

МАГНИТНАЯ ГИДРОДИНАМИКА КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ

Дертеев С.Б., Михальев Б.Б.

Калмыцкий государственный университет, Элиста, Россия

MAGNETOHYDRODYNAMICS OF CORONAL MASS EJECTIONS

Derteev S.B., Mikhalyaev B.B.

Kalmyk State University, Elista, Russia

The complexity and diversity of the phenomenon of coronal mass ejections demand a wide variety of approaches and methods for studying them. The emergence of new observational tools in recent decades provides additional information useful in studying this phenomenon. The study of dynamics of a CME that is relevant for predicting its propagation in interplanetary space is usually carried out in the MHD approximation. The problem of formulating a model describing CME is not unique from either a physical or a mathematical point of view. The equations of the ideal MHD are widely used, while the presence of current sheets and the effect of reconnection of magnetic lines of force are discussed. When choosing a mathematical model, one also has to take into account the structure and physical properties of the medium in which the propagation takes place.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-153-156

Теоретические исследования динамики корональных выбросов массы (КВМ), как крупномасштабного явления, обычно проводятся в приближении магнитной гидродинамики. Проблема гидродинамического описания здесь осложняется необходимостью учета структуры магнитного поля, которая в большинстве случаев не является очевидной. Сама постановка задачи о моделировании КВМ не является однозначной ни с физической, ни с математической точки зрения.

История наблюдений КВМ насчитывает около полувека, однако использование в последнее время различных новых технических средств позволило получить большое количество подробных данных, из которых можно сделать ряд заключений о характере этого явления. Отдельной важной проблемой является описание механизма запуска КВМ, которое здесь мы не затрагиваем. Наша задача – показать существующие возможности МГД-моделирования для объяснения основных наблюдаемых свойств КВМ. С этой точки зрения удобно выбрать кинематические параметры явления – скорость и ускорение.

Оценки видимой скорости ядер КВМ дают значения от 20 до 1500 км/с, случаи больших скоростей существуют, но редки [1] (рис. 1). Кинематическая классификация позволяет разделить КВМ на медленное и быстрые, причем первые имеют тенденцию к ускорению (рис. 2), по крайней мере, в поле видимости коронографа, вторые – к замедлению [1–2].

Подобное усреднение скоростей объясняется действием потока солнечного ветра, среднее значение которого находится около 400 км/с.

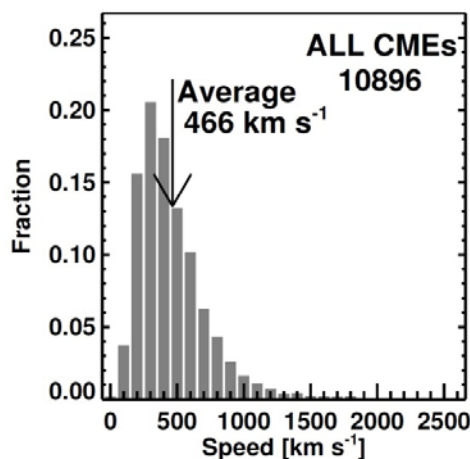


Рис. 1. Распределение КВМ по скоростям [1].

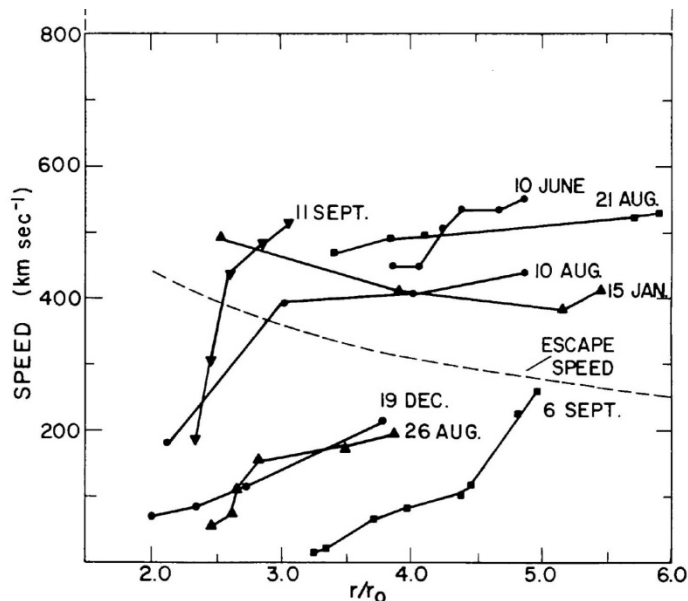


Рис. 2. Изменение скорости КВМ с расстоянием от Солнца [2].

Одним из часто обсуждаемых вопросов, связанных с изучением возникновения и динамики КВМ, является роль магнитного пересоединения. В настоящее время принято считать, что вспышки, эрупция протуберанцев и КВМ есть составные части единого процесса глобальной магнитной эрупции. Согласно стандартной модели вспышки/КВМ, магнитное пересоединение играет ключевую роль на начальной стадии эрупции, когда процесс развивается в нижних, относительно плотных областях короны.

В обзоре [3] подробно проанализированы кинематические свойства 6621 событий, наблюдавшихся при помощи SOHO/LASCO. Замедленное движение (DD CME) оказалось далеко не характерным для их динамики и наблюдалось только в 1797 из рассмотренных случаев, в то время как в 2132 случаях наблюдалось ускорение (AA CME). Наблюдалось также движение со знакопеременным ускорением: ускорение с последующим замедлением (AD CME, 1482 случая) и даже замедление с последующим ускорением (DA CME, 1210 случаев). Обозначена корреляция кинематических свойств с условиями возникновения КВМ: тип AA наблюдается перед вспышками, тип DD – после вспышек, в других случаях подобная корреляция не очевидна.

Подобная статистика свидетельствует о неоднозначности в целом динамики КВМ и существовании множества факторов, приводящих к этому результату. Механизм их распространения в гелиосфере так же до конца не понят, как и механизм начального ускорения. На распространение могут

оказывать влияние как солнечный ветер (аэродинамическое торможение), так и ударная волна, возникающая впереди самого облака КВМ [4].

Адекватное моделирование процесса распространения КВМ до расстояний в несколько десятков $R_{\odot}$ является существенно трехмерной задачей, которая требует для своего решения солидных технических и программных ресурсов. В последние годы оно становится доступным для широкого круга исследователей, что объясняет появление целого ряда работ на эту тему. Для постановки задачи требуется определить модель процесса, то есть сформулировать уравнения и начальные условия. Имеется много работ с использованием уравнений идеальной МГД. Распространены также модели, где учитываются диссипативные эффекты.

Типичным примером подхода на основе идеальной МГД можно считать модели, в которых начальное положение КВМ задается аналитически магнитной трубкой, а окружающая среда представлена в виде упрощенной модели солнечного ветра с учетом эффектов гравитации и дополнительных источников нагрева [5–6]. Область, в которой разворачивается картина движения, обычно простирается от расстояний порядка $1 R_{\odot}$ до нескольких десятков и сотен $R_{\odot}$.

Более реалистичный подход должен основываться на конкретных данных о КВМ и внешней среде на определенную дату. Необходимо также отметить, что свойство идеальности в некоторой степени является относительным при численном моделировании, поскольку влияние искусственной вязкости способно привести к тем же результатам, которые могут дать вполне реальные диссипативные эффекты.

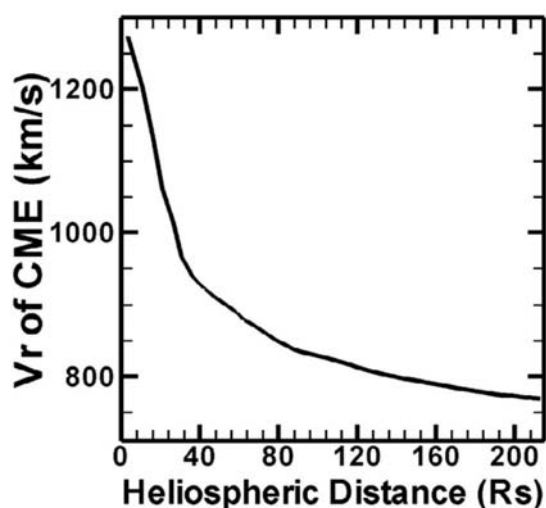


Рис. 3. Изменение скорости КВМ с расстоянием [7].

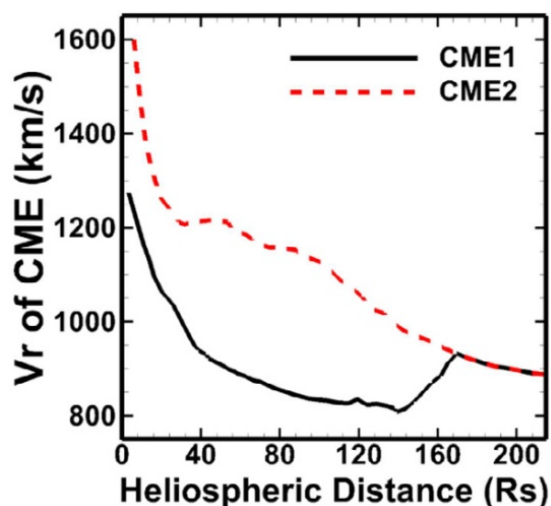


Рис. 4. Иллюстрация процесса взаимодействия двух КВМ [7].

На рисунках 3 и 4 показаны результаты моделирования события от 28–31 марта 2001 года [7]. Силы, приводящие к замедлению движения КВМ, в данном случае есть силы аэродинамического торможения, магнит-

ного натяжения и гравитационного притяжения. Силы, приводящие к ускорению, – это силы магнитного и газового давлений. На движение может влиять также обмен моментом количества движения с солнечным ветром, особенно значительно этот эффект проявляется при взаимодействии двух различных КВМ.

В диссипативном приближении широко используются уравнения так называемой термодинамической МГД, в которых учтены вязкость, теплопроводность, электрическое сопротивление, а также излучение и нагрев короны [8–9]. Для численного моделирования разработан код MAS (Magnetohydrodynamic Algorithm outside a Sphere) с расчетами в сферических координатах. Имеются версии с векторным потенциалом, что освобождает от проблемы выполнения условия $\text{div}\mathbf{B} = 0$.

MAS-код используется при моделировании начального выброса. Для описания движения КВМ в межпланетном пространстве используется его гелиосферная версия, где в уравнении для энергии исключены диссипативные эффекты, нагрев и радиационные потери, но в уравнении для момента количества движения учтены сила Кориолиса и центробежная сила. При описании движения межпланетных КВМ учитывается также структура межпланетного магнитного поля.

При помощи MAS-кода было проведено моделирование вспышки Бастилия и связанных в ней двух КВМ [9]. Расчеты дали значение скорости, на 200 км/с меньшее наблюдавшейся скорости, что могло привести к задержке времени по прогнозу прибытия КВМ в область околоземного пространства. Одной из возможных причин рассматривается возможность того, что эффекты вязкости и электрического сопротивления в уравнениях МГД оказываются чрезмерными по сравнению с реальными. Таким образом в результатах моделирования могут появляться артефакты.

Литература

1. Webb D.F., Howard T.A. // *Living Rev. Solar Phys.*, 2012, 9, 3.
2. Chen P.F. // *Living Rev. Solar Phys.*, 2011, 8, 1.
3. Nicewicz J., Michalek G. // *Solar Phys.*, 2016, 291, 1417–1432.
4. Howard T. *Coronal Mass Ejections: An Introduction* – Springer. New York, Dordrecht, Heidelberg, London. 2011.
5. Poedts S., Jacobs C., van der Holst B., et al. // *Earth Planet Space*, 2009, 61, 599–602.
6. Shen F., Shen C., Zhang J. et al. // *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 2014, 119, 7128–7141.
7. Shen F., Wu S.T., Feng X., Wu C.-C. // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 2012, 117, A11101.
8. Lionello R., Downs C., Linker J.A., et al. // *Astrophys. J.*, 2013, 777, 76.
9. Török T., Downs C., Lionello R., et al. // *Astrophys. J.*, 2018, 856, 75.