

Эволюция углового момента коллапсирующих протозвездных облаков с магнитным полем

Султанов И.М.¹, Хайбрахманов С.А.^{1,2}, Дудоров А.Е.^{1,2}

¹Челябинский Государственный Университет, ²Уральский Федеральный Университет
E-mail: syltahof@yandex.ru

1. Введение

Согласно наблюдениям, угловой момент звёзд в несколько раз меньше углового момента молекулярных облаков, из которых они образовались [1]. Например, расхождение между удельным угловым моментом звезды типа Т Тельца и ядра молекулярного облака составляет около четырех порядков величины [2]. Одним из механизмов, который способен решить проблему, является торможение вращения облака магнитным полем. В некоторых моделях коллапса из-за катастрофического (слишком эффективного) магнитного торможения не образуются протозвёздные кеплеровские диски [3].

На данный момент существует множество моделей коллапса в рамках многомерной постановки задачи [4] и с учётом диссипативных МГД-эффектов [5]. Отдельные расчёты демонстрируют решение проблем лишь для конкретных заданных параметров.

Целью данной работы является исследование эволюции углового момента коллапсирующего магнитного вращающегося протозвёздного облака (ПЗО). Для этого исследуется динамика магнитных вращающихся ПЗО с различными начальными значениями тепловой, вращательной и магнитной энергий. Актуальность работы, обусловлена тем, что исследование эволюции и решение проблемы углового момента являются важной частью в теории образования звёзд.

4. Эволюция углового момента

На рисунке 2 изображено изменение углового момента в центре облака, со временем для $\epsilon_T = 0.6$, $\epsilon_\omega = 0.01$ с разными ϵ_m . Во всех случаях угловой момент остаётся долгое время равным единице, затем ближе к t_{ff} он начинает резко уменьшаться и для $\epsilon_m = 0.2, 0.3, 0.38$ угловой момент становится равным $l = 0.28, 0.14, 0.13$ соответственно.

На рисунке 3 изображено распределение удельного углового момента вдоль радиуса для $\epsilon_T = 0.6$, $\epsilon_\omega = 0.01$ и для разных ϵ_m в момент времени t_{ff} . С увеличением ϵ_m значения удельного углового момента уменьшаются в центральной части облака и увеличиваются на его периферии, что говорит о переносе углового момента с центральной части облака на его периферию.

5. Заключение

Во всех расчётах с магнитным полем наблюдалось уменьшение угловой скорости и удельного углового момента в плотном ядре облака и их увеличение на краях облака. Помимо этого, в центре облака наблюдается уменьшение углового момента, для $\epsilon_T = 0.6$, $\epsilon_\omega = 0.01$ и $\epsilon_m = 0.2 - 0.38$ угловой момент уменьшался на 72 – 83 %.

Всё это свидетельствует о переносе углового момента в коллапсирующем облаке с помощью магнитного поля.

Эволюция углового момента исследовалась в широком диапазоне начальных параметров коллапсирующего ПЗО. Магнитное торможение уже на изотермической стадии коллапса способно отвести значительную часть углового момента ПЗО.

2. Постановка задачи

Рассматривается гравитационное сжатие однородного сферически-симметричного облака с плотностью ρ_0 , радиусом R_0 , массой M_0 , температурой T_0 , угловой скоростью Ω_0 и магнитной индукцией B_0 . Векторы угловой скорости и магнитной индукции сонаправлены (см рис. 1).

Моделируется начальная стадия коллапса, во время которой выделяемая во время сжатия энергия эффективно уносится и сжимающийся газ можно считать изотермическим. Рассматривается случай идеальной МГД, когда магнитное поле заморожено в вещество.

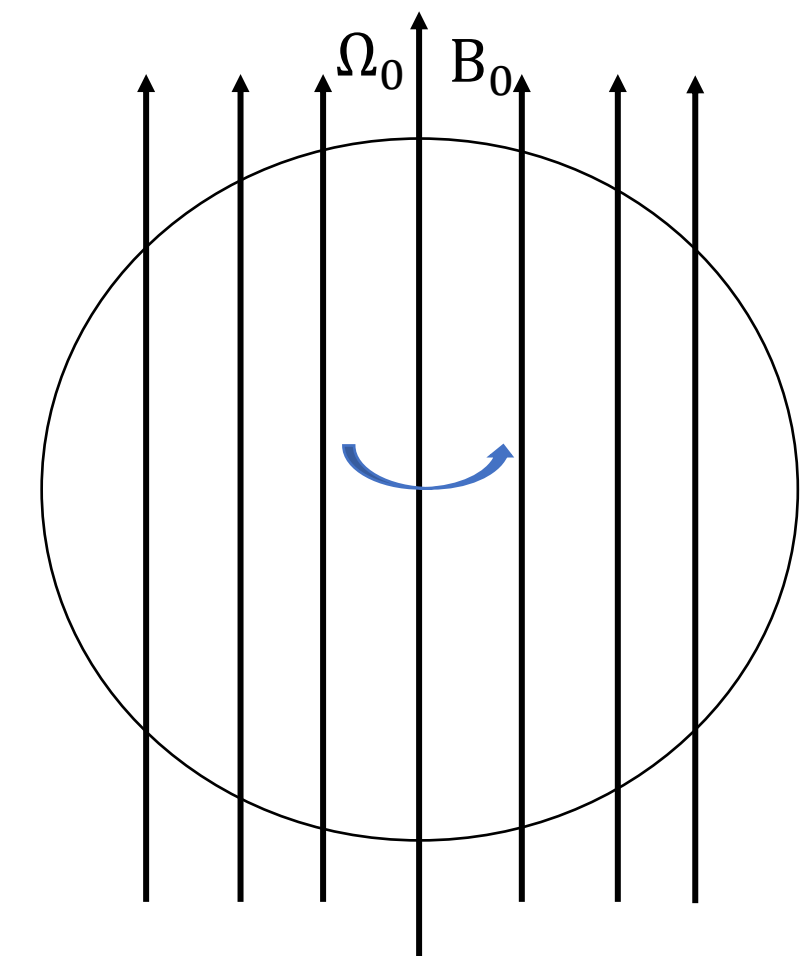


Рис1. Схематическое представление облака.

3. Метод решения

Дудоров и Сазонов показали, что коллапс магнитных вращающихся ПЗО можно исследовать в полуторамерном приближении [7]. Для этого система уравнений, которая описывает коллапс магнитных вращающихся ПЗО, расписывается в сферических координатах (r, θ, φ) в предположении осевой симметрии по углу φ . Затем уравнения усредняются по углу θ . Полученная система одномерных уравнений численно решалась двухшаговым методом Лакса-Вендроффа.

Исследование коллапса магнитных вращающихся ПЗО в рамках одномерной постановки задачи обладает следующими преимуществами:

- Реализация одномерного решения с помощью ЭВМ является более простой задачей.
- Позволяет исследовать динамику коллапса магнитных вращающихся ПЗО с различными начальными параметрами в широком диапазоне значений и проанализировать зависимость степени отвода углового момента от интенсивности начального магнитного поля.

В данной работе моделировался коллапс облака массой $1 M_\odot$ и температурой 15 К. Параметрами расчётов являются начальные отношения тепловой ϵ_T , вращательной ϵ_ω и магнитной энергий ϵ_m к гравитационной энергии. Время, указанное в расчётах, измерялось в единице времени свободного падения.

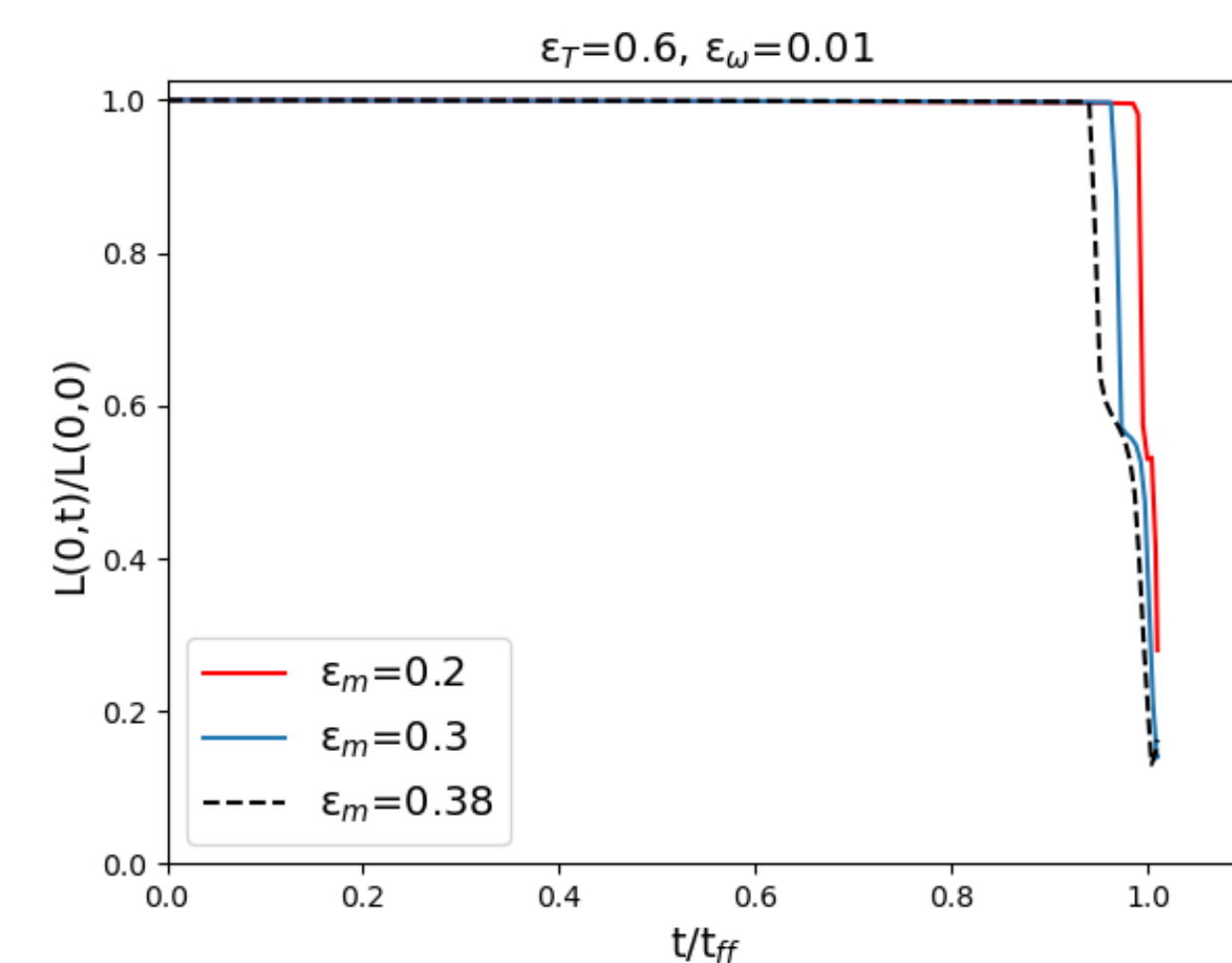


Рис2. Зависимость углового момента со временем в центре облака для $\epsilon_T = 0.6$, $\epsilon_\omega = 0.01$ и разных ϵ_m .

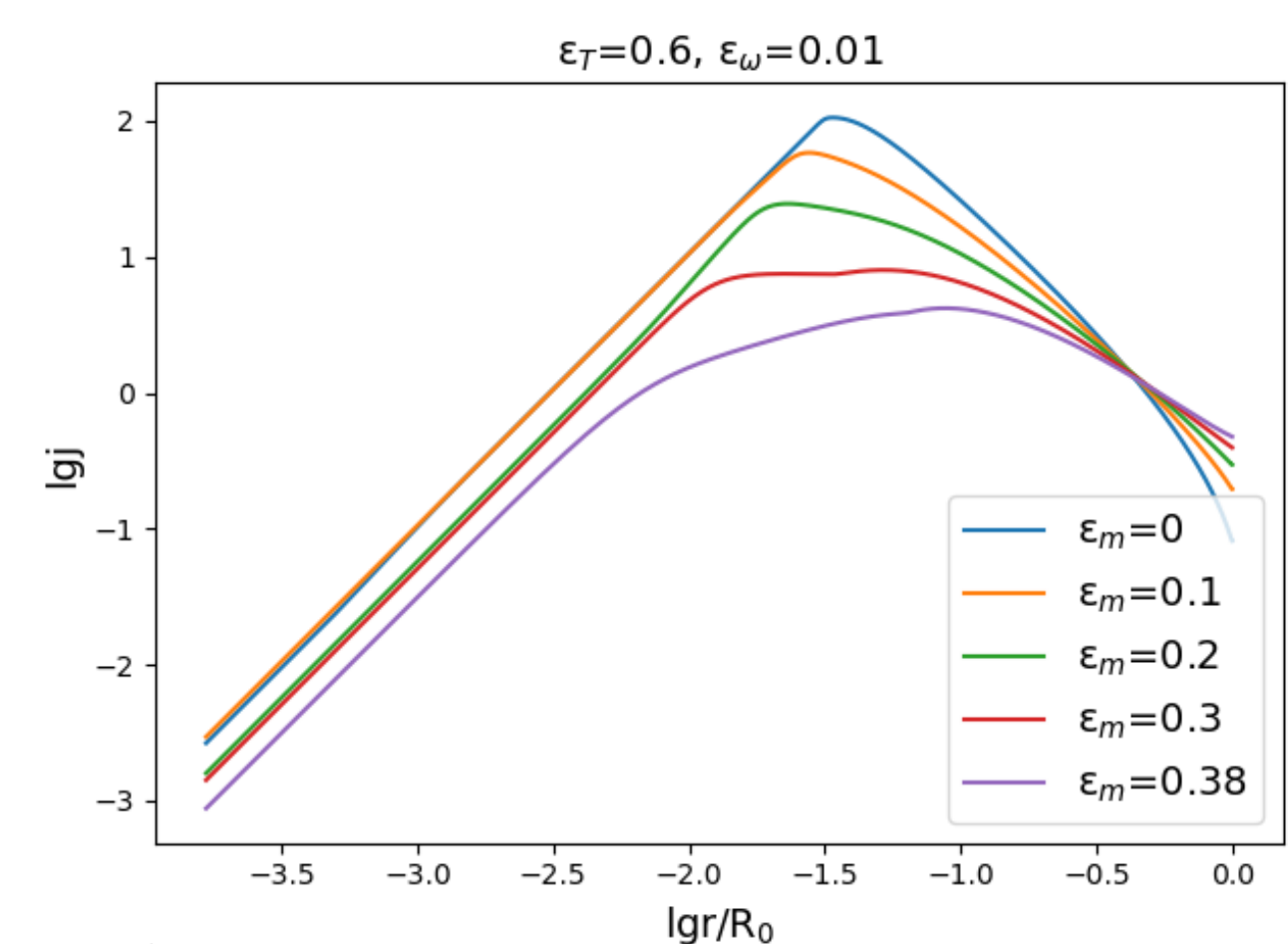


Рис3. Распределение удельного углового момента вдоль радиуса для $\epsilon_T = 0.6$, $\epsilon_\omega = 0.01$ и разных ϵ_m в момент времени t_{ff} .

Ссылки:

1. Larson, 2010, Reports on Progress in Physics, 73, 1.
2. Bodenheimer, 1995, Reports on Progress in Physics, 33, 199.
3. Heiles & Crutcher, 2005, Cosmic Magnetic Fields. Editor: Richard Wielebinski, Rainer Beck, Lecture Notes in Physics, 664, 137.
4. Zhao et al, 2018, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 473, 4868.
5. Wurster et al, 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 489, 1719.
6. Дудоров & Сазонов, 1981, Научные информации, 49, 114.