

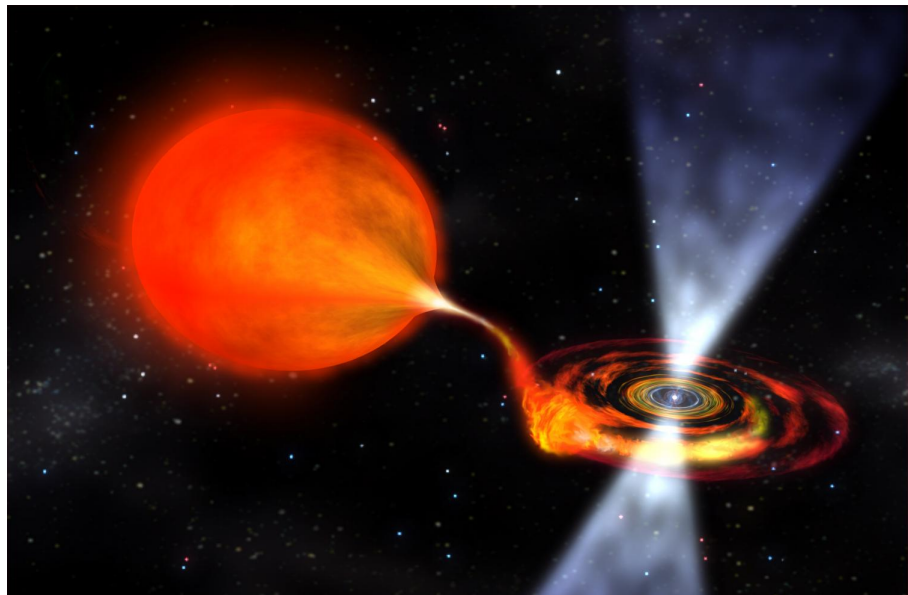
Гидродинамика и излучение аккреционных колонок рентгеновских пульсаров

И. Д. Маркозов¹, А. Ю. Потехин¹, А. Д. Каминкер¹, А. А. Муштуков²

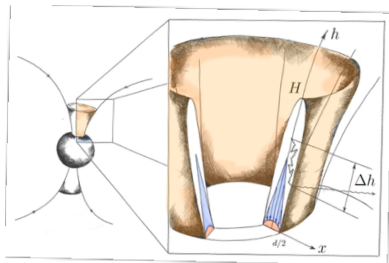
¹*ФТИ имени А. Ф. Иоффе*, ²*University of Oxford*

Семинар отдела релятивистской астрофизики
ГАИШ МГУ

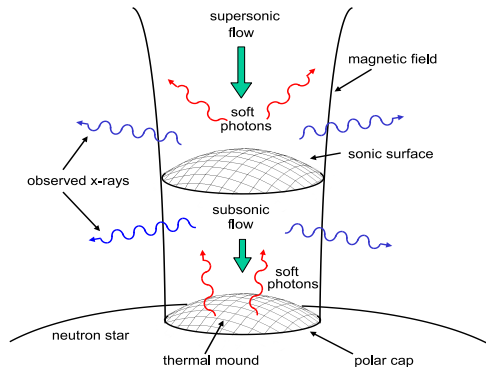
Рентгеновские пульсары



Аккреция на полюса

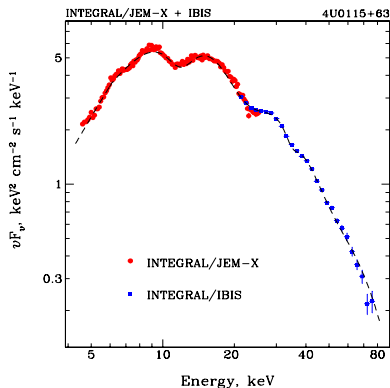


Схематическое изображение
аккреционной колонки
A. Mushtukov et al., 2018,
MNRAS, 476, 2867–2873

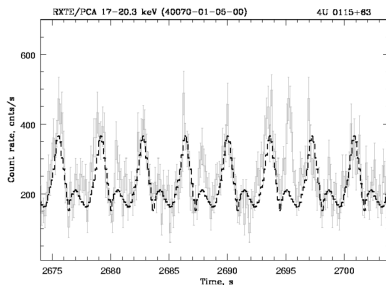


P. A. Becker, M. T. Wolff, 2007,
The Astrophysical Journal,
Volume 654, pp. 435-457

Наблюдения



Спектр пульсара 4U 0115+63 по данным обсерватории INTEGRAL.

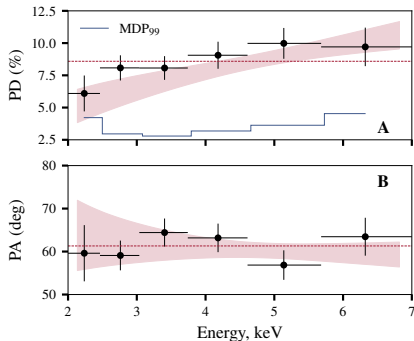


Кривая блеска 4U 0115+63 по данным обсерватории INTEGRAL.

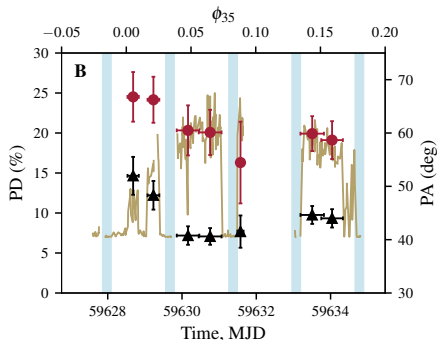
С.С. Цыганков и др., 2007, Письма в Астрон. ж., т. 33, № 6, с. 417-434

Наблюдения IXPE

Her X-1:



Усреднённые по профилю пульса
степень (PD) и угол (PA)
поляризации Her X-1.



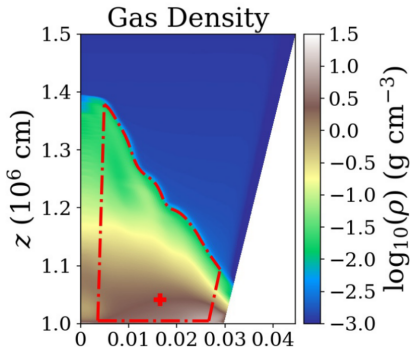
Наблюдаемый поток
(коричневый), степень (чёрный)
и угол (красный) поляризации Her
X-1 в зависимости от времени.

Предыдущие результаты. Моделирование аккреционной колонки.

- Стационарное моделирование. Радиационно-доминированные ударные волны.
- Нестационарное моделирование. Фотонные пузыри.
- Сильно докритическая аккреция. Бесстолкновительные ударные волны.

Общая проблема всех моделей: учёт переноса излучения с магнитным полем.

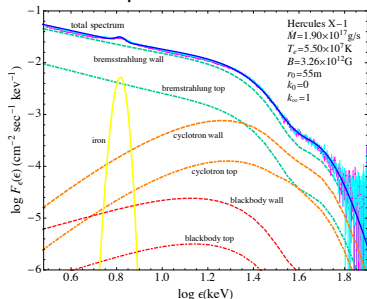
Двумерная структура колонки.



L. Zhang, O. Blaes, Y.-F. Jiang 2023
MNRAS, 520, 1, 1421–1438.

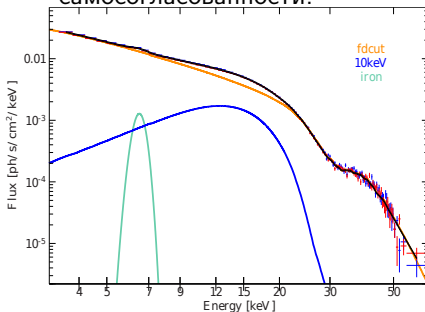
Предыдущие результаты. Моделирование спектров.

Почти самосогласованная модель,
не учитывающая резонансное
рассеяние.



P. A. Becker, M. T. Wolff, 2022
The Astrophysical Journal,
Volume 939, Issue 2, id.67, 34 pp.

Модель с учётом резонансного
рассеяния, но без
самосогласованности.



Schwarm et al., 2017
Astronomy & Astrophysics, Volume
601, id.A99, 11 pp.

Постановка задачи

- Рассматриваются докритические рентгеновские пульсары с заполненной аккреционной колонкой.
- Моделируется структура плазмы, аккрецирующей на полюса нейтронной звезды.
- Рассчитываются характеристики излучения, выходящего из аккреционной колонки.

Математическая модель

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho e + \frac{1}{2} \rho u^2) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} h + \frac{1}{2} \rho \vec{u} u^2) = Q_g - \int dE \int_{4\pi} d\Omega (j_E - k_E I_E) \\ \frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) + \nabla p = -\frac{1}{c} \int dE \int_{4\pi} d\Omega \vec{n} (j_E - k_E I_E) + \vec{F}_g \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \vec{n} \cdot \vec{\nabla} I_E^m &= j_E^m - k_E^m I_E^m = \\ &= \sum_{q=1}^2 \int_0^\infty dE' \int_{4\pi} d\Omega' [R_{mq}(E, \Omega | E', \Omega') I_{E'}^q(\Omega') - R_{qm}(E', \Omega' | E, \Omega) I_E^m(\Omega)] \end{aligned}$$

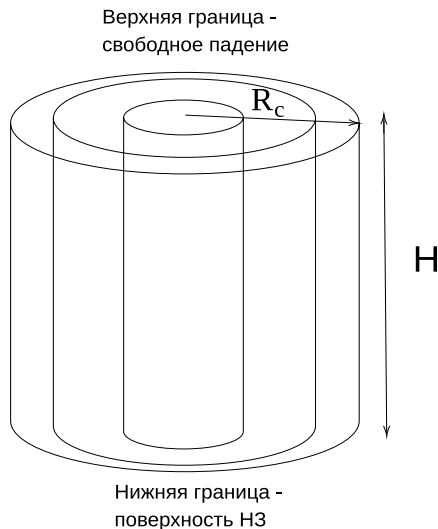
Граничное условие сверху: $\dot{M} = \text{const}$, $u = \sqrt{2GM/(R+H)}$
Граничное условие снизу: $\frac{dp}{dz} = \frac{du}{dz} = 0$; $E_r = E_k + E_{\text{back}}$

Решение

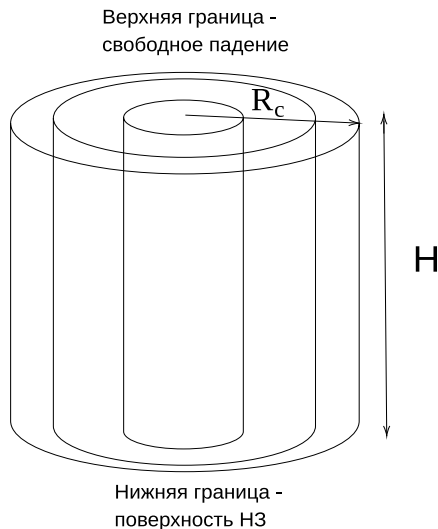
- Использовалась схема с расщеплением.
- Гидродинамическая часть кода – метод PPMLR, библиотека VH-1. Из-за того что в сильном поле макроскопическое движение электронов поперёк магнитных линий запрещено, задача из явно двумерной вырождается в квазиодномерную.
- Перенос излучения - метод Монте-Карло.

Сетка

- Расчётная область – цилиндр радиуса R_c и высоты H .
- Равномерная сетка по высоте. Поперечное сечение цилиндра дробилось на кольца равных площадей.
- Для каждого кольца отдельно решалась одномерная гидродинамическая задача.

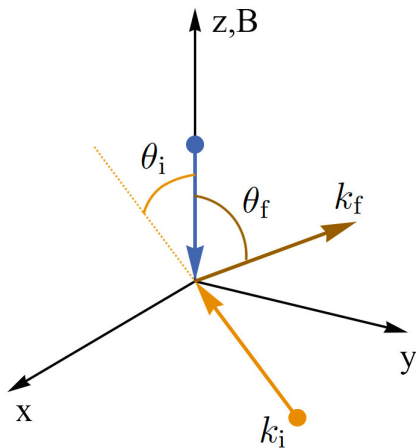


- Начальные условия – свободное падение.
- Верхняя граница: $\dot{M} = const$, свободное падение.
- Нижняя граница: полное переизлучение входящей энергии. Спектр излучения чернотельный.



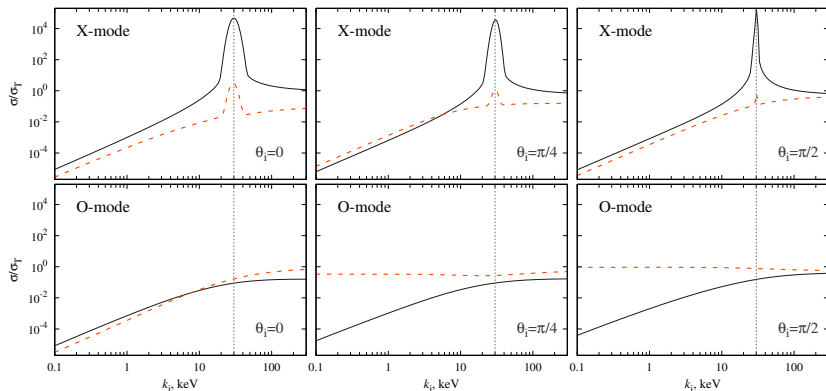
Перенос излучения

- Метод расчёта – Монте-Карло.
- Учитывается только рассеяние без чистого поглощения.
- Сечение рассчитывается с учётом эффектов магнитного поля.



Эффекты магнитного поля

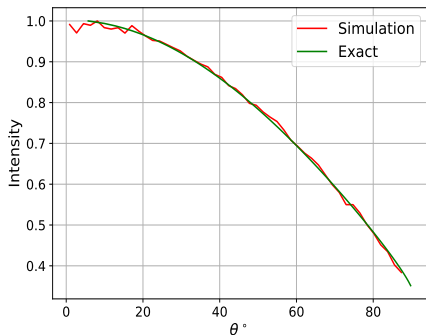
- Двулучепреломление \rightarrow две ортогональные эллиптические моды.
- Изменение волновых функций электронов \rightarrow возникновение резонансов.



A.A. Mushtukov, I.D. Markozov et al., 2022, Phys. Rev. D 105, 103027

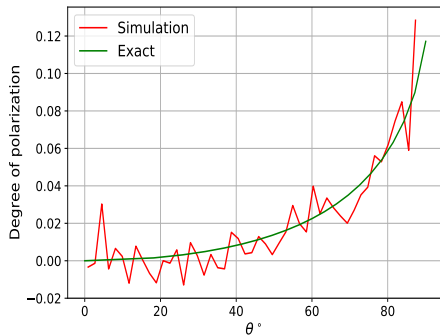
Верификация модели. Перенос излучения.

Задача о серой атмосфере.



Угловое распределение
интенсивности.

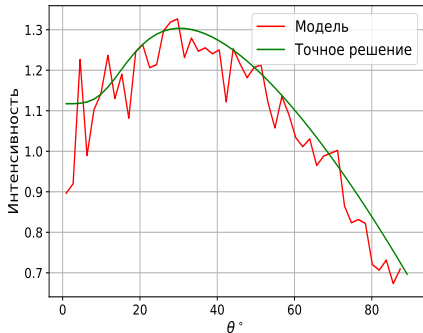
Рэлеевское рассеяние.



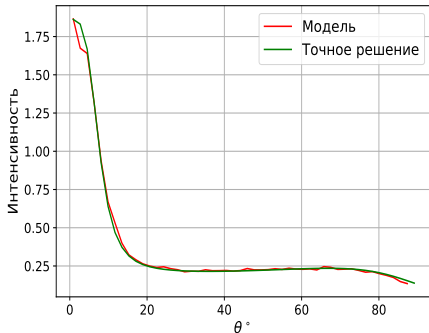
Угловое распределение
степени поляризации.

Верификация модели. Перенос излучения.

Угловое распределение интенсивности.



X-мода.

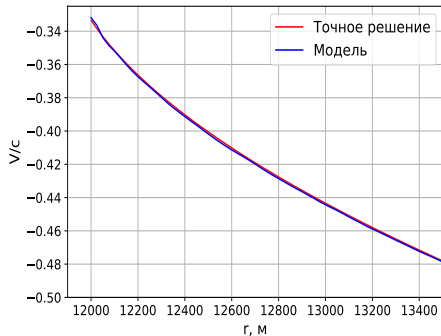


O-мода.

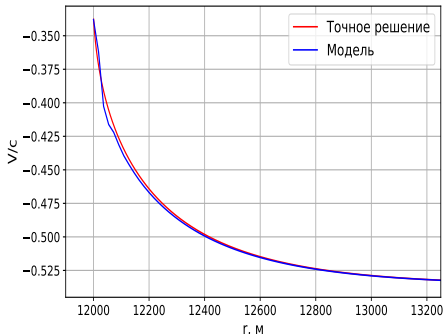
Полубесконечная магнитная атмосфера
 $B = 4.4 \cdot 10^{12}$ Гс, $N = 10^{23}$ см $^{-3}$.

Верификация модели. Одномерная гидродинамика.

Когерентное рассеяние
«вперёд-назад».

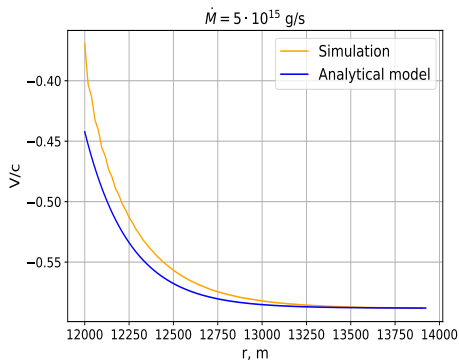
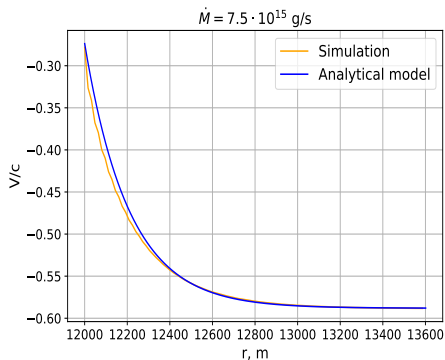


Чистое поглощение.



Распределение скорости.

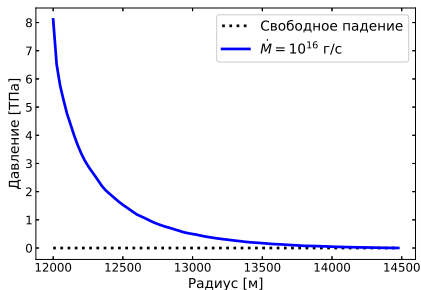
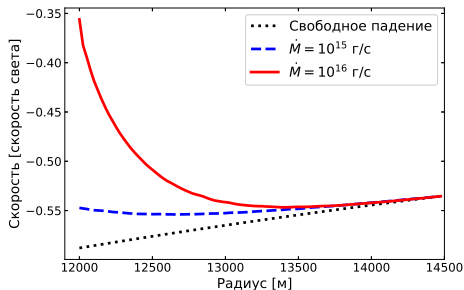
Сравнение с (полу)аналитической моделью колонки



Сравнение с работой Basko&Sunyaev (MNRAS, 1976, 175, 395-417).
Параметры: $M = 1.4 \odot$, $R = 12$ км, $R_c = 550$ м.

Результаты. Гидродинамика

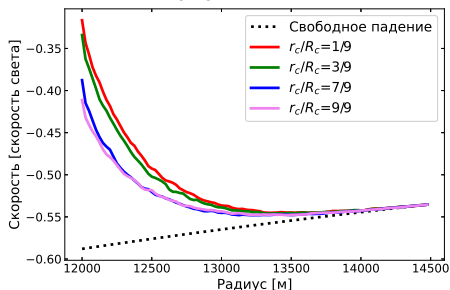
Скорость и давление, усреднённые по радиусу цилиндра:



Параметры: $M = 1.4$ массы Солнца, $R = 12$ км, $R_c = 1$ км, рассеяние упругое, сечение томсоновское.

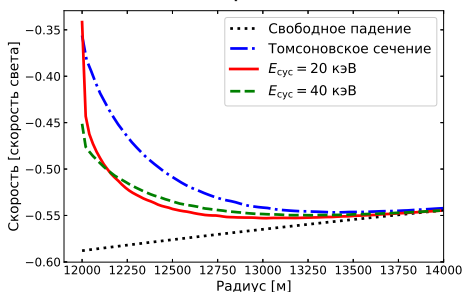
Куполообразная структура и сравнение рассеяний

Распределение скорости для
разных расстояний от центра
колонки



$M = 1.4M_{\odot}$, $R = 12$ км,
 $R_c = 1$ км, $\dot{M} = 10^{16}$ г/с, рассеяние
упругое, сечение томсоновское.

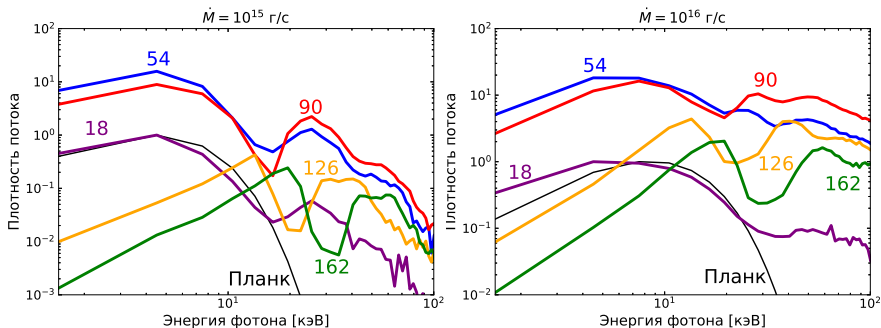
Сравнение магнитного и
немагнитного рассеяний



$M = 1.4M_{\odot}$, $R = 12$ км,
 $R_c = 1$ км, $\dot{M} = 10^{16}$ г/с.

Спектры 1

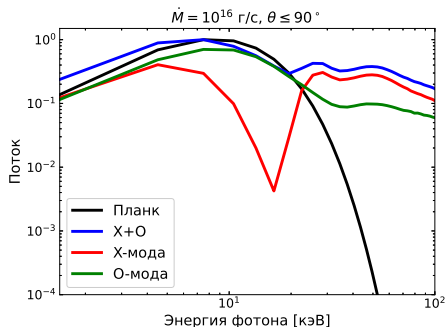
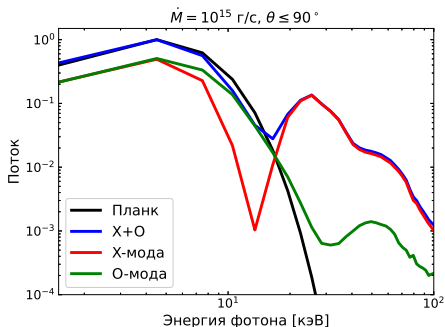
Средняя плотность потока в интервале $\theta \pm \frac{\delta\theta}{2}$ ($\delta\theta = \frac{\pi}{50}$) от энергии фотонов. θ отсчитывается от внешней нормали к полюсу НЗ. Нормировка на максимум для кривой $\theta = 18^\circ$:



Параметры: $M = 1.4 M_{\odot}$, $R = 12 \text{ км}$, $R_c = 1 \text{ км}$, $E_{\text{сус}} = 20 \text{ кэВ}$.

Спектры 2

Спектральные потоки по углам $\theta \leq 90^\circ$ для мод X и O, нормированные на максимум суммы потоков по двум поляризациям:

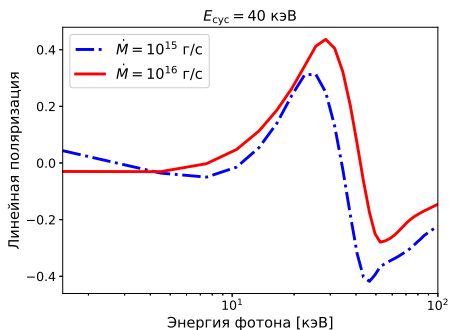
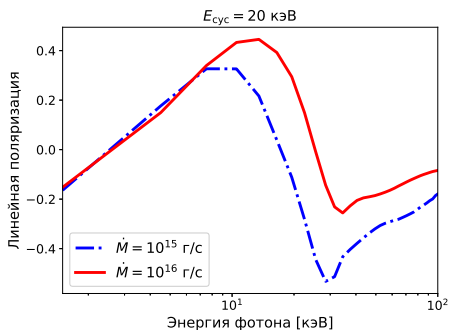


Параметры: $M = 1.4 M_\odot$, $R = 12 \text{ км}$, $R_c = 1 \text{ км}$, $E_{\text{сус}} = 20 \text{ кэВ}$.

Линейная поляризация

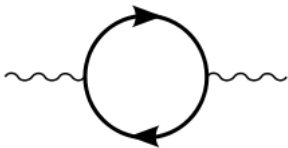
$$P_L = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \frac{|q|}{\sqrt{1 + q^2}}, \quad q = \sqrt{u} \frac{\sin^2 \theta}{2 \cos \theta} \left(1 - W \frac{u - 1}{u^2} \right), \quad u = \frac{E_{\text{сис}}^2}{E^2}$$

$W = \frac{3.0 \cdot 10^{28} \text{ г/см}^3}{n} \left(\frac{B}{B_Q} \right)^4$ – параметр вакуума (без учёта поляризации вакуума $W = 0$).



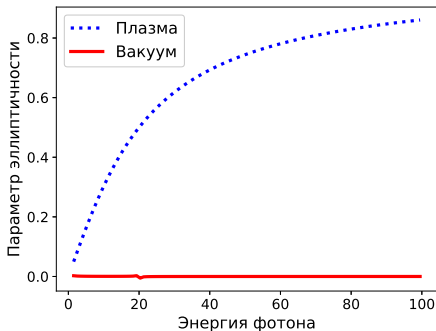
Поляризация вакуума

При $E_{\text{сус}} = 40$ кэВ параметр вакуума $W \approx 6 \cdot 10^4$, энергия вакуумного резонанса $E_v = \frac{E_{\text{сус}}}{\sqrt{W}} \approx 0.2$ кэВ.



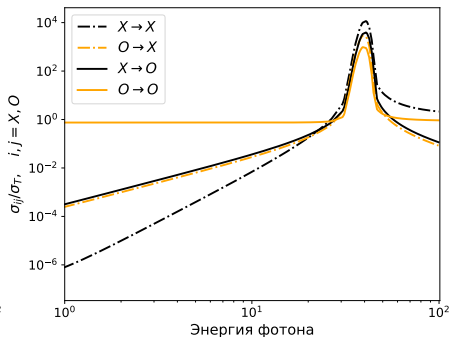
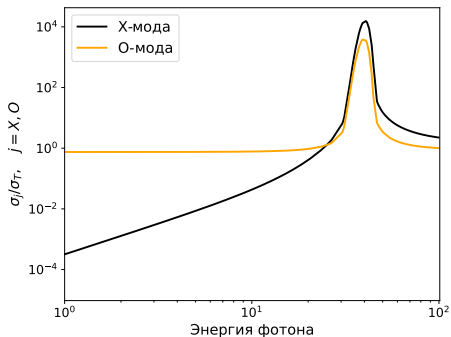
Для «кольца» толщиной $5 \cdot 10^3$ см в основании колонки при $\dot{M} = 10^{16}$ г/с, $E_{\text{сус}} = 40$ кэВ:
 $\rho \approx 10^{-2}$ г/см³, $W \approx 1.5 \cdot 10^3$,
 $E_v = \frac{E_{\text{сус}}}{\sqrt{W}} \approx 1$ кэВ.

Параметр эллиптичности $K^j = -i \frac{E_y^j}{E_x^j}$.
 $E_{\text{сус}} = 20$ кэВ, $\theta = \frac{\pi}{3}$,
 $\rho = 3.0 \cdot 10^{-5}$ г/см³, $T = 5$ кэВ.

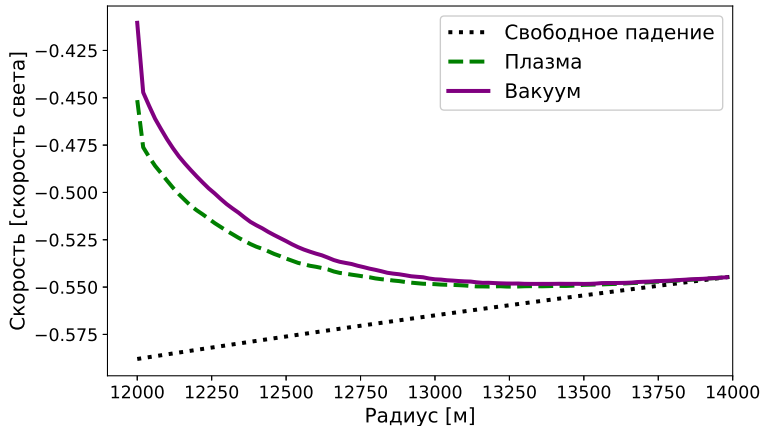


Сечения рассеяния с учётом вакуума

$$\rho = 3.0 \cdot 10^{-5} \text{ г/см}^3, E_{\text{сус}} = 40 \text{ кэВ}, \theta = \frac{\pi}{3}.$$



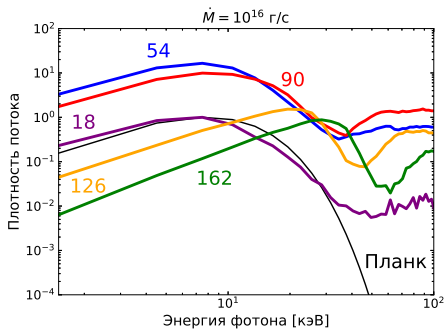
Поляризация вакуума. Гидродинамика.



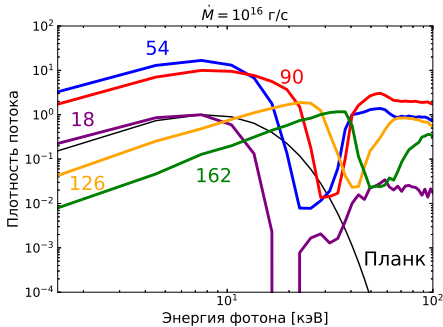
Параметры: $M = 1.4_{\odot}$, $R = 12$ км, $R_c = 1$ км, $E_{\text{сус}} = 40$ кэВ.

Спектры

Средняя плотность потока в интервале $\theta \pm \frac{\delta\theta}{2}$ ($\delta\theta = \frac{\pi}{50}$) от энергии фотонов. θ отсчитывается от внешней нормали к полюсу НЗ. Нормировка на максимум для кривой $\theta = 18^\circ$:



Плазма.

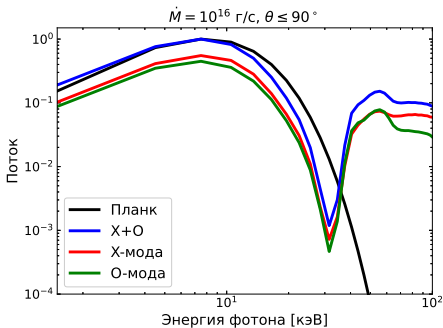


Вакуум+плазма.

Параметры: $M = 1.4_{\odot}$, $R = 12$ км, $R_c = 1$ км, $E_{\text{сус}} = 40$ кэВ.

Поляризация

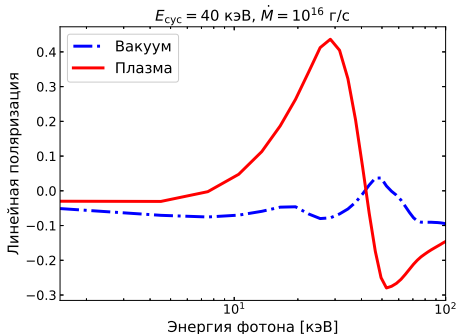
Спектральные потоки по углам $\theta \leq 90^\circ$ для мод X и O, нормированные на максимум суммы потоков по двум поляризациям:



Вакуум+плазма.

Параметры: $M = 1.4_{\odot}$, $R = 12$ км, $R_c = 1$ км, $E_{\text{cyc}} = 40$ кэВ.

Сравнение степени линейной поляризации при учёте только плазмы и вакуума+плазмы.



Итоги:

- Написана и протестирована программа, реализующая решение уравнений радиационной газодинамики и переноса излучения.
- Получены спектры и поляризация рентгеновского излучения аккреционной колонки.
- Показана зависимость формы циклотронной особенности от направления излучения.
- Для рассмотренных темпов аккреции доминирует поляризация вакуума, нормальные моды становятся линейно поляризованными, степень поляризации суммарного излучения мала во всём диапазоне энергий.
- Без учёта поляризации вакуума: $E \approx E_{\text{cyc}}$ – сильная поляризация, $E > E_{\text{cyc}}$ – зависимость поляризации от темпа аккреции, $E < E_{\text{cyc}}$ – степень поляризации мала.

Планируется

- Перейти к режиму сверхкритической аккреции.
- Учесть тормозные и циклотронные процессы в сильном магнитном поле.
- Перейти к расчётам в рамках релятивистской газодинамики.
- Учесть циклотронные гармоники в выражениях для сечений рассеяния, следующие из формул КЭД.
- Учесть кривизну линий магнитного поля и двухтемпературную плазму.