

Численное моделирование динамики аккреционной колонки при акkreции на нейтронную звезду

Павел Аболмасов^{1,2} и Галина Липунова³

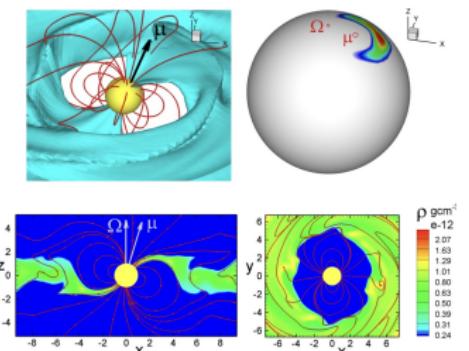
¹ Университет Турку, Финляндия

² Университет Тель Авива, Израиль

³ Институт им. Штернберга, Россия

December 20, 2021

Аккреция на замагнченную нейтронную звезду (взгляд теоретика)



Альфеновский радиус:

$$R_A \simeq \left(\frac{\mu^2}{2\dot{M}\sqrt{2GM_*}} \right)^{2/7}.$$

Внутри $\sim R_A$ магнитные напряжения определяют динамику (бессиловая область)
Вдоль силовой линии – гидродинамика.

Romanova et al. (2014)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad \text{неразрывность} \quad (1)$$

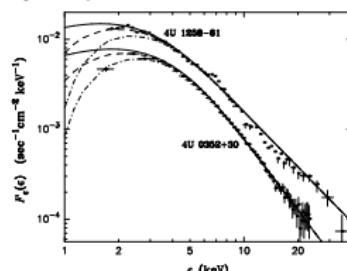
$$\frac{\partial v_I}{\partial t} + v_I \frac{\partial v_I}{\partial I} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial I} \quad \text{Эйлер} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (uv) = \underbrace{-p(\nabla \cdot v)}_{\text{адиабатический нагрев}} - \rho(v\nabla)\Phi + \dots \quad \text{энергия} \quad (3)$$

Рентгеновские пульсары: взгляд наблюдателя

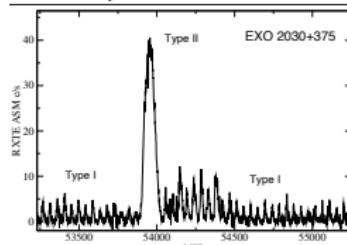
- ▶ Массивные рентгеновские двойные (в основном)
- ▶ Светимости $10^{34} - 10^{39}$ эрг с $^{-1}$ (могут быть и меньше, и больше)
- ▶ Магнитосферы размером в десятки-сотни R_*
- ▶ Жесткие, приблизительно степенные, тепловые (?) рентгеновские спектры
- ▶ Когерентные пульсации
- ▶ Изменение периода вращения НЗ
- ▶ Стохастическая переменность на временах \gtrsim период вращения НЗ \sim динамическое время внешней магнитосферы
- ▶ Циклотронные линии
- ▶ Многое другое

Спектры рентгеновских пульсаров



Из Becker&Wolff (2005)

Переменность (для Be/X-ray системы)



Из Reig 2011

Аккреционный поток достигает поверхности

Характерная оптическая толщина

$$\tau \sim \frac{\kappa \dot{M} R_*}{4\pi v A_{\perp}}.$$

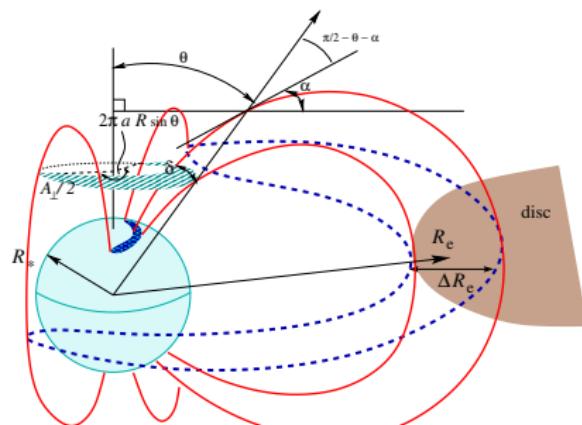
Локальный эддингтоновский предел:

$$\underbrace{\frac{GM}{A_{\perp} R_*} \dot{M}}_{\text{поток энергии излучения } F} \vee \overbrace{\frac{c GM}{\kappa R_*^2}}$$

поток энергии излучения F

Два случая

1. Горячее пятно $\tau \ll 1$, $F \ll F_{\text{Edd}}$
2. Аккреционная колонка $\tau \gg 1$,
 $F \gg F_{\text{Edd}}$



Аналитическая стационарная модель Баско и Сюняева (1976)

Предположения:

- ▶ стационарность
- ▶ давление излучения доминирует над газовым
- ▶ $A_{\perp} \propto R^3$
- ▶ охлаждение за счет диффузии излучения сквозь стенки (поперек силовых линий)
- ▶ внешнее ГУ: $v = -\frac{1}{7}\sqrt{\frac{2GM}{R}}$ (сильная радиационно-доминированная УВ)
- ▶ внутреннее ГУ при $R = R_*$:
плотность энергии $u = 3\frac{B^2}{8\pi}$

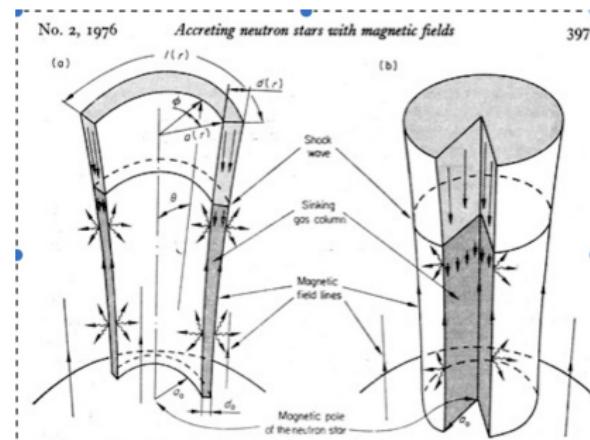


FIG. 1. The configuration of accretion flow in two limiting cases: (a) material is confined to a narrow 'wall' of magnetic funnel, $d_0 \ll a_0$; (b) material fills the whole of the funnel cavity. In the text the case (a) is adopted as the basic one.

Оживление колонки

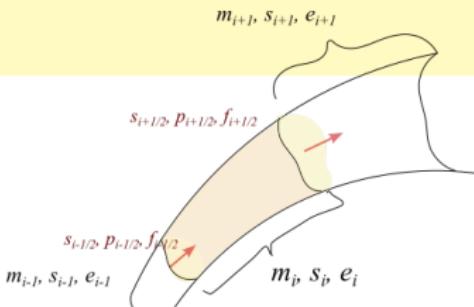
Что дает рассмотрение задачи, зависящей от времени

- ▶ увидеть образование шока
- ▶ проверить, воспроизводится ли стационарное решение, исследовать его устойчивость
- ▶ предсказать переменность аккреционной колонки
- ▶ проверить внешние ГУ (на УВ)
- ▶ проверить внутренние ГУ (на поверхности НЗ)
- ▶ каковы пределы применимости аналитической модели?
- ▶ и многое другое

Что и как было сделано?

Предположения:

- ▶ Геометрия: магнитный диполь с осью вдоль оси вращения НЗ; аккреционный поток в общем случае занимает часть $a < 1$
- ▶ Одномерная ньютоновская гидродинамика вдоль силовых линий
- ▶ Газовое давление + давление излучения
- ▶ Поверхность звезды непроницаема ($v(R_*) = 0$, нет потоков массы и энергии)
- ▶ Вещество попадает с виртуальной скоростью во внешнюю часть магнитосферы с постоянным темпом \dot{M}
- ▶ Если давление (газ+излучение) превышает давление магнитного поля, начинаются потери массы



Метод решения:

- ▶ консервативная схема в 1D
- ▶ сохраняющиеся величины: масса, импульс вдоль силовой линии и энергия
- ▶ сила тяжести входит как источник импульса и энергии, есть возможность добавлять центробежную силу и иррадиацию
- ▶ потери энергии за счет излучения с поверхности (по-разному считается для оптически тонкого и оптически толстого случаев)
- ▶ параметры: $N_x = 9600$, $R_{\max}/R_{\min} = 13, 54 \dots$

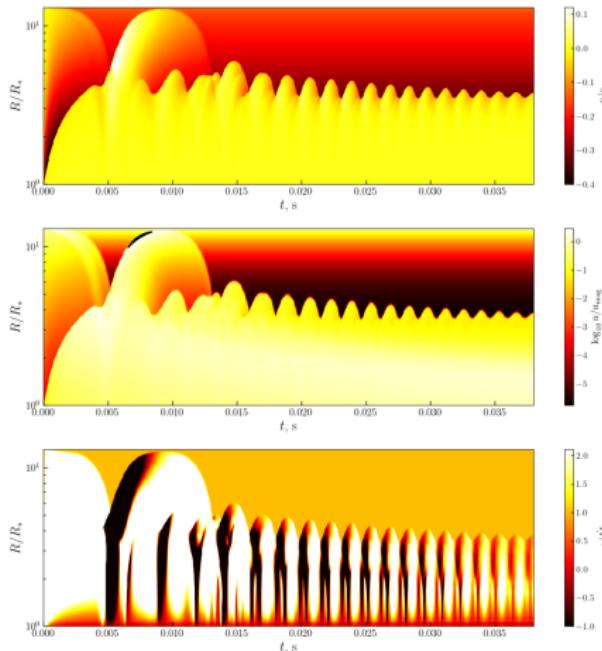
Программа в свободном доступе: HACol = Hydrodynamics of Accretion COLumn,
<https://github.com/pabolmasov/HACol>

Базовая модель

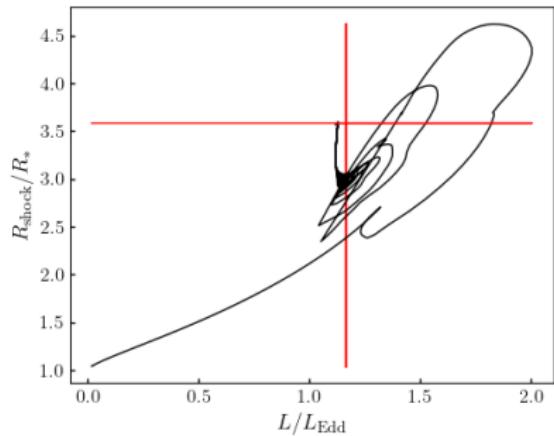
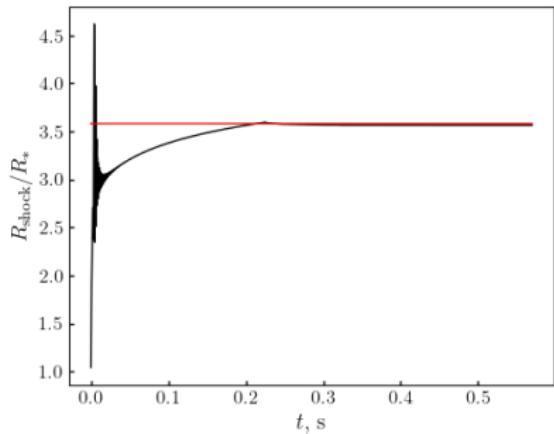
- $\dot{M} = 10L_{\text{Edd}}/c^2$
- $\mu = 10^{29} \text{ G cm}^3$ (поле на поверхности $\sim 10^{11} \text{ Гс}$)
- размер магнитосферы $R_e \sim 14R_*$
- $\Delta R_e/R_e = 1/4$, размер по азимуту $\Delta\varphi = 2\pi a = 2\pi/4$

Время заполнения:

$$t_r \simeq \frac{B^2}{8\pi GM} \frac{A_\perp(R_*)R_*^2}{\dot{M}} \sim 0.04 \text{ с} \quad (4)$$



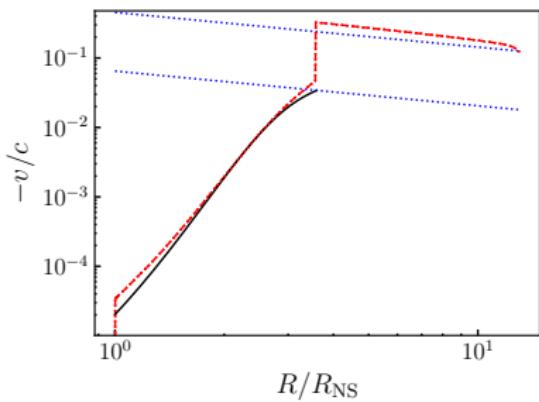
Положение УВ



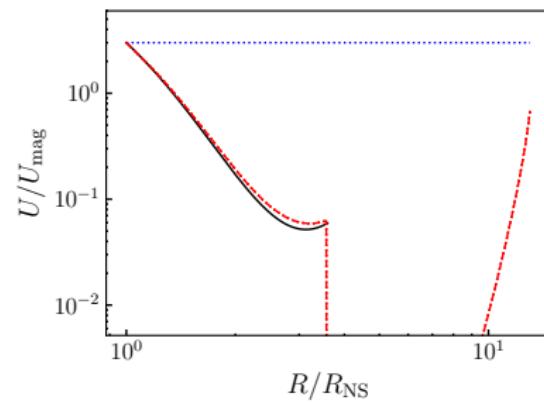
Ожидание/реальность.

Сравнение с аналитическим решением

Скорости:



Плотность энергии:



Аналитика / Численный расчет

$$\sqrt{2GM/R}, \frac{1}{7}\sqrt{2GM/R}$$

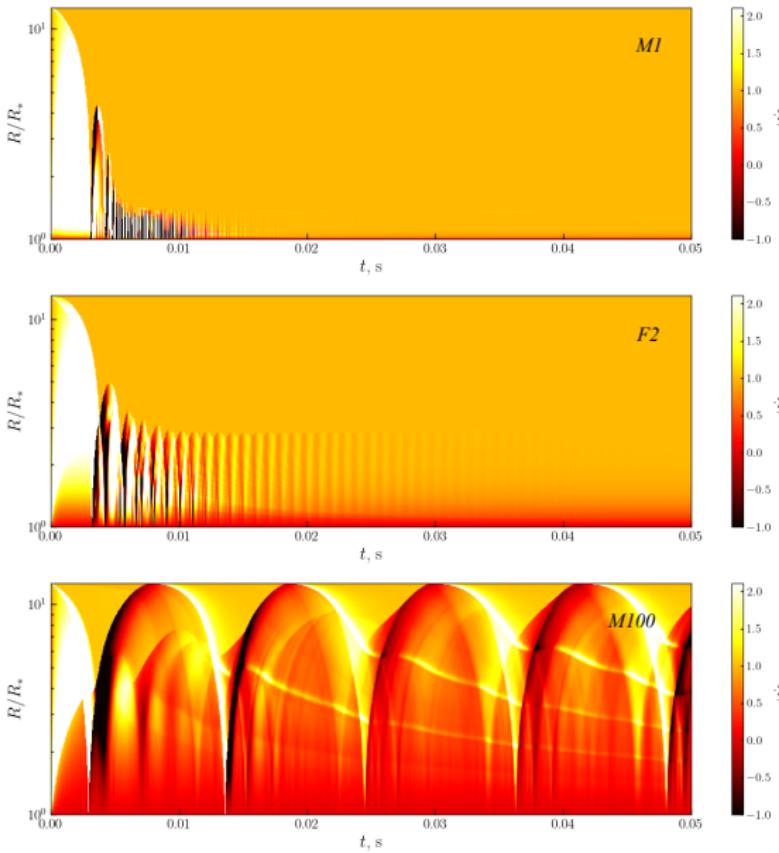
$$U/U_{\text{mag}} = 3$$

$\rho v A_{\perp} / \dot{M}$:

$$\dot{M} = 1L_{\text{Edd}}/c^2$$

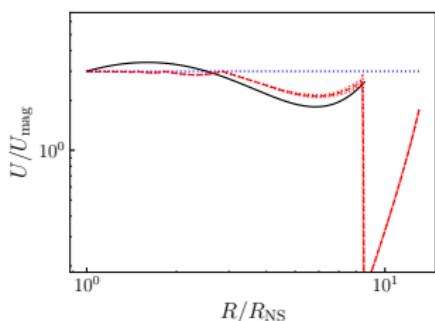
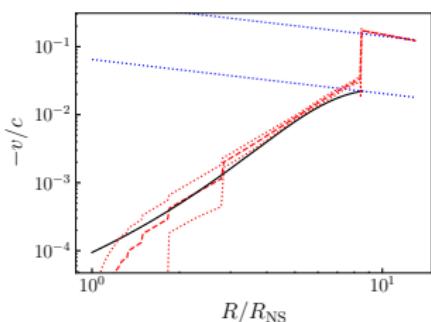
$$\dot{M} = 10L_{\text{Edd}}/c^2$$

$$\dot{M} = 100L_{\text{Edd}}/c^2$$



Адвективный предел

Модель N2 (размер 5% по азимуту, игнорируется излучение боковых стенок)



$$L_X = (1 - \beta) \frac{G M \dot{M}}{R},$$

где β – доля энергии, не выходящей со стенок колонки,

$$\beta = -\frac{4}{3} \frac{R}{GM} \left(\frac{u}{\rho} \right).$$

Если $\beta \gtrsim 1$, вертикальная структура определяется адиабатическим нагревом

$$A_{\perp} u v \simeq \frac{G M \dot{M}}{R} = \frac{G M}{R} A_{\perp} \rho v$$

=>

$$\rho \propto u \propto \frac{GM}{R} \rho.$$

Учитывая адиабатический закон для плотности энергии $u \propto \rho^{\gamma}$, $\gamma = 4/3$,

$$u \propto R^{-4}.$$

В то же время, $u_{\text{mag}} \propto R^{-6}$.

Более точно: если $\beta > 2/3$, то в отношении u/u_{mag} есть максимум, расположенный выше поверхности звезды, что делает решение несамосогласованным.

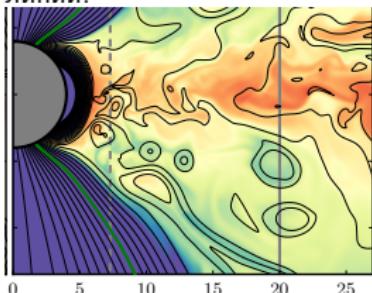


Потери массы из колонки: три сценария

- ▶ Глобальный эддингтоновский предел не превышен – вещество опускается на поверхность НЗ за пределами ожидаемого “горячего пятна”
- ▶ Эддингтоновский предел превышен и вещество попадает на **замкнутые силовые линии**: запертое левитирующее вещество, см. Abolmasov & Biryukov (2020)
- ▶ Эддингтоновский предел превышен и вещество попадает на **открытые силовые линии**: ускорение давлением излучения до

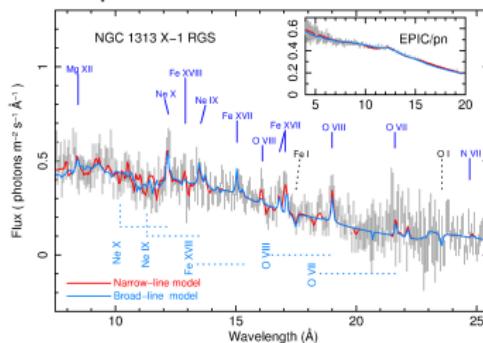
$$v_{\text{out}} \simeq \sqrt{\frac{\kappa L}{4\pi R_*}} = \sqrt{\frac{L}{L_{\text{Edd}}} \frac{GM_*}{R_*}} \simeq 0.4 \sqrt{\frac{L}{L_{\text{Edd}}} \frac{M_*}{1.4 M_\odot} \frac{11\text{km}}{R_*}} c.$$

Открытые и закрытые силовые линии:



Из Parfrey & Tchekhovskoy (2017)

Релятивистские ($v \sim 0.2 - 0.25c$) линии поглощения в спектре ULX:

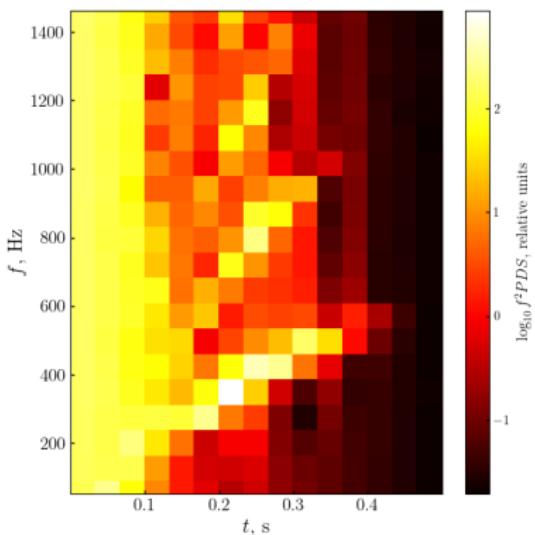


Pinto et al.(2017)

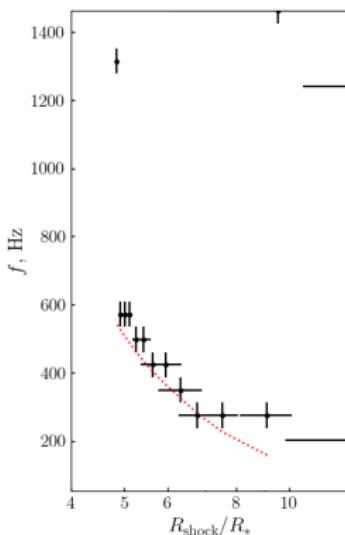
Переменность

Характерные времена:

- локальное динамическое
 $t_d \sim \sqrt{\frac{R^3}{GM_*}} \gtrsim 10^{-3} \text{с}$
- время распространения звука от УВ до
поверхности $t_s = \int_{R_*}^{R_{\text{shock}}} \frac{\sqrt{3 \cos^2 \theta + 1}}{2 \cos \theta} \frac{dR}{c_s}$

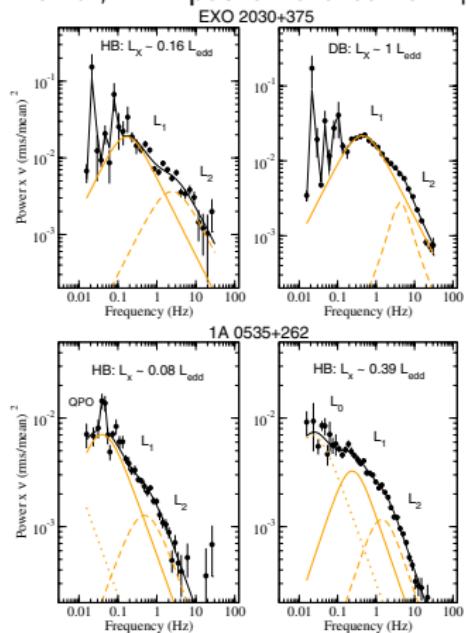


- локальное тепловое $t_{\text{th}} \sim \frac{3\kappa\dot{M}}{cv} \frac{\delta^2}{A_\perp}$
- время заполнения $t_r \sim \frac{M_{\text{col}}}{\dot{M}} \gg t_d, t_{\text{th}}$



Существует ли гектагерцовая переменность у рентгеновских пульсаров?

Может, мы просто пока ее не видим?



Почему ее может не быть: разные положения фронта для разных силовых линий.

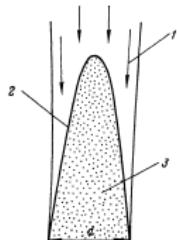


FIG. 2. A cross section of the accretion column: 1) free-falling plasma; 2) the deceleration zone; 3) gradual settling.

Любарский и Сюняев 1988

Из Reig & Nespoli (2013)

Выводы:

- ▶ Устойчивое течение с радиационной УВ легко воспроизводится и очень похоже на аналитическое решение Баско-Сюняева.
- ▶ Приближение к равновесию занимает довольно заметное время $t_r \gtrsim t_d^{\text{out}}$ (секунды-часы, очень сильно зависит от геометрии)
- ▶ и сопровождается осцилляциями колонки с глобальным динамическим временем (время распространения звука); ожидаемые частоты лежат в гектагерцовом диапазоне.
- ▶ Есть предел применимости аналитического решения при большом вкладе адвекции $\beta = L_{\text{adv}}/L_{\text{tot}} > 2/3$.
- ▶ Превышение предела $\beta = 2/3$ приводит к попаданию вещества на замкнутые и на открытые силовые линии:
- ▶ заполнение замкнутых силовых линий дает (при локально сверх-эддингтоновском темпе акреции) дополнительное поглощающее/рассеивающее вещество внутри магнитосферы
- ▶ заполнение открытых силовых линий приводит (при локально сверх-эддингтоновском темпе акреции) к формированию субрелятивистских ($\sim 0.1 - 0.3c$) оттоков

