

О неопределённости в измерении светимости рентгеновских пульсаров с аккреционной колонкой

И.Д. Маркозов¹, А.А. Муштуков^{2,3,4}, Д.И. Нагирнер¹

1 Санкт-Петербургский государственный университет, математико-механический факультет

2 Leiden Observatory, Netherlands

3 Пулковская обсерватория РАН

4 Институт космических исследований РАН



Universiteit
Leiden



IKI

Рентгеновские пульсары – это нейтронные звезды с сильным магнитным полем, принадлежащие тесным двойным системам, где со звезды-компаньона на нейтронную звезду происходит процесс аккреции. Вещество стекает по силовым линиям магнитного поля на поверхность нейтронной звезды, вследствие чего появляется рентгеновское излучение. При малых темпах аккреции источником излучения является полярная шапка на поверхности НЗ, однако с увеличением скорости выпадения вещества рентгеновская светимость становится столь большой, что над полюсом возникает плотный столб вещества — светящаяся аккреционная колонка.

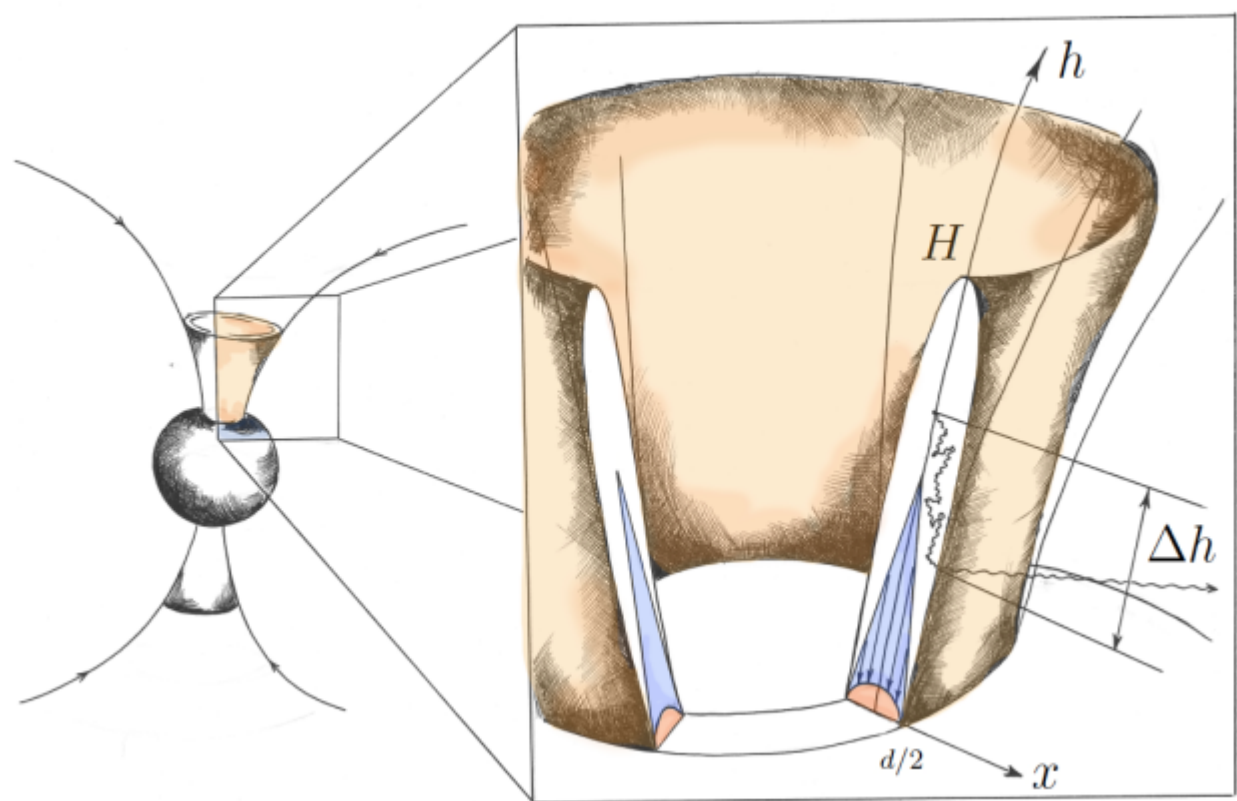
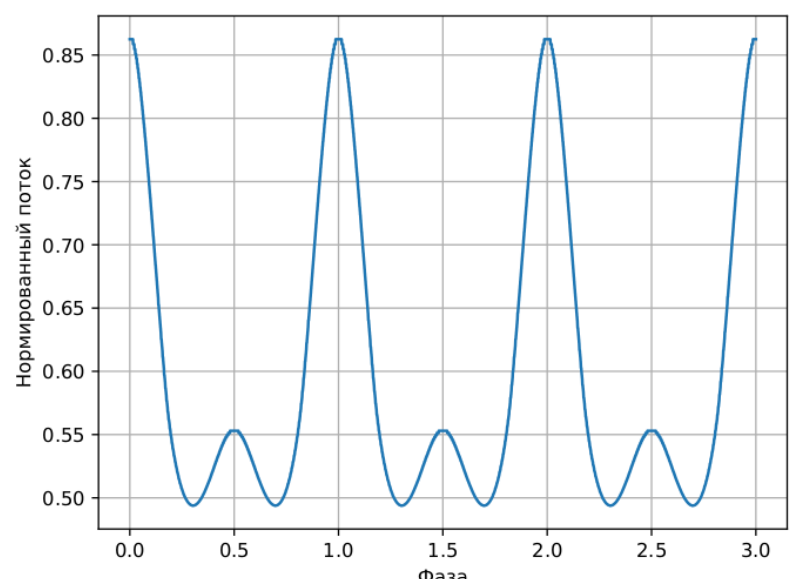
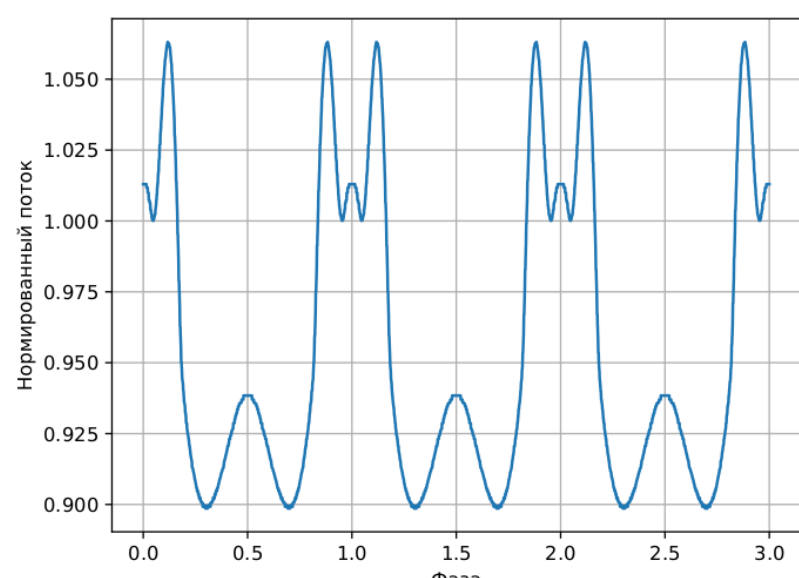


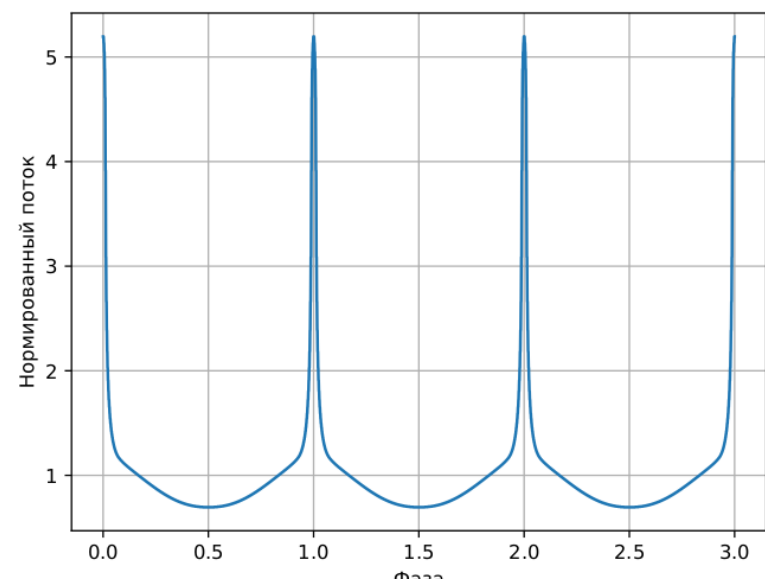
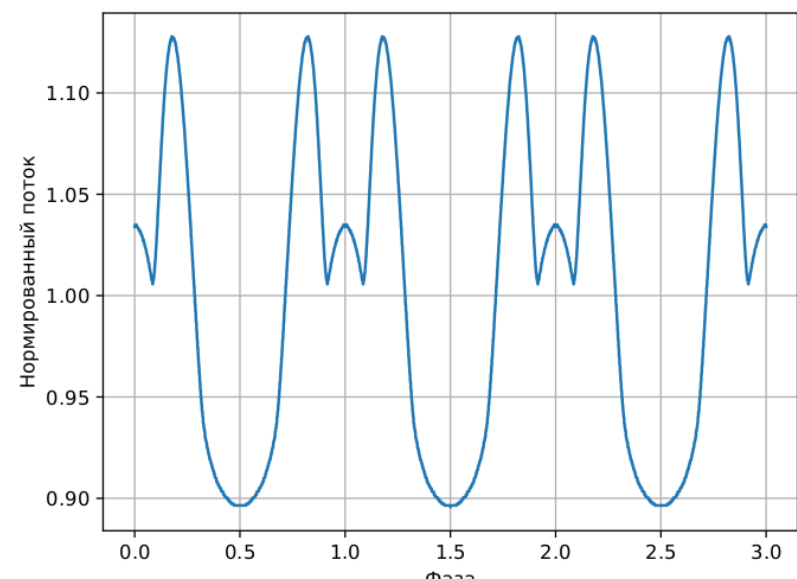
Рис 1: Схематичное изображение аккреционной колонки около поверхности нейтронной звезды (Mushtukov et al., 2015, MNRAS, 454, 2539).

Таким образом, светимость рентгеновского пульсара является важным параметром, определяющим структуру аккреционного потока около полюсов НЗ. Однако, её измерение подвержено ошибкам. Наблюдаемый поток зависит от углов между осью вращения нейтронной звезды - магнитной осью и между осью вращения - направлением на наблюдателя. В данный момент точное определение этих углов не представляется возможным, поэтому для оценки светимости используется усреднённый по профилю пульса поток, что и приводит к неточностям. С целью анализа таких ошибок была создана программа, моделирующая профили пульса нейтронной звезды для конкретного наблюдателя. Затем, принимая углы ориентации нейтронной звезды за равномерно распределённые случайные величины, были посчитаны статистические характеристики наблюдаемых светимостей рентгеновских пульсаров.



$$H = 1 \text{ км}, \theta_{obs} = \frac{\pi}{2.5}, \theta_{col} = \frac{\pi}{4}$$

$$H = 12 \text{ км}, \theta_{obs} = \frac{\pi}{2.5}, \theta_{col} = \frac{\pi}{4}$$



$$H = 2 \text{ км}, \theta_{obs} = \frac{\pi}{5}, \theta_{col} = \frac{\pi}{5}$$

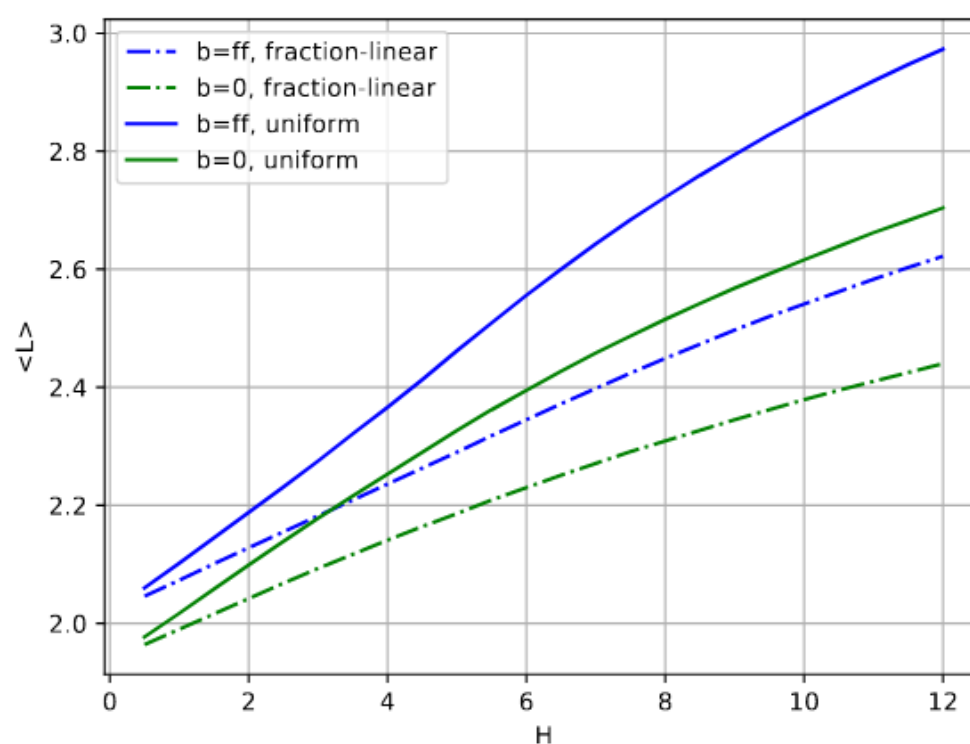
$$H = 8 \text{ км}, \theta_{obs} = \frac{\pi}{6}, \theta_{col} = \frac{\pi}{6}$$

Рис 2: Пример профилей пульса от пульсара с аккреционной колонкой для различных наблюдателей. H — высота колонки, θ_{obs} - угол между направлением на наблюдателя и осью вращения НЗ, θ_{col} - угол между магнитной осью и осью вращения НЗ. Масса НЗ 1.4 массы Солнца, радиус 12 км.

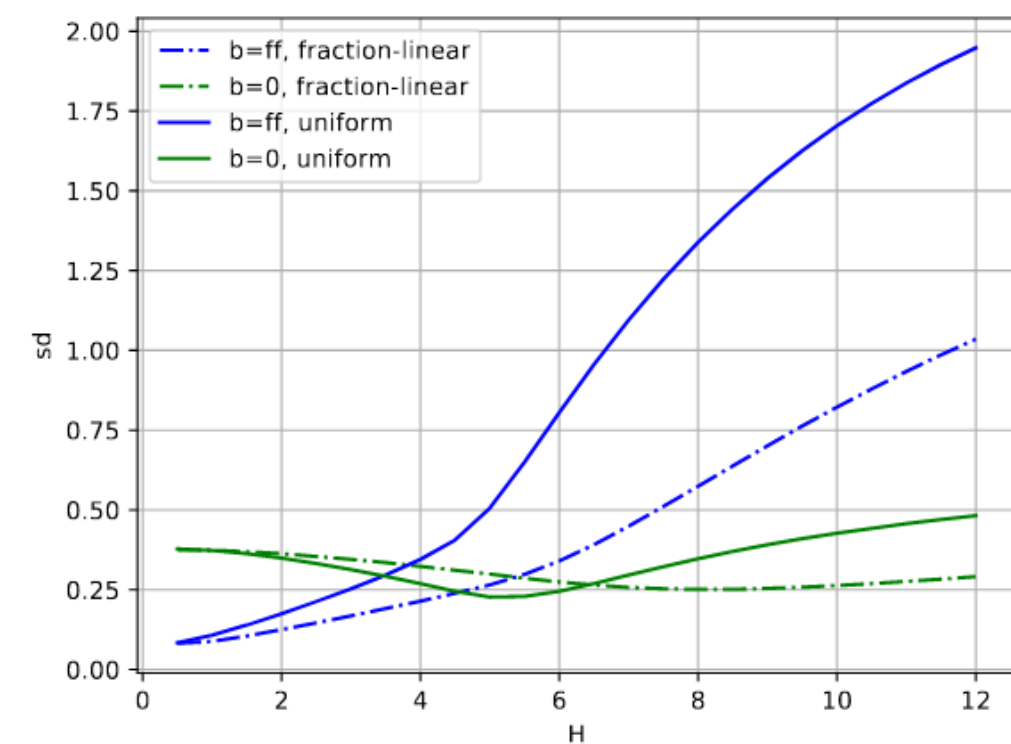
Как видно из Рис. 2, при некоторых значениях высоты колонки и углов ориентации происходит мощное усиление потока на целочисленных значениях фазы, что приводит к ошибке в измерении светимости.

В модель закладывалось два возможных распределения яркости по высоте колонки: однородное и дробно-линейное (Mushtukov et al. 2015, MNRAS, 454, 2539-2548). Были учтены эффекты общей теории относительности и отражение от поверхности нейтронной звезды. Диаграмма направленности излучения стенок колонки была взята из Poutanen et al. 2013, ApJ, 777, 115. Было рассмотрено два предельных случая: стенки колонки покоятся и стенки колонки движутся со скоростью свободного падения.

Результаты (истинная светимость равна 2.0):

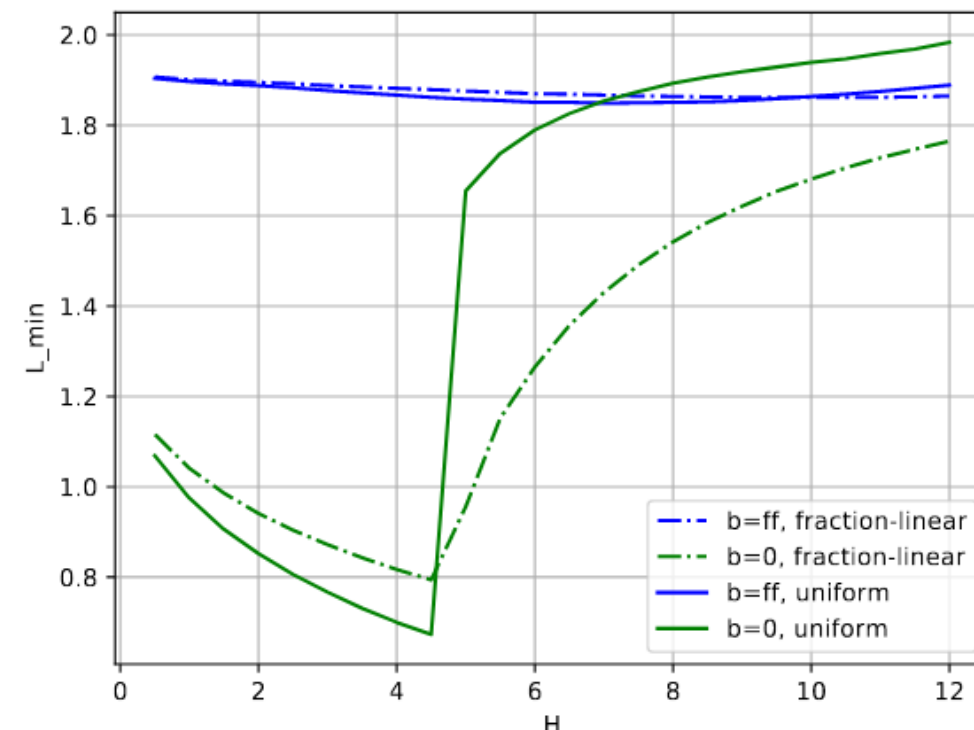
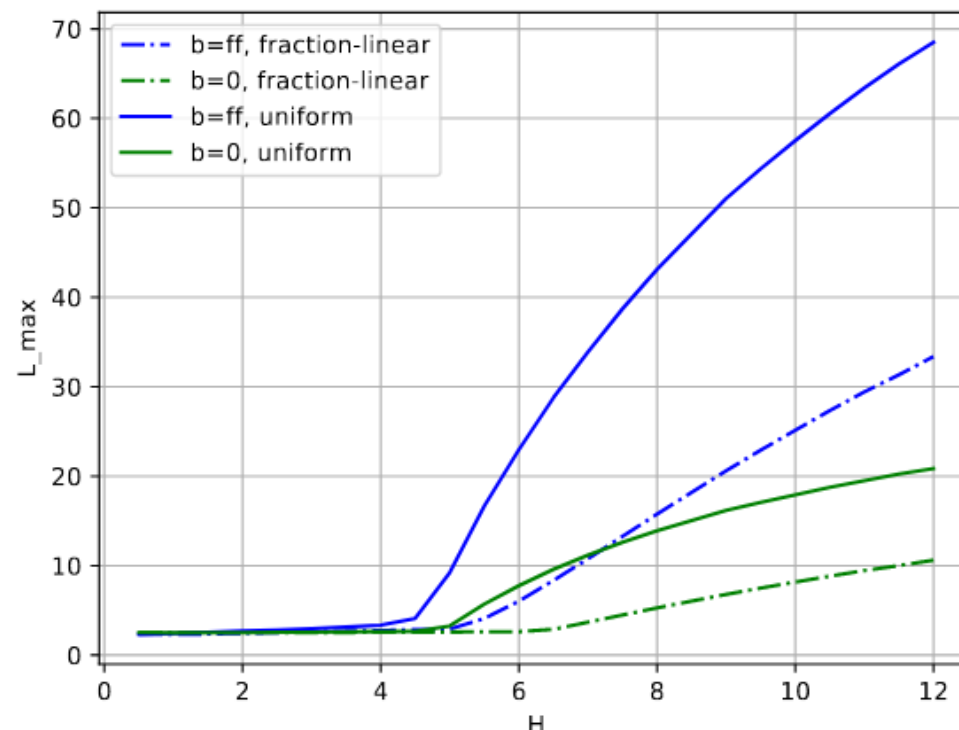


Матожидание



Дисперсия

Рис 3: Средняя наблюдаемая светимость рентгеновского пульсара и её стандартное отклонение в зависимости от высоты колонки в километрах. Синяя линия — стенки колонки движутся со скоростью свободного падения, зеленая — стенки колонки покоятся. Сплошная линия — однородное распределение яркости по высоте колонки, штрих-пунктир — дробно-линейное распределение. Масса нейтронной звезды 1.4 массы Солнца, радиус нейтронной звезды 12 км.



Максимальная светимость

Минимальная светимость

Рис 4: Максимальная и минимальная наблюдаемые светимости рентгеновского пульсара в зависимости от высоты колонки в километрах. Синяя линия — стенки колонки движутся со скоростью свободного падения, зеленая — стенки колонки покоятся. Сплошная линия — однородное распределение яркости по высоте колонки, штрих-пунктир — дробно-линейное распределение. Масса нейтронной звезды 1.4 массы Солнца, радиус нейтронной звезды 12 км.

Видно, что в случае однородной колонки наблюдаемые светимости получаются выше, чем в случае дробно-линейной. Это связано с тем, что, начиная с некоторой высоты колонки, большая доля излучения при помощи гравитационного поля звезды концентрируется в малый телесный угол на противоположной стороне от колонки.

Пусть β — скорость стенок колонки, P_{10} - вероятность превышения светимости в 10 раз. Тогда:

- Дробно-линейная колонка:
 $\beta = \text{free-fall}, H = 12 \text{ км}: P_{10} = 0.0005$
 $\beta = \text{free-fall}, H = 9.5 \text{ км}: P_{10} = 6 \cdot 10^{-5}$
 $\beta = 0, H = 12 \text{ км}: P_{10} = 0$
- Однородная колонка:
 $\beta = \text{free-fall}, H = 12 \text{ км}: P_{10} = 0.002;$
 $\beta = \text{free-fall}, H = 6 \text{ км}: P_{10} = 0.0003.$
 $\beta = 0, H = 12 \text{ км}: P_{10} = 9.6 \cdot 10^{-5};$

Результаты:

- Написана программа, позволяющая моделировать профили пульса рентгеновского пульсара;
- Произведена оценка ошибок измерения рентгеновской светимости нейтронной звезды, связанных с неточностью определения её углов ориентации в пространстве. Показано, что дисперсия наблюдаемой светимости сравнима, но не превосходит её истинное значение, а завышение в 10 раз является маловероятным событием.