

АНТИЦИКЛОНИЧЕСКИЙ ВИХРЬ В ПРОТОПЛАНЕТНОМ ДИСКЕ

М.Г.АБРАМЯН

Поступила 19 января 2016

Принята к печати 23 марта 2016

Исследована динамика протопланетного диска в локальном приближении. Получено решение в виде антициклонного вихря трехосно-эллипсоидальной формы с линейной циркуляцией вещества в плоскости вращения диска. Обсужден вопрос образования зародыша планет из пыли этим вихрем.

Ключевые слова: *протопланетный диск; антициклонный вихрь; зародыш планет*

1. Введение. Известно, что молодые звездные объекты типа Т Тельца окружены дисками, содержащими газ и твердые частицы микронных размеров. ИК наблюдения показывают, что интенсивность излучения пыли снижается с возрастом звезды, что предполагает рост размеров частиц [1]. На этом этапе твердые частицы связаны с газом аэродинамическими силами, создающими объекты размерами несколько сот километров (зародыши планет) по пока неустановленному сценарию. Твердые частицы, испытывая трение газа, теряют угловой момент и энергию. Частицы метрового размера дрейфуют к звезде за несколько сотен лет, что гораздо меньше, чем время жизни диска, которое составляет несколько миллионов лет [2,3]. Размеры твердых частиц растут слишком медленно, чтобы достичь планетарных размеров. Поэтому формирование зародышей планет становится важной проблемой, так как частицы теряются в звезде, еле достигая метровых размеров.

Авторы работы [4] выдвинули предположение, что крупномасштабные стойкие вихри в диске могут помочь решить эту проблему путем улавливания частиц, прежде чем они попадут в звезду. Этот механизм захвата пыли вихрем был изучен рядом авторов [4-7] и оказался очень эффективным.

Предполагается, что в этом сценарии вихри образуются случайной турбулентностью в дифференциальном течении, или поддерживаются конкретной неустойчивостью. Антициклоны в протопланетном диске сливаются друг с другом и усиливаются, в то время как циклоны унич-

тожаются сдвиговым течением.

В антициклоне твердые частицы захватываются силой Кориолиса, направленной к центру вихря. Если вихрь выживает ~ 100 вращений в туманности с солнечной массой, то количество захваченных частиц может достигать массы планет (нескольких масс земли). Существование долгоживущих вихрей в протопланетном диске, дрейфующих из регионов внешнего диска, в модели стандартного накопления [8,9] позволяет накопление массы, необходимое для формирования ядра гигантской планеты за время, гораздо меньше, чем 10^6 - 10^7 лет. Например, в туманности солнечной массы, время, необходимое для захвата 10 - $15 M_{\odot}$ для вихря на орбите 5 А.Е. , составляет порядка 10^4 лет. Таким образом, антициклонный вихрь в протопланетном диске может позволить формирование гигантской планеты типа Юпитер. При этом, транспорт в протопланетном диске может иметь происхождение отличное от популярной α турбулентной вязкости [10,11].

Предложены различные механизмы для формирования вихрей в протопланетном диске: турбулентность [12,13], магнито-вращательная неустойчивость [14], бароклинная неустойчивость в дисках с радиальным градиентом энтропии [15] и гидродинамическая неустойчивость волны Россби [16].

Двух- и трехмерные антициклонические вихри интенсивно изучаются также численными методами [17,18]. Подобные гидродинамические моделирования, проведенные с разными начальными условиями, обнаружили, что антициклонические вихри формируются естественным образом и имеют неизменную форму в течение почти 100 вращений вокруг центральной звезды, а твердые частицы сосредоточены вблизи центра вихря.

В настоящей статье будет показано, что антициклонический вихрь эллипсоидальной формы является естественным решением уравнений сдвигового потока диска в локальном приближении.

2. Антициклонические вихри в газовом протопланетном диске. Будем пользоваться локальным приближением, выбирая систему отсчета, вращающейся с диском с угловой скоростью Ω_0 на расстоянии r_0 вокруг центральной звезды массы M . В этом приближении, считая размеры вихря намного меньше расстояния r_0 , выберем декартовую систему координат с центром O (рис.1), направляя ось Y к звезде, а ось X - по скорости потока вещества. Вращение диска представим в виде $\Omega(r) \propto r^{-q}$. В случае, если действует только гравитация центральной звезды, вращение будет Кеплеровым с $q = 3/2$, а для однородно вращающегося диска $q = 2$, т.е. $2 \geq q \geq 3/2$.

В выбранной системе отсчета поток вещества имеет X компоненту скорости $i q \Omega_0 y$, центробежная сила инерции компенсируется радиальной

компонентой гравитации центральной звезды на расстоянии r_0 , в остальных же точках их сумма дает приливную силу $j3\Omega_0^2 y$. Вертикальная составляющая гравитации - $\Omega_0^2 z$ является возвращающей силой вдоль оси Z .

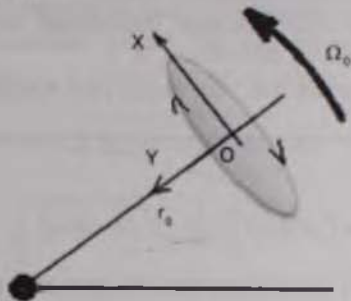


Рис.1. Локальная система отсчета.

Сначала рассмотрим газовый диск вокруг центральной звезды. В локальном приближении уравнение стационарного изобарического сдвигового потока газа без учета вязкости описывается уравнениями

$$(\mathbf{u}_0 \nabla) \mathbf{u}_0 = j3\Omega_0^2 y - k\Omega_0^2 z - 2\Omega_0 \times \mathbf{u}_0 - \nabla h_0, \quad (1)$$

$$\nabla(\rho \mathbf{u}_0) = 0, \quad (2)$$

где h_0 - удельная энтальпия ($h = \int \rho^{-1} d\rho$), i, j и k - декартовы орты. Первый член в правой части уравнения (1) есть, как отметили выше, приливное ускорение в плоскости диска, второй член - вертикальная составляющая гравитации, третья - ускорение Кориолиса.

В работах [19,20] в локальном приближении было получено сдвиговое тороидальное течение с эллиптическим сечением, и был рассмотрен вопрос его устойчивости. Однако нетрудно показать, что в окрестностях точки O эти уравнения допускают также эллипсоидальное антициклоническое вихревое движение материи диска с линейным полем скоростей в плоскости вращения, наподобие полей скоростей в эллипсоидах Роша-Римана, или Римана [21-24]:

$$u_{0x} = (\lambda \Omega_0 a/b)y, \quad u_{0y} = -(\lambda \Omega_0 b/a)x, \quad u_{0z} = 0, \quad (3)$$

где λ - частота циркуляций вещества в вихре в единицах Ω_0 .

С учетом (3) из (1) для энтальпии получаем уравнения

$$\begin{aligned} \partial h_0 / \partial x &= -\Omega_0^2 (2\lambda b/a - \lambda^2)x, \quad \partial h_0 / \partial y = -\Omega_0^2 (2\lambda a/b - \lambda^2 - 3)y, \\ \partial h_0 / \partial z &= -\Omega_0^2 z, \end{aligned}$$

откуда получаем, что энтальпия есть квадратичная функция координат, которая может быть представлена в виде

$$h_0(x, y, z) = \frac{1}{2} \Omega_0^2 (2\lambda a/b - \lambda^2 - 3) a^2 [1 - x^2/a^2 - y^2/b^2 - z^2/c^2]. \quad (4)$$

Очевидно, что изохэнтальные поверхности являются концентрическими трехосными эллипсоидами. Эллипсоид, на котором энэальпия обращается в нуль, имеет полуоси a , b , c .

Формула (4) для энэальпии получается при выполнении соотношений

$$\lambda = \sqrt{3b / \left[a \sqrt{1 - (b/a)^2} \right]}, \quad (5)$$

$$(c/a)^2 = (b/a)^2 \left[2\sqrt{3 - 3/\sqrt{1 - (b/a)^2}} \right]. \quad (6)$$

Первое из них дает частоту осцилляций вещества в антициклоническом вихре в зависимости от меры его вытянутости в плоскости вращения диска b/a . Как видно из рис.2, λ растет с увеличением b/a . При значениях

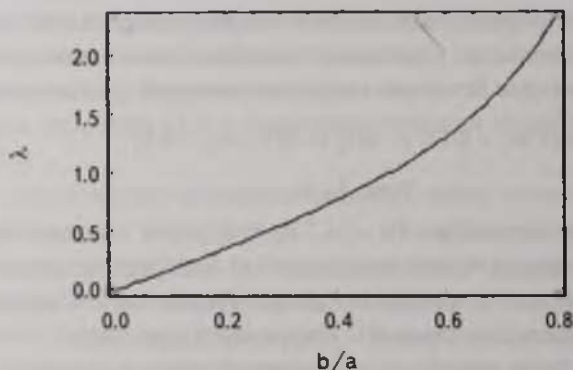


Рис.2. Зависимость частоты осцилляций λ вещества в вихре от отношения полуосей b/a вихря в плоскости вращения диска.

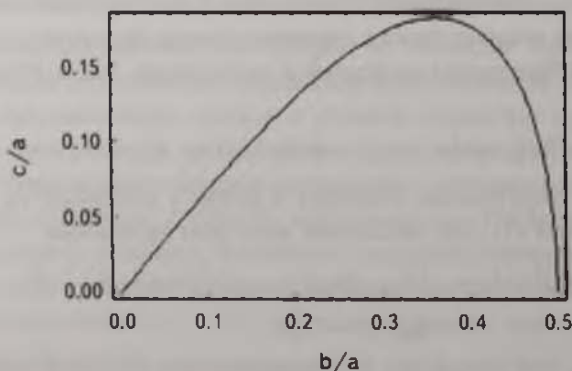


Рис.3. Геометрия эллипсоидального антициклонного вихря. Эллипсоиды с $b/a > 0.5$ не могут существовать.

$b/a = 0.5$ получаем $\lambda = 1$, т.е. циркуляция вещества в вихре происходит с локальной угловой скоростью вращения диска Ω_0 . При $b/a > 0.5$ получается $\lambda > 1$. Однако второе условие (6), которое дает геометрию возможных вихревых эллипсоидов (рис.3), запрещает существование вихрей со значениями b/a большими, чем 0.5. Им соответствуют минимые значения вертикальной полуоси c , а также отрицательные значения энthalпии (рис.4).

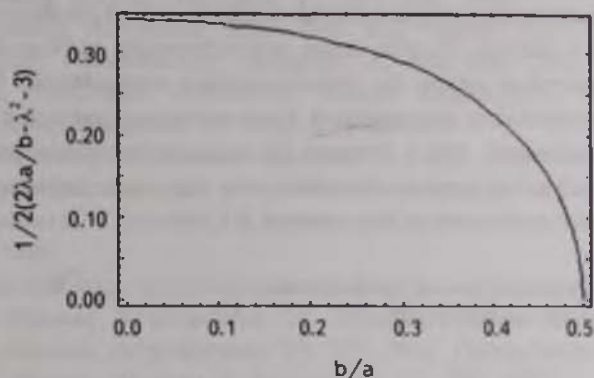


Рис.4. Зависимость значения энthalпии в центре вихря от его асимметрии в плоскости диска b/a .

Заметим, что в плоскости вращения вихрь вытянут вдоль течения, т.е. вдоль оси X . Чем меньше частота осцилляций λ , тем больше он вытянут.

Вертикальный размер вихря является наименьшим. Максимальной вертикальной осью обладает вихрь с $b/a \cong 0.363$, для которого $(c/a)_{\max} \cong 0.226$. Вихрь с $b/a = 0.5$ является "холодным" - ему соответствует нулевая энthalпия и $c/a = 0$. В частности такой эпициклический вихрь, в качестве ловушки пылевых частиц в протопланетном диске, был рассмотрен авторами работы [4].

Заметим, что в полученном вихре в любой точке результирующая удельная сила, действующая на газ, т.е. сумма сил гравитации, Кориолиса и давления, направлена к центру вихря и равна:

$$f = -\frac{3b^2\Omega_0^2}{a^2 - b^2}(ix + jy). \quad (7)$$

3. *Динамика пыли в вихре.* Газ и пыль в диске взаимодействуют силами трения. Первоначально покоящиеся относительно локальной системы отсчета пылевые частицы уносятся газом силой трения. На них действуют также гравитация центрального тела, которая в плоскости диска с центробежной силой образует приливную силу, и, что главное, сила Кориолиса. Силы давления на пыль не действуют. В вертикальном

направлении на пылевые частицы действуют две силы - гравитация - $\Omega_0^2 z$ и трение с газом - αv_z , где α - коэффициент трения. Очевидно, на некоторой высоте эти силы уравниваются, после чего частицы пыли равномерно оседают на плоскость симметрии диска. Здесь же пыль захватывается вихрем силой трения, а Кориолисова сила их собирает в центр вихря. Этот механизм изучен достаточно хорошо, и читатель может с ним более подробно ознакомиться в цитированных мною работах.

Что касается эволюции вихря с учетом вязкости газа и диссипативного взаимодействия с пылью, то получение аналитических выражений для изменения параметров вихря не представляется возможным. Однако численные моделирования аналогичных антициклонных вихрей с учетом диссипации показывают, что в течение нескольких десятков периодов вращения искажения их формы невелики, и в них накапливается пыль с массой в несколько десятков масс земли [18,19].

Ереванский государственный университет,
Армения, e-mail: mabr08@mail.ru

ANTICYCLONIC VORTEX IN PROTOPLANETARY DISC

M.G.ABRAHAMYAN

The dynamics of protoplanetary disc in local approach is investigated. The solution in form of three-axis elliptical anticyclonic vortex with linear circulation of mater in plane of rotation is obtained. Formation of planetesimals in such vortex is discussed.

Key words: *anticyclonic disc: anticyclonic vortex: planetesimals*

ЛИТЕРАТУРА

1. S.V.W.Beckwith, A.I.Sargent, Nature, **383**, 139,1996.
2. I.Adachi, C.Hayashi, K.Nakazawa, Prog. Theor. Phys., **56**, 1756, 1976.
3. S.J.Weidenschilling, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **180**, 57, 1977.
4. P.Barge, J.Sommeria, Astron. Astrophys., **295**, L1, 1995.
5. P.Tanga, A.Babiano, B.Dubrulle, A.Provenzale, Icarus, **121**, 158, 1996.
6. P.H.Chavanis, Astron. Astrophys., **356**, 1089, 2000.

7. *C. De la Fuente, P.Barge*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **323**, 601, 2001.
8. *S.P.Inaba, P.Barge, E.Daniel, H.Guillard*, Astron. Astrophys., **431**, 365, 2005.
9. *S.Inaba, P.Barge*, Astrophys. J., **649**, 415, 2006.
10. *R.V.E.Lovelace, H.Li, S.A.Colgate, A.F.Nelson*, Astrophys. J., **513**, 805, 1999.
11. *H.Li, J.M.Finn, R.V.E.Lovelace, S.A.Colgate*, Astrophys. J., **533**, 1023, 2000.
12. *A.Bracco, P.H.Chavanis, A.Provenzale*, Phys. Fluids, **11**, 2280, 1999.
13. *P.Godon, M.Livio*, Astrophys. J., **537**, 396, 2000.
14. *S.Fromang, R.P.Nelson*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **364**, L81, 2005.
15. *H.Klahr, P.Bodenheimer*, Astrophys. J., **582**, 869, 2003.
16. *H.Li, S.A.Colgate, B.Wendroff, R.Liska*, Astrophys. J., **551**, 874, 2001.
17. *S.S.Davis*, Astrophys. J., **576**, 450, 2002.
18. *J.A.Barranco, P.S.Marcus*, Astrophys. J., **623**, 1157, 2005.
19. *J.Papaloizou, J.Pringle*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **213**, 799, 1985.
20. *P.Goldreich, J.Goodman, R.Narayan*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **221**, 339, 1986.
21. *С.Чандрасекар*, Эллипсоидальные фигуры равновесия, М., Мир, 1973.
22. *М.Г.Абрамян*, Астрофизика, **25**, 357, 1986, (Astrophysics, **25**, 563, 1986).
23. *М.Г.Абрамян*, Астрофизика, **25**, 173, 1986, (Astrophysics, **25**, 456, 1986).
24. *М.Г.Абрамян*, Письма в Астрон. ж., **13**, 539, 1987.

