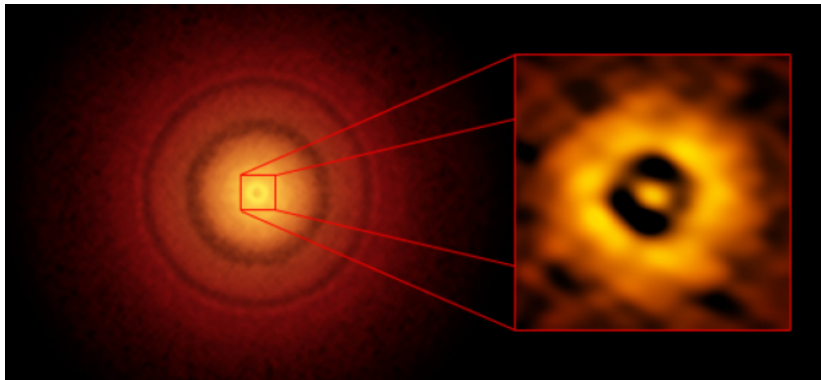


Численное моделирование турбулентности в астрофизических сдвиговых потоках.

Дмитрий Раздобурдин

19 Марта 2018

Изображение протопланетного диска (обсерватория ALMA).



Изображение аккреционного диска с джетом (фантазия художника).



Что не так с дисками?

Из-за гигантских размеров (\sim млрд. км. для протопланетного диска) характерные числа Рейнольдса в аккрецирующих потоках достигают 10^{10} .

Это слишком много!

При такой малой вязкости время формирования планет из протопланетного диска превышало бы возраст Вселенной.

Эффективная вязкость

Решение – турбулентность. Энергия перераспределяется к флуктуациям малых масштабов, где эффективно диссипируется. (8415 ссылок по NASA ADS на 19 марта 2018 года).

1973АБА...24...337S

Astron. & Astrophys. 24, 337 – 355 (1973)

Black Holes in Binary Systems. Observational Appearance

N. I. Shakura

Sternberg Astronomical Institute, Moscow, U.S.S.R.

R. A. Sunyaev

Institute of Applied Mathematics, Academy of Sciences, Moscow, U.S.S.R.

Received June 6, 1972

Summary. The outward transfer of the angular momentum of the accreting matter leads to the formation of a disk around the black hole. The structure and radiation spectrum of the disk depend, mainly on the rate of matter inflow \dot{M} into the disk at its external boundary. The dependence on the efficiency of mechanisms of angular momentum transport (connected with the magnetic field and turbulence) is weaker. If $\dot{M} = 10^{-9}$

saturated by broad recombination and resonance emission lines. Variability, connected with the character of the motion of the black hole, with gas flows in a binary system and with eclipses, is possible. Under certain conditions, the hard radiation can evaporate the gas. This can counteract the matter inflow into the disk and lead to autoregulation of the accretion.

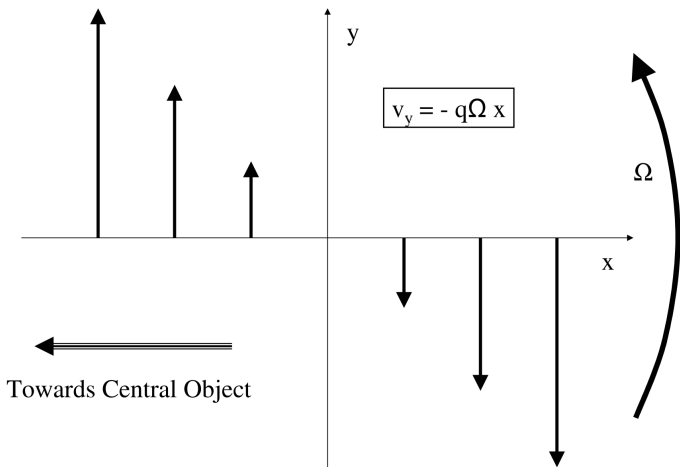
M_*

Как возникает турбулентность?

При наличии внешнего магнитного поля турбулизация происходит за счёт магниторотационной неустойчивости (MRI).
Однако:

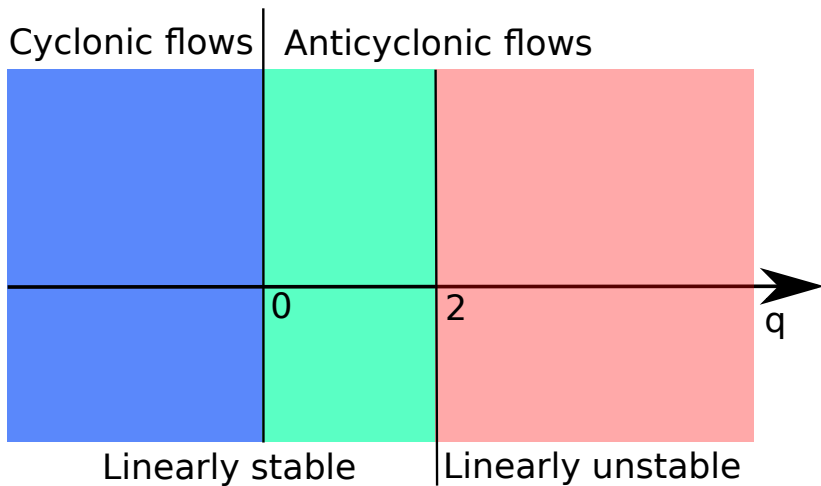
1. MRI не работает в слабоионизованных областях (внутренние части протопланетных дисков).
2. MRI не работает при растущей против вектора силы тяготения угловой скорости вращения потока (пограничные слои вокруг нейтронных звёзд (NS), белых карликов (WD) или молодых звёзд (YSO)).

Простейшая модель. Сдвиговой ящик



(источник Afshordi, Mukhopadhyay and Narayan, ApJ, 2005)

Классификация вращательных сдвиговых потоков



Докритическая турбулентность.

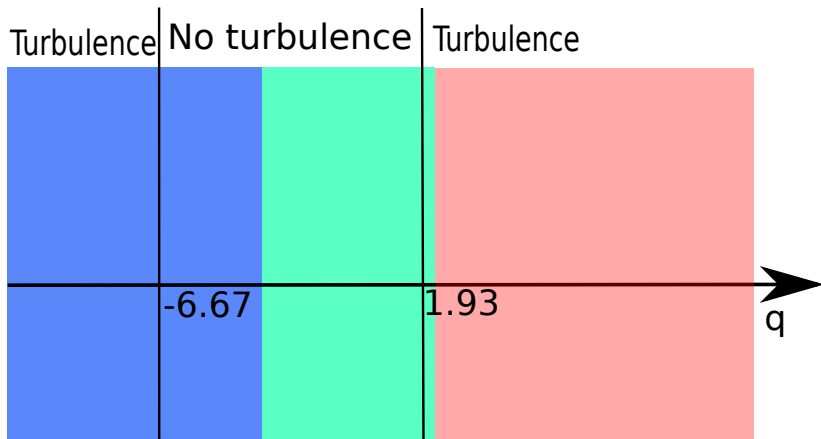
Поток является линейно устойчивым (нет экспоненциально растущих линейных возмущений).

1. Турбулентность в подобных потоках называется докритической.
2. Турбулентность поддерживается за счёт транзитного роста линейных возмущений.

Исследовать турбулентность в подобных течениях очень сложно из-за гигантского числа Рейнольдса. В лабораторных установках необходимы большие размеры и/или быстрое вращение. В численных экспериментах – высокое пространственное разрешение.

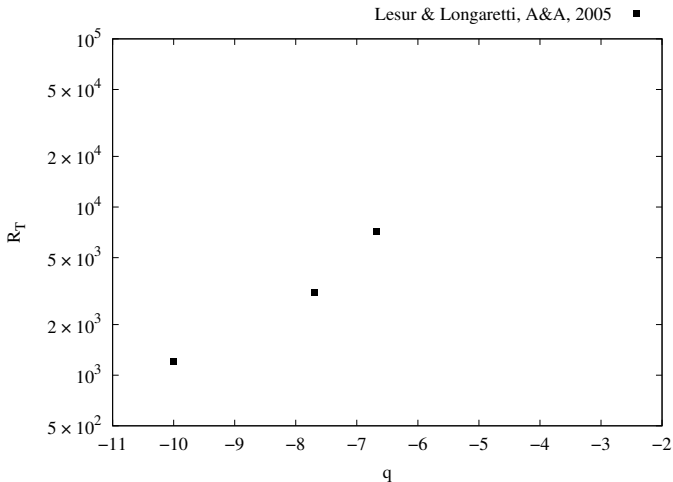
Мы использовали суперкомпьютер Ломоносов и свободный код для гидродинамических симмуляций Athena.

Наблюдаемая турбулентность



(см. Lesur & Longaretti, A&A, 2005 и Rincon, Ogilvie & Cossu, A&A, 2007)

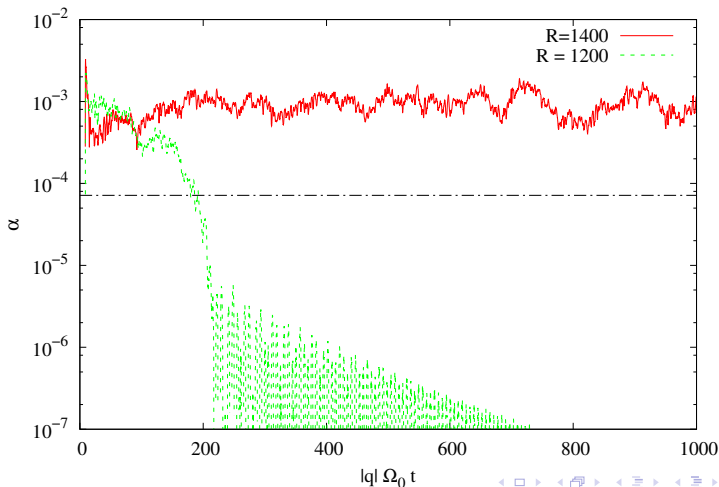
Транзитное число Ренольдса



Возможно турбулентность при $q > -6.67$ не наблюдалась из-за недостаточного численного разрешения?

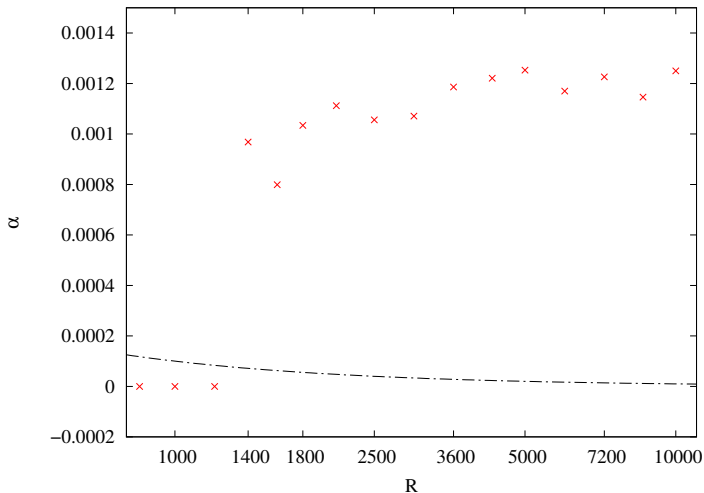
Определение транзитного числа Рейнольдса

Развитая турбулентность характеризуется существенным оттоком момента импульса (α) от центра потока (на рисунке $q = -10$).

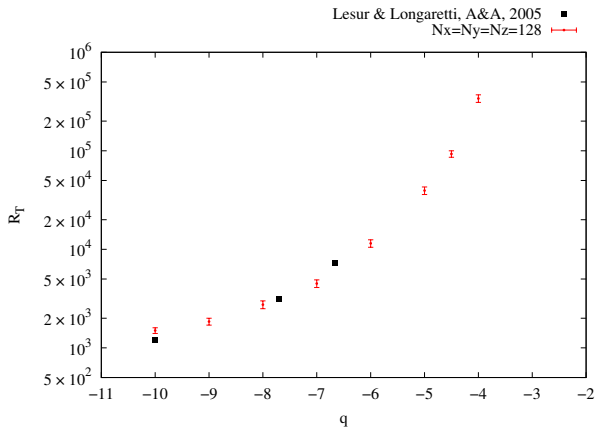


Определение транзитного числа Рейнольдса

Усреднённый по времени поток момента импульса при различных числах Рейнольдса.



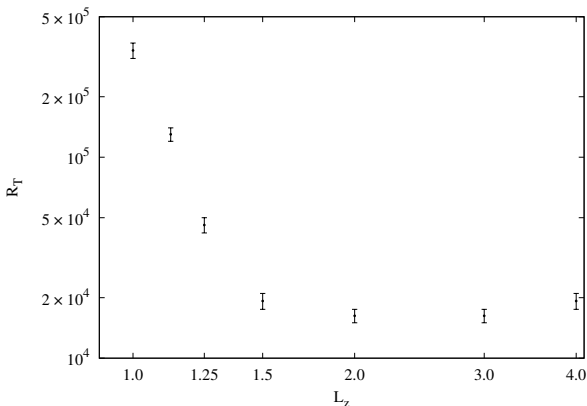
Симуляции в кубическом ящике



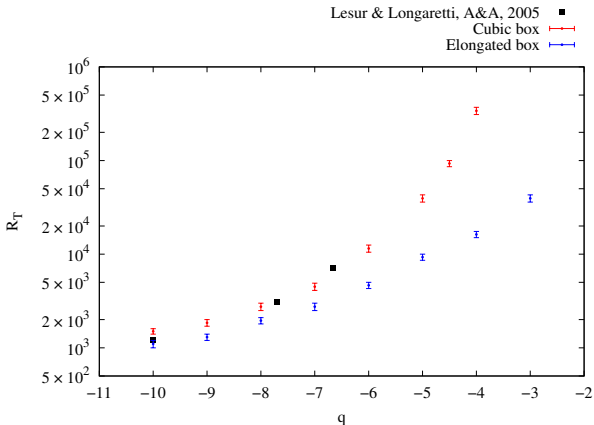
Увеличение разрешения позволило сдвинуть границу наблюдаемой турбулентности. Важны мелкомасштабные флуктуации.

Симуляции в вытянутом по вертикали ящике

Вытягивание ящика по вертикали уменьшает транзитное число Рейнольдса. $q = -4$, $L_z = 1$ соответствует кубическому ящику, $N_x = N_y = 128$, $N_z = 128L_z$.

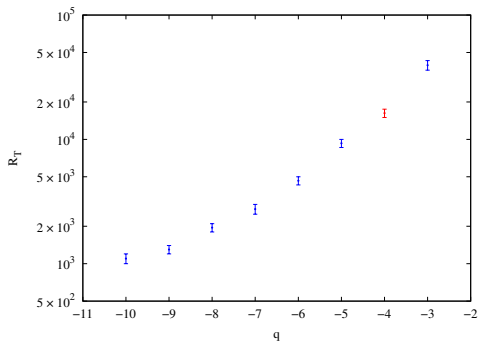


Симуляции в вытянутом по вертикали ящике



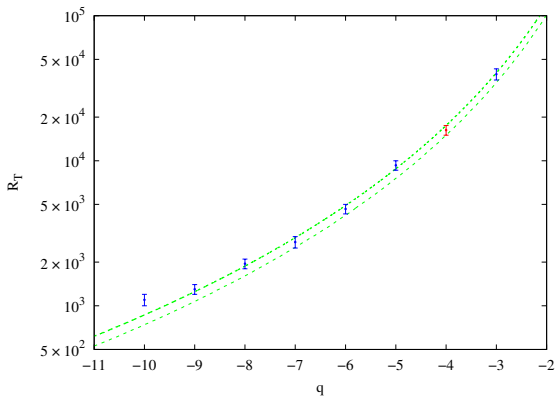
Включение крупномасштабных в вертикальном направлении флуктуаций существенно упрощает турбулизацию.

Симуляции в вытянутом по вертикали ящике и линейные возмущения



Поскольку за передачу энергии к флуктуациям отвечает линейный механизм должна существовать корреляция между потерей нелинейной устойчивости и фактором максимального транзитного усиления линейных возмущений определённого типа.

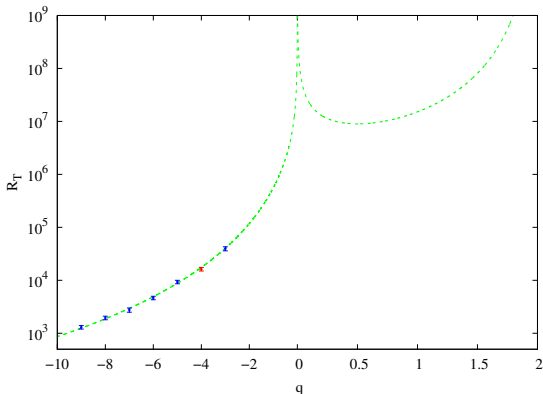
Симуляции в вытянутом по вертикали ящике и линейные возмущения



Мы обнаружили такой класс линейных возмущений.

Турбулентность в Кеплеровском течении без магнитного поля?

Если обнаруженная корреляция может быть продлена в область $q > 0$, то турбулентность кеплеровского течения ($q = 3/2$) может быть обнаружена при числен Рейнольдса $R \sim 10^8$.



Статья с результатами работы проходит рецензию в ведущем мировом астрофизическом журнале *Astronomy & Astrophysics* (Impact factor: 5.014). Препринт: arXiv:1803.05459.

Astronomy & Astrophysics manuscript no. text
March 14, 2018

©ESO 2018

Subcritical transition to turbulence in accretion disc boundary layer

V. V. Zhuravlev^{1*} and D. N. Razdoburdin¹

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

ABSTRACT

Context. Enhanced angular momentum transfer through the boundary layer near the surface of weakly magnetised accreting star is required in order to explain the observed accretion timescales in low-mass X-ray binaries, cataclysmic variables or young stars with massive protoplanetary discs. Accretion disc boundary layer is locally represented by incompressible homogeneous and boundless flow of the cyclonic type, which is linearly stable. Its non-linear instability at the shear rates of order of the rotational frequency remains an issue.

Aims. We argue that hydrodynamical subcritical turbulence in such a flow is sustained by the non-linear feedback from essentially three-dimensional vortices, which are generated by quasi-two-dimensional trailing shearing spirals grown to high amplitude via the swing amplification. We refer to those three-dimensional vortices as cross-rolls, since they are aligned in the shearwise direction in contrast to streamwise rolls generated by the anti-lift-up mechanism in rotating shear flow on the Rayleigh line.

Methods. Transient growth of cross-rolls is studied analytically and further confronted with direct numerical simulations (DNS) of dynamics of non-linear perturbations.

Results. DNS performed in a tall box show that transition Reynolds number R_T as function of shear rate accords with the line of constant maximum transient growth of cross-rolls. The transition in the tall box has been observed until the shear rate three times higher than the rotational frequency, when $R_T \sim 50000$.

Conclusions. Assuming that the cross-rolls are also responsible for turbulence in the Keplerian flow, we estimate $R_T \lesssim 10^8$ in this case. Our results imply that non-linear stability of Keplerian flow should be verified by extending turbulent solutions found in the cyclonic regime across the solid-body line rather than entering a quasi-Keplerian regime from the side of the Rayleigh line. The most