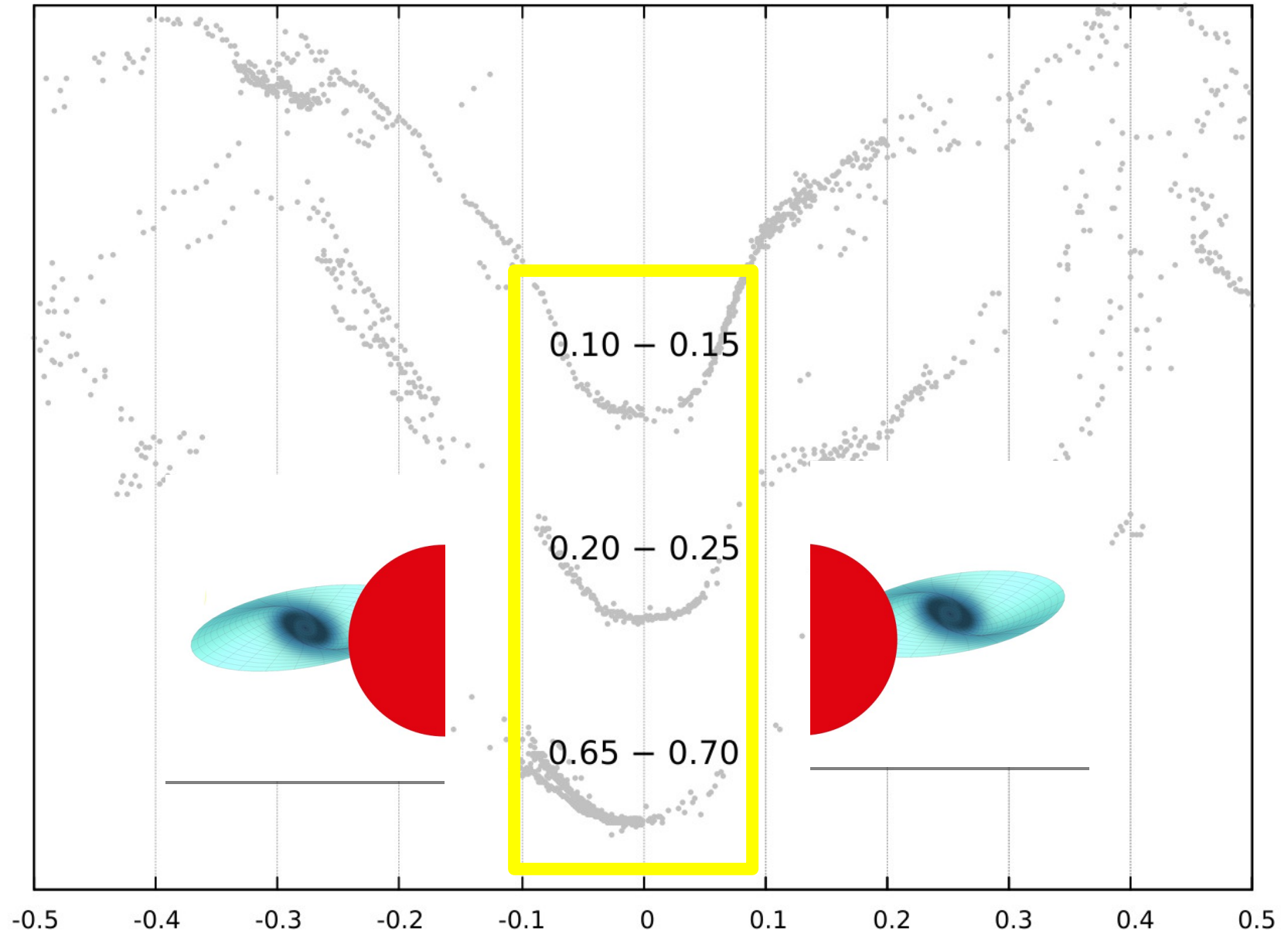
$$\beta_0 = \arccos(\sqrt{3}/3) \approx 54.7^\circ$$







Next we are going to model main minima



どうもありがとう

