

К.Р. Сычугов (докладчик), д.ф.-м.н. В.М. Четкин, к.ф.-м.н. А.Ю. Луговский, «Применение параллельных методов для моделирования магниторотационной неустойчивости в газопылевом облаке с гравитирующим центром».

Аннотация

В данной работе методы параллельных вычислений были использованы для исследования коллапса газопылевого облака в результате развития в нем неустойчивости. За основу был взят численный метод годуновского типа для решения уравнений МГД, описывающих движение ионизованного газа. Авторами реализован собственный вычислительный алгоритм, использующий для распараллеливания технологию MPI, которая обеспечила тонкий контроль над обменом данными между отдельными узлами вычислительного кластера. Проведен ряд вычислений, позволивших установить существенную роль явления магниторотационной неустойчивости в процессе коллапса газопылевого облака на компактный гравитирующий объект. Полученные в расчетах темпы аккреции согласуются с наблюдаемыми в реальных астрофизических объектах.

Обсуждение результатов

Аккреция в звездных дисках происходит благодаря отводу углового момента от центра диска к периферии. Известно достаточно много механизмов отвода углового момента, например, турбулентная вязкость, спиральные ударные волны, волны плотности, конвекция, различные неустойчивости аккреционного диска, но все они встречаются с определенными трудностями при объяснении свойств аккреционных дисков. В последнее время широкое распространение получил механизм перераспределения углового момента крупными вихревыми структурами, возникающими при неустойчивом вращательном течении вещества.

Как известно, сдвиговое вращательное течение может быть подвержено магниторотационной неустойчивости (МРН), открытой академиком Е.П. Велиховым в 1959 г. [1]. Для развития МРН необходимо, чтобы угловая частота вращения вещества убывала по мере удаления от оси вращения. Астрофизические диски, с кеплеровским, или близким к нему распределением угловой скорости, удовлетворяют данному условию.

Авторами был разработан вычислительный пакет, основанный на схеме HLLD [2], позволяющий проводить двумерные расчеты в предположении аксиальной симметрии. В настоящее время программный пакет доработан, что позволило провести трехмерные расчеты коллапса молекулярного облака. При помощи технологии MPI (Message Passing Interface) поддерживается работа на многопроцессорных вычислительных системах. Расчетная область была разбита на одинаковые по размерам блоки, которые были распределены между ядрами многопроцессорной машины (или между узлами кластера) для проведения параллельных расчетов. Численная схема, лежащая в основе, является схемой годуновского типа, что подразумевает приближенное решение задачи о распаде разрыва на границах ячеек расчетной сетки. В последнее время методы годуновского типа получили широкое распространение благодаря своим консервативным свойствам: численное решение удовлетворяет законам сохранения массы, импульса и магнитного потока. Тем не менее, при адаптации годуновских схем к уравнениям магнитной газодинамики, возникает серьезная проблема, заключающаяся в нарушении бездивергентности магнитного поля. Чтобы избежать появления фиктивных магнитных зарядов в расчетной области, применяется численный аналог теоремы Стокса к уравнению эволюции магнитного поля.

При постановке задачи сделано предположение об изотермичности течения. Данное упрощение оправдано в связи с высокой скоростью перераспределения тепла вдали от горячего гравитирующего центра. Высокая скорость тепловых процессов обеспечивается за счет теплового излучения излишков тепла в нагретых областях.

Для проведения расчетов была выбрана трехмерная сферическая область с вырезанным центром. В центре был помещен объект, создающий сферически симметричный гравитационный потенциал. Начальное распределение угловой скорости выбрано близким к кеплеровскому во всей расчетной области, за исключением области, близкой к оси вращения. Распределение плотности вещества было найдено из решения стационарного уравнения Эйлера в заданных гравитационном и центробежном потенциалах. Угловая компонента закона сохранения импульса в уравнениях магнитной газодинамики была преобразована к форме закона сохранения углового момента. Это связано с принципиальной ролью распределения углового момента на устойчивость вращательного течения вещества. Кроме того, как было сказано выше, и как показали расчеты, коллапс газопылевого облака вызван отводом углового момента от центра области к периферии, и численная схема должна удовлетворять необходимому требованию консервативности по угловому моменту, чтобы расчеты давали достоверный физический результат.

Как двумерные, так и трехмерные расчеты показали, что сдвиговое вращательное течение неустойчиво при наличии слабого магнитного поля и при условии убывания угловой частоты вращения с ростом радиуса. Благодаря проведенному локальному анализу линейной стадии развития неустойчивости известно, что характерный размер самой быстрорастущей моды возмущений прямо пропорционален начальной напряженности магнитного поля. Волновой вектор малых возмущений на линейной стадии развития МРН направлен вдоль оси вращения. Проведенные расчеты продемонстрировали хорошее совпадение с аналитическими выкладками. Кроме того, результаты локального анализа предсказывают что самые быстрорастущие моды возмущений обладают нулевым азимутальным волновым числом. Иными словами, в начальные моменты времени течение должно обладать слабой зависимостью от угла. Трехмерные расчеты подтвердили данную гипотезу (рис. 1).

Результаты трехмерных расчетов во многом повторяют результаты расчетов в приближении аксиальной симметрии. Развитие неустойчивости приводит тому что течение приобретает хаотичный характер. Угловой момент начинает отводиться к периферии области, что приводит к падению вещества на гравитирующий центр. При этом, большая доля гравитационной энергии переводится в энергию магнитного поля, в результате чего напряженность магнитного поля усиливается в сотни раз по сравнению с начальным значением. Структура линий магнитного поля, увлекаемых течением, приобретает хаотичный характер вблизи экваториальной плоскости. Вблизи оси вращения можно наблюдать регулярную структуру линий поля, напоминающую по форме «песочные часы». Со временем из начальной мелкомасштабной структуры течения образуются крупные вихревые структуры. Показано, что аккреция возникает именно благодаря отводу углового момента к внешней границе расчетной области такими структурами (рис. 2).

Существенным отличием трехмерных расчетов от двумерных являются темпы полученные аккреции. В трехмерных расчетах падение вещества на гравитирующий центр происходило примерно в два раза медленнее, чем в двумерных. Связано это прежде всего с тем, что на поздних этапах развития МРН течения становится принципиально трехмерным, и результаты двумерных расчетов не способны достаточно точно воспроизвести реальную картину течения (рис. 3).

Список литературы

- [1] Е. П. Велихов, Журн. эксперим. и теор. физ., № 36, с. 1399, 1959 г.
- [2] A. Mignone, J. Comput. Phys. 225, 1427 (2007)

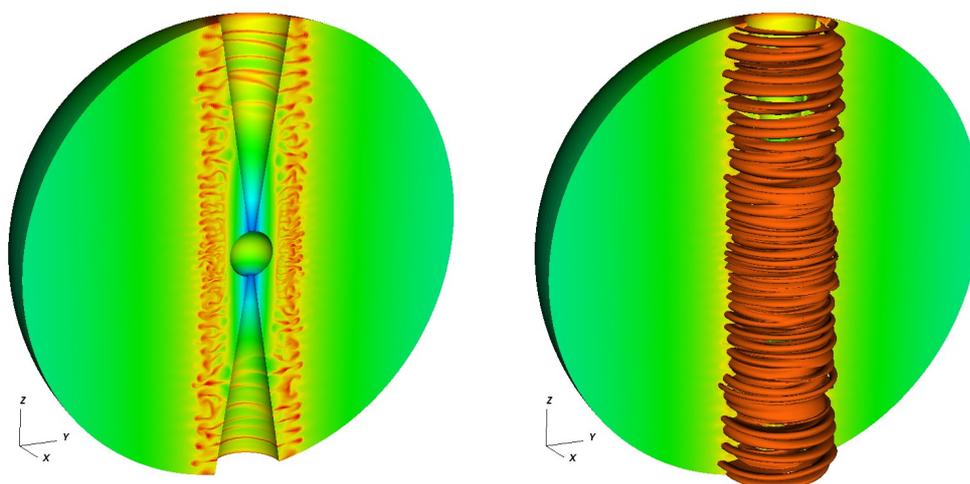


Рисунок 1. Цветом изображено распределение угловой компоненты скорости. На правой части рисунка добавлены поверхности постоянного значения, иллюстрирующие слабую зависимость численного решения от угла

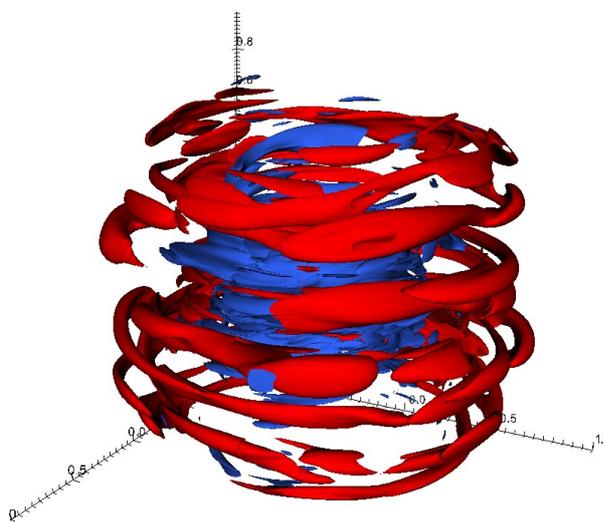


Рисунок 2. Поверхности постоянного значения для возмущений углового момента в конечной стадии расчета. Красным цветом изображены положительные возмущения момента, синим – отрицательные

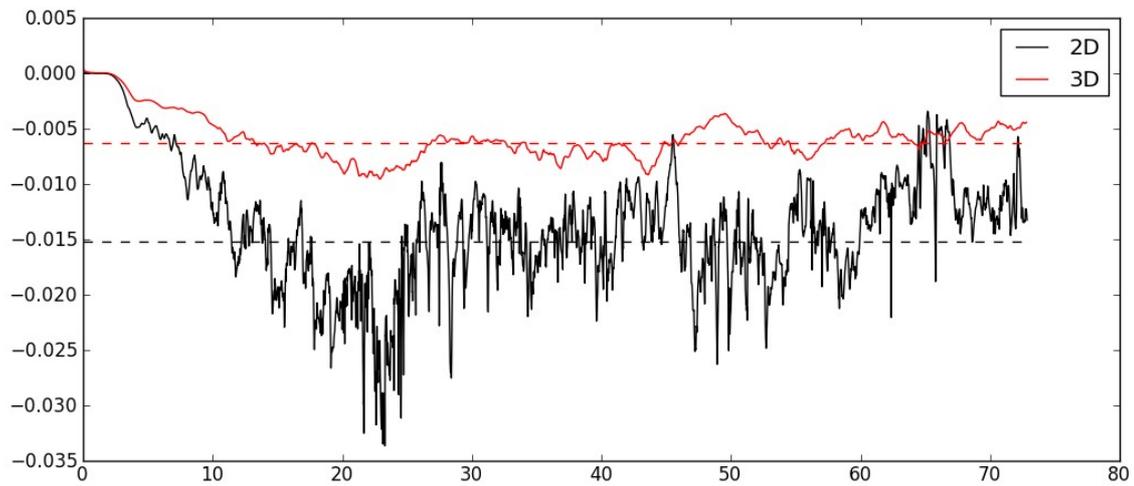


Рисунок 3. Поток вещества через внутреннюю границу расчетной области, выраженный в единицах от начальной массы вещества в расчетной области за один оборот. Красным цветом изображены результаты трехмерных расчетов, черным цветом изображены результаты, полученные в приближении аксиальной симметрии