

СТРУКТУРА НА МАГНЕТИЗИРАН АКРЕЦИОНЕН ДИСК

Красимира Янкова, Лъчезар Филипов

Институт за космически изследвания - Българска академия на науките
e-mail: f7@space.bas.bg

STRUCTURE OF MAGNETIZED ACCRETION DISK

Krasimira Yankova, Lachezar Filipov

Space Research Institute - Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: f7@space.bas.bg

Резюме: Статията разглежда магнито-хидродинамиката (МХД) на горещ адвективен диск. Изследват се взаимодействието на плазмата и полето, появата и активността на неустойчивостите в течението. Показани са радиалната структура на диска и локалното поведение на някои от величините характеризиращи потока. Дискутира се еволюцията на диска Въз основа на глобалните и локални резултати. Акцентира се на описателната сила на модела.

Въведение

Акрецията ефективно преобразува масата на веществото в енергия. Тази енергия се трансформира в лъчение и се излъчва от дисковите повърхности. Такива обекти могат да преработят до 50% от масата на материята. Те са най-мощните енергетични източници в Космоса. Акреционните дискове (АД) са и сред най-разпространените обекти във Вселената не само във времево и пространствено, но и в еволюционно отношение. Примерно Квазарите са обекти с големи червени отмествания, повечето от тях принадлежат на ранната Вселена. От друга страна АД присъстват в почти всички стадии на еволюция на звездите и техните подсистеми. От прото- звездни, прото-планетни относително студени дискове до горещите АД на компактни обекти в края на живота на звездите.

Наученият интерес е провокиран от високата енергийна ефективност на тези източници. В тях се развиват редица неустойчивости и структури, които управляват разпределението на енергията. Те намират израз в огромния брой нестационарни явления, които ние наблюдаваме.

Акрецията е качествено и количествено по ефективна когато в картината се включи и наличие на магнитно поле. В процесите на взаимодействие се оформят три основни течения: диск, корона и джетове [2], които са генетично свързани. Всяка от тези мега-структури има собствена енергетика, която е част от общата, но в някои обекти може да бъде автономна за подсистемата.

За нас тук е важна основната компонента – акреционният диск понеже в процеса на неговата еволюция се създават условията за поява на другите главни компоненти от системата.

МХД МОДЕЛ: Глобални и локални резултати

Конструиран е нестационарен МХД модел на Кеплеров диск с адвекция в нормално магнитно поле:

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

$$(4) \quad \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}$$

$$(2) \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$(5) \quad \rho T \frac{\partial S}{\partial t} - \frac{\dot{M}}{2\pi r} T \frac{\partial S}{\partial r} = Q^+ - Q^- + Q_{mag}$$

$$(3) \quad \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \nabla \Phi + \left(\frac{\mathbf{B}}{4\pi\rho} \cdot \nabla \right) \mathbf{B} + \mathcal{G} \nabla^2 \mathbf{v}$$

$$(6) \quad p = p_r + p_g + p_m,$$

Модела включва съответно: уравнение на непрекъснатост; закона за запазване на магнитния поток; уравнение на движение; уравнението на магнитната индукция; топлинният баланс и пълното налягане. Тук имаме \mathbf{v} скоростта на потока; ρ масовата плътност; \mathbf{B} магнитното поле; p налягането; $\mathcal{G} = \alpha \nu_s H$ кинетичният вискозитет; $\eta = \alpha_m \nu_s H$ магнитният вискозитет; Q^+ - вискозната дисипация; Q_{adv} - адвективен член; Q^- - лъчисто охлаждане

и $\Phi = \frac{GM}{r - r_g}$ гравитационният потенциал.

Магнитно-ротационната нестабилност (МРН) е важен механизъм за поддържане на равновесието на горещото, адвективно течение. Хидродинамичната турбулентност (ХДТ) дава главният принос за освобождаването на енергия в диска, но МРН също има основен принос. Този модел предполага, че и двата механизма са добре изразени (много мощни), но преобладава кинетичният вискозитет и това помага на диска да премине във най-вътрешните слоеве на магнитосферата.

Ние приемаме, че:

$$(7) \quad B_z = \frac{\mu}{r^3} \text{ за екваториалната равнина и е независимо от } \varphi \text{ и } t;$$

$$(8) \quad \vec{v} = (v_r, r\Omega_k = r \sqrt{\frac{GM}{r(r - r_g)^2}}, 0), \text{ защото диска е Кеплеров-двумерен;}$$

$$(9) \quad \eta = \nu_s H; \alpha_m = 1, [3]; T = T_{vir} = \frac{GMm_i}{kr} \text{ и също така е адвективен.}$$

Използваме цилиндрични координати $(r, \varphi, \mathbf{z}; \mathbf{t})$. Резултатите са представени в явен вид от радиалната компонента r . Глобалното решение е получено в [4] в безразмерни променливи:

$$f_1(x) = \frac{4 + c_2}{6x^6} + \frac{1 + c_1 + c_3}{x^{15/2}} [1 - (x - x_g)] + \frac{2 - c_2}{6}; \quad f_2(x) = (c_2 + 4)(x - 1) + 1$$

$$f_3(x) = \frac{c_6}{7} x^7 + \frac{x^3}{3} \left(c_7 - \frac{(3 + c_2)}{2} c_5 \right) - \frac{(3 + c_2)}{6x^3} - \frac{1}{2} c_5 (1 + c_1 + c_3) x^{3/2} (x - x_g - 1) + \frac{1 + c_1 + c_3}{2x^{9/2}} (x - x_g - 1) + 1 - \frac{c_6}{7} - \frac{c_7}{3} + \frac{(3 + c_2)(1 + c_5)}{6}$$

$$f_4(x) = (1 - c_{13} - c_{14})x^2 + \frac{c_{13}}{x^6} + c_{14}(x - x_g);$$

$$f_5(x) = \frac{1 + c_4}{x} - c_4$$

$$f_6(x) = -\frac{c_{10}x^2}{2c_9} - (x-1) - \frac{c_8}{2c_9x^{7/2}} - \left(\frac{3c_8}{2c_9} - \frac{1}{c_9}\right) \frac{1}{x^{9/2}} + \frac{1+c_1}{2c_9x^5} + \frac{2\alpha c_{11}}{c_9x^{11/2}} +$$

$$+ \frac{9\alpha c_{11}}{4c_9x^{13/2}} + \frac{\alpha c_{12}}{c_9x^{17/2}} + \left[\left(\frac{3c_8}{2c_9} - \frac{1}{c_9}\right) \frac{1}{x^{9/2}} - \frac{9\alpha c_{11}}{4c_9x^{13/2}} - \frac{\alpha c_{12}}{c_9x^{17/2}} \right] (x-x_g) +$$

$$+ \left[\frac{c_8}{2c_9x^{7/2}} - \frac{2\alpha c_{11}}{3c_9x^{9/2}} - \frac{1+c_1}{2c_9x^5} - \frac{2\alpha c_{11}}{c_9x^{11/2}} \right] \frac{1}{(x-x_g)} + \frac{2\alpha c_{11}}{3c_9x^{9/2}} \frac{1}{(x-x_g)^2} + \frac{2c_9 - c_{10}}{2c_9}$$

$$f_7(x) = -\frac{c_2+4}{c_1x} + \frac{c_{16}+c_{12}}{c_1x^5} + \left[-\left(\frac{c_3}{2c_4} + c_3\right) \frac{1}{c_1x^{3/2}} + \frac{c_{17}}{c_1x^{9/2}} \right] \frac{1}{x-x_g} -$$

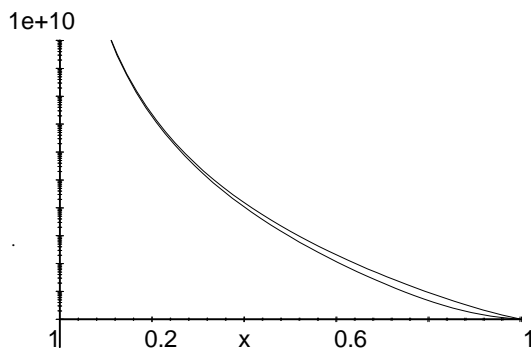
$$-\frac{c_3}{c_4c_1x^{1/2}} \frac{1}{(x-x_g)^2} + 1 - \frac{c_{17}}{c_1} + \frac{c_3}{c_1} + \frac{c_2+4}{c_1} - \frac{c_{16}+c_{12}}{c_1} + \frac{3c_3}{2c_4c_1}$$

$$f_8(x) = \frac{c_{15}x^2}{2c_4c_{11}} + \frac{c_4+1}{c_4c_{11}}x - \frac{1}{c_4x} - \frac{c_{16}+c_{12}}{3c_4c_{11}x^3} - \frac{1+c_1+c_3}{c_4c_{11}x^{1/2}}(x-x_g-1) +$$

$$+ 1 - \frac{c_{15}}{2c_4c_{11}} - \frac{c_4+1}{c_4c_{11}} + \frac{1}{c_4} + \frac{c_{16}+c_{12}}{3c_4c_{11}}$$

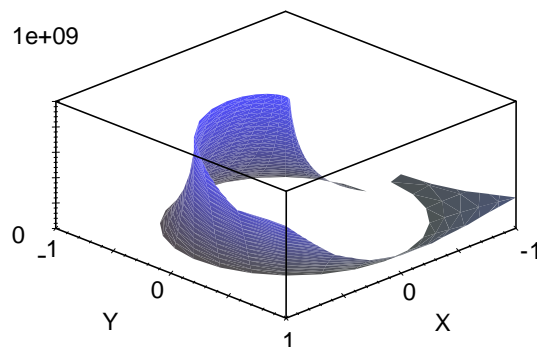
То е приближено, но дава добра идея за устойчивостта и еволюцията на диска.

Функциите f_i отговарят на ρ , v_r , v_s , B_r , B_ϕ в потока; дебелината H на диска и коефициентите ω и k_ϕ . Константите c_i са безразмерни комбинации на началните стойности ρ_0 , v_{r0} ... при външния ръб, където сме приели r_0 да бъде $10^3 R_g$. Тук ще илюстрираме някои от възможностите на модела за описание на радиалната структура на диска при реални обекти.



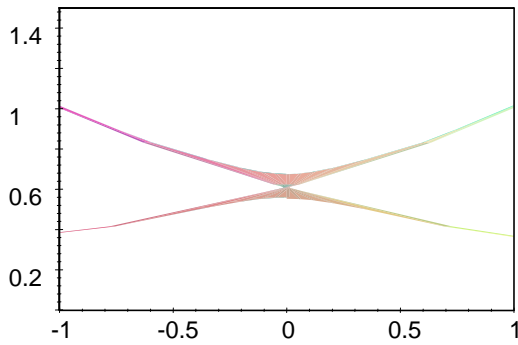
Фиг. 1: безразмерната функция на разпределение на плътността $f_1(x)$ по диска в два ключови момента от неговата еволюция: $t \approx 0$ и $t=1P \sim \Omega_0^{-1}$ след разстилането му.

На фигурата се вижда как интензивността на втичане нараства за един период.



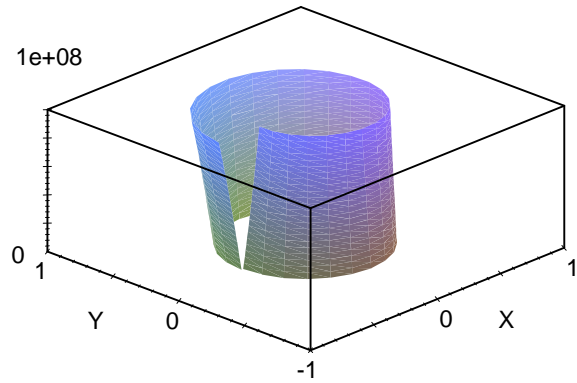
Фиг. 2: показва безразмерната функция на разпределение на масовата плътност $f_1(X, Y)$ в не-осиметричен МХД модел.

Разцепването на повърхностното разпределение обозначава началото на спиралата $x \approx 0.8 \div 0.9$.



Фиг. 3: това е безразмерна функция на разпределение на радиалната скорост $f_2(X, Y)$ в момента $t \approx \Omega_0^{-1}$.

Профил за фиксирана ъглова координата $\pm\phi \sim \text{const}$. Профилите показват два отделени клона на функцията по целия диск. Имаме едновременно увеличаване и намаляване на радиалната скорост. Това означава, че флуида независимо преминава в двете посоки. Такова поведение подсказва недвусмислено наличие на микро- вихри по целия диск (структури, а не турбулентност, ако се дължеше на нея скоростта не би имала точно две определени приоритетни направления, би била хаотична и щяхме да наблюдаваме сумарния ефект).

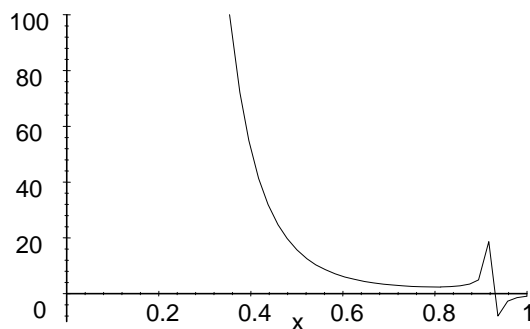


Фиг. 4: това е безразмерна функция на разпределение на радиалния компонент на магнитното поле $f_5(X, Y)$.

Скока в повърхнинното разпределение на функцията се наблюдава при $x \sim 0.5$, следователно MHD неустойчивостите се очакват за $r < 500R_g$. Това напълно се съгласува и със бързото отслабване на полето като цяло, във външните области на диска.

Глобалното решение може да се използва за да се получи локалното затопляне от което именно зависи появата и захранването на неустойчивостите.

$$K = \frac{\alpha a_2 \left[\frac{x}{4(x-x_g)^2} + \frac{x^2}{(x-x_g)^3} + \frac{x^3}{(x-x_g)^4} \right] + \alpha_m (a_6 x^6 + a_7 x^5 + a_8 x^4)}{-2 \frac{a_4}{\alpha_m} x^{15} - \frac{a_4}{\alpha_m} x^{13} + a_3 x^9 - a_5 x^8 + 2a_1 x^6 + a_1 x^4}$$

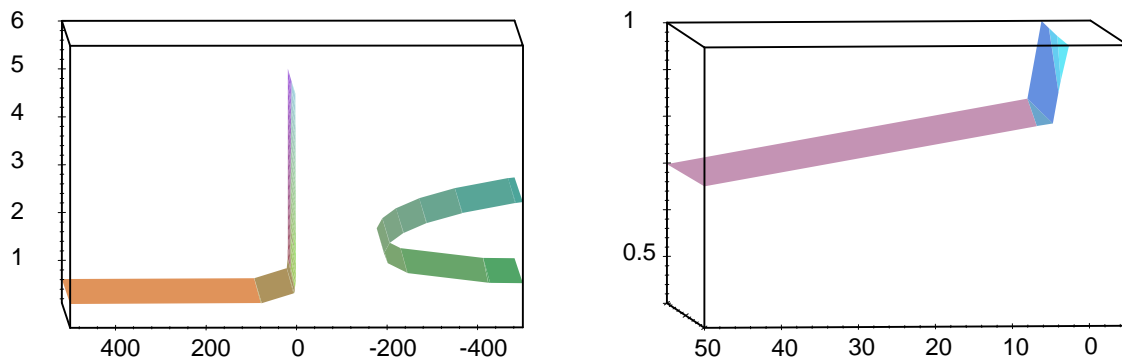


Фиг. 5: Разпределение на локалното затопляне по диска $K(x)$.

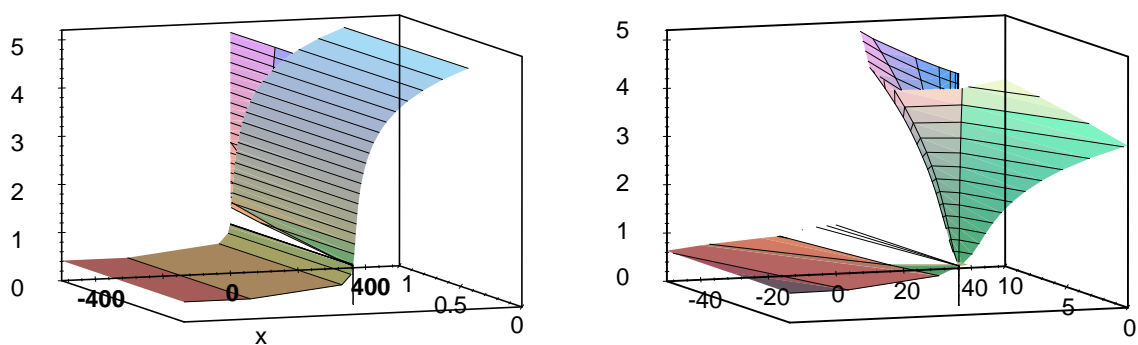
Особеният елемент в началото на разпределението вероятно съответства на отделянето на вторичната спирали от първичния фронт.

Следва част от диска в топлинно равновесие. И най вътрешния регион $x < 0.6$, където няма ефективно охлаждане.

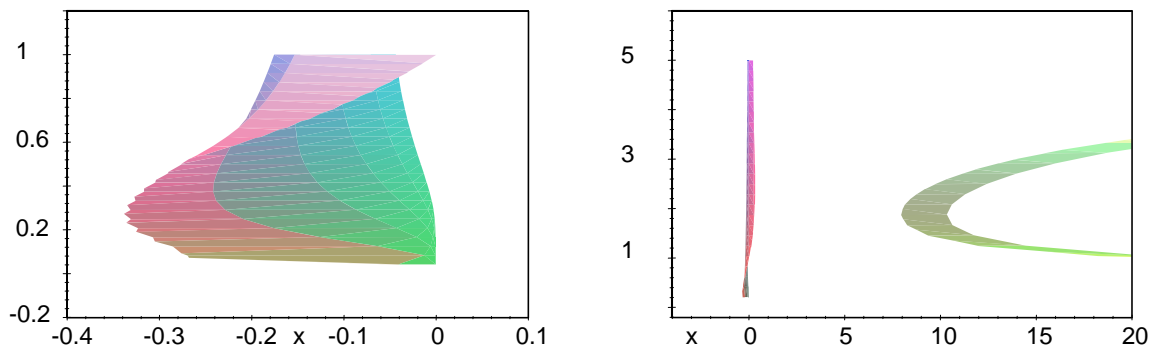
Тогава ако разгледаме локалното поведение на същите тези величини, в някакви криволинейни кутийки (в които мерим x и ϕ в единици R_g), те придобиват следния вид:



Фиг. 6: Локално развитие на масовата плътност



Фиг. 7: Локално развитие на радиалната скорост



Фиг. 8: Локално развитие на радиалния компонент на магнитното поле

Масовата плътност проявява своята нелинейност и нееднозначност, като при това липсата на вещество (фиг.6) в някаква област недвусмислено подсказва наличието на структура. Това напълно се съгласува и с глобалното разпределение (фиг.3) и с локалното развитие на радиалната скорост. На фиг.7 виждаме как горния клон на скоростта се нагъва точно в областта на локална липса на материя. Видимо там радиалната скорост пада и остава само ротиращата компонента. И накрая луфта (8б) и завъртането (8а) в радиалното поле завършват картината. Луфта означава, че няма магнитни линии в тази област, а завъртането в единия край и нееднозначността в другия говорят за наслаиване и усукване – има структура.

Заклучение

Резултатите дават нагледност за това какво се случва на макро- и микро-ниво. Паралелното им разглеждане дава възможност по-детайлно да се опишат физичните процеси. Можем да видим началото на спиралата, но също така локално хващаме и налична вихрова структура. Можем да следим промяната в интензитета на втичане във времето. А средното разпределение на затоплянето по диска носи информация за областите на ефективност на неустойчивостите.

Литература:

1. Biskamp D. MHD Turbulence, Cambridge University Press.
2. Hawley J. F., S. A. Balbus. AJ, 573, 749, (2002)
3. Hawley J. F., J. H. Krolik. AJ, 566, 164, 2002.
4. Iankova Kr. D., L. G. Filipov. "Influence of the magnetic field of the compact object on the accretion disk – results" BAM 2004, Aerospace Research in Bulgaria, No. 20, p. 167–170 (2005).
<http://www.space.bas.bg/astro/Rogen2004/StPh-2.pdf>