

ПРОГНОЗ 2026, ИЗМИРАН, 25-29 мая

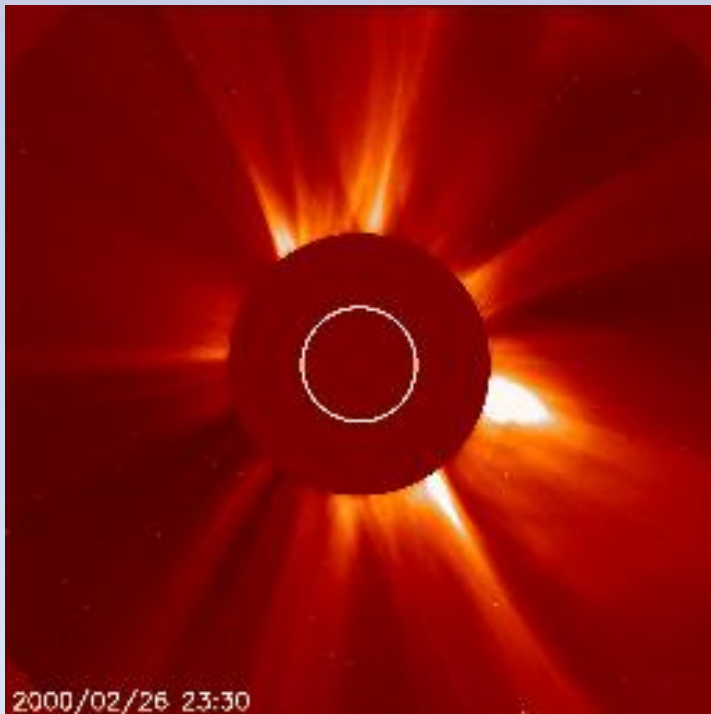


Тороидальная и винтовая неустойчивости и диагностика магнитного поля токовых жгутов в короне Солнца

Цап Ю.Т., Степанов А.В., Копылова Ю.Г.

КрАО РАН, ГАО РАН

КОРОНАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ МАССЫ – космические взрывы, сопровождаемые выносом коронального вещества и магнитного поля Солнца в межпланетную среду - наиболее яркие и геоэффективные процессы в атмосфере Солнца.



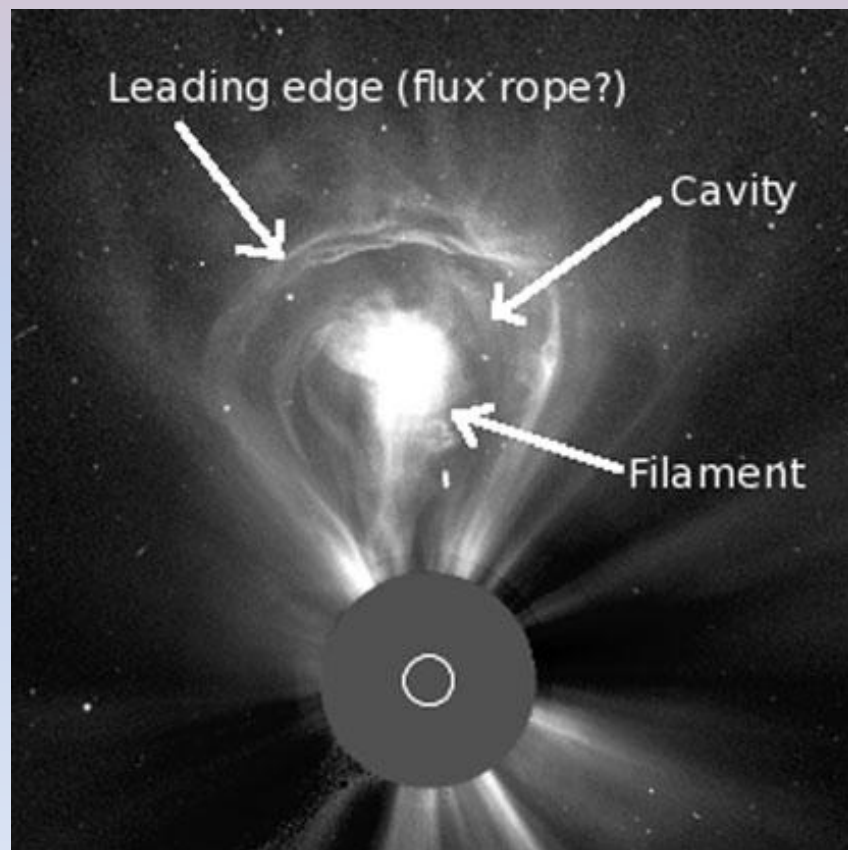
Скорость КВМ может достигать 2000 км/с
кинетическая энергия – 10^{33} эрг, а масса - 10^{16} г. Они являются источником сильных магнитных бурь на Земле. Наиболее сильные КВМ, как правило, связаны с магнитными жгутами, механизм образования и условий равновесия которых все еще вызывает много вопросов.

Зачастую (по меньшей мере, 40%; Vourlidas et al. 2013, Solar Phys., v.28, p.179) KBM имеют трехкомпонентную структуру (Cheng et al., 2017, Sci.China Earth Sci., v.60, p.1383; Zhang et al., 2021, Progress in Earth and Planetary Science, v. 8, N 56).

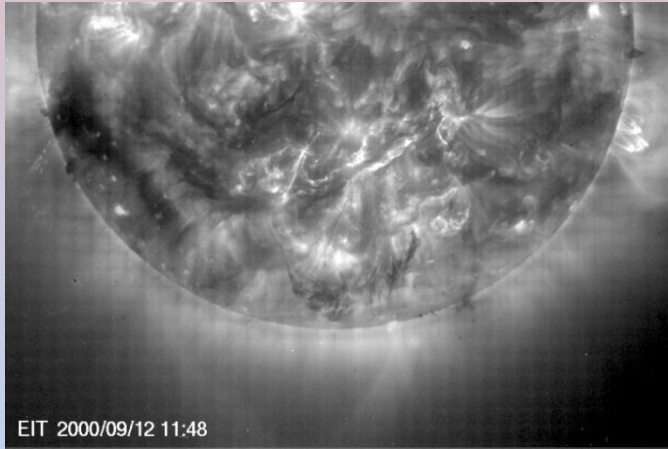
Изображение классического KBM, состоящего из трех частей, который наблюдался 27.02.2000 г с помощью коронографа LASCO, установленного на борту SOHO. Белая окружность внизу соответствует поверхности Солнца. Серый диск - искусственная Луна.

Три части KBM: передний яркий фронт (магнитный жгут), корональная темная полость и яркое волокно.

https://live.staticflickr.com/3892/15173335507_14338f691e.jpg

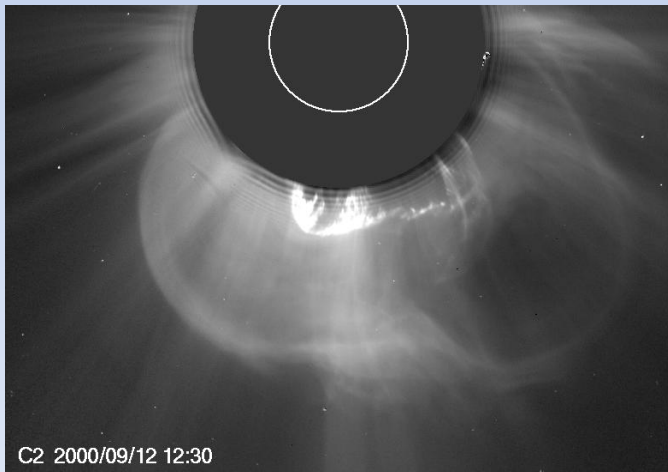


При проведении наблюдений возникают трудности с отождествлением области выброса на диске Солнца и представлениями трехмерной геометрии выброса.



Что касается теории, то до сих пор нет ясных представлений о природе сил, ответственных за формирование корональных выбросов.

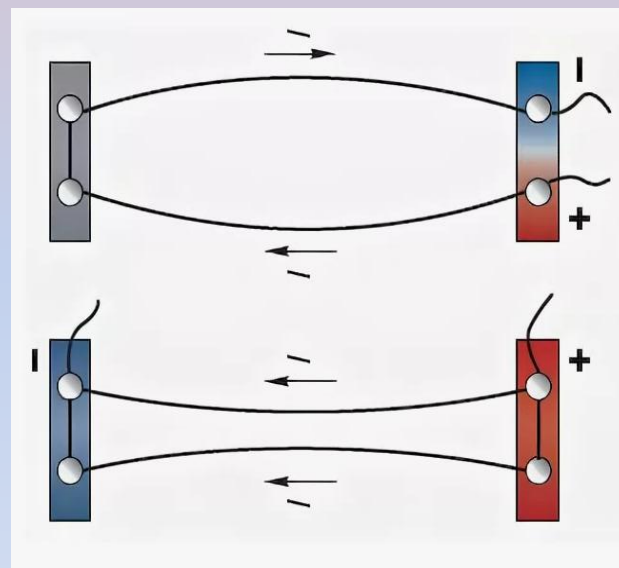
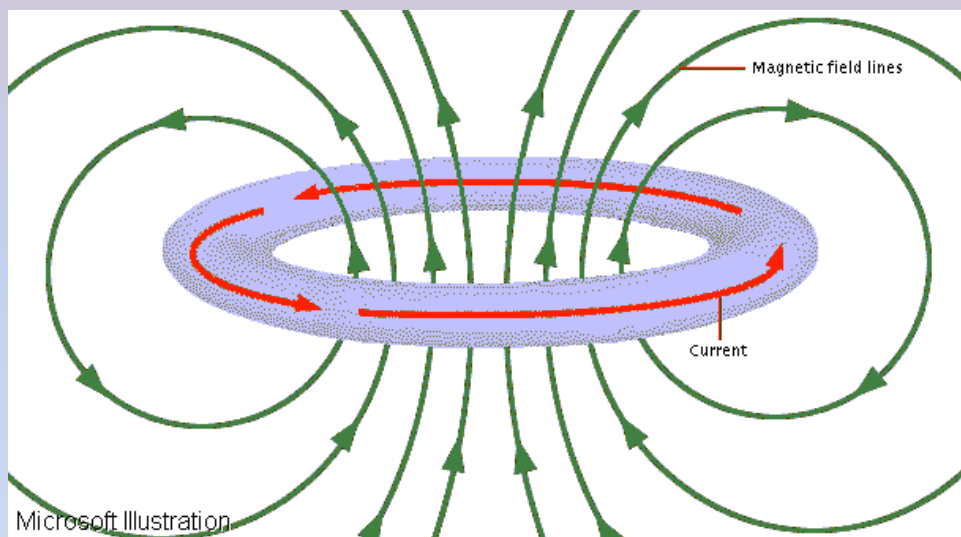
Вместе с тем, как правило, формирование выброса связывается с развитием тороидальной неустойчивости, которая определяется темпом уменьшения магнитного поля с высотой (decay index).



В настоящее время для описания МГД равновесия петельных структур, моделируемых в виде магнитного жгута, наибольшую популярность получили два механизма:

1. Механизм Шафранова—Клима-Торока (Шафранов 1966; Kliem, Torok, 2006) – модель плазменного тора (виток с током).
2. Механизм Мушовиаса-Поланада—Соловьева-Уралова (Mouschovias, Poland, 1978; Соловьев, Уралов, 1979) – модель изолированного магнитного жгута.

Модель Шафранова - это плазменный тор (жгут) с электрическим током (ТОКАМАК), в котором сила, ответственная за эрупцию жгута (баллонная сила, hoop force), сводится, в частности, к отталкиванию двух параллельных проводников с током



Полная $L = L_i + L_e$ - сумма индуктивностей внутри (i) и снаружи (e) тора

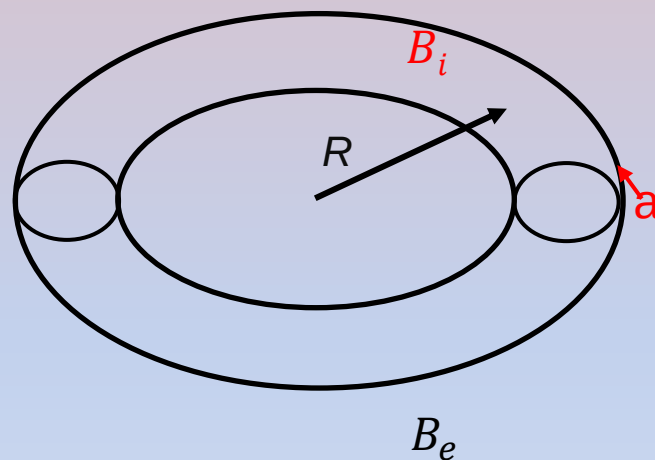
$$L_i = 2 \frac{\int_0^a r B_\phi^2(r) dr}{a^2 B_\phi^2(a)} \sim 1, \quad L_e = 4\pi R \left(\ln \frac{8R}{a} - 2 \right).$$

Используя вариационный принцип, Шафранов (1966) получил выражение для

баллонной силы (действует вдоль R), которая приводит к растягиванию тора (жгута)

$$F_R = \frac{V}{R} \left\{ \frac{B_a^2}{4\pi} \left(\ln \frac{8R}{a} - 1 + \frac{L_i}{2} \right) + \frac{B_e^2 - \overline{B_i^2}}{8\pi} \right\}$$

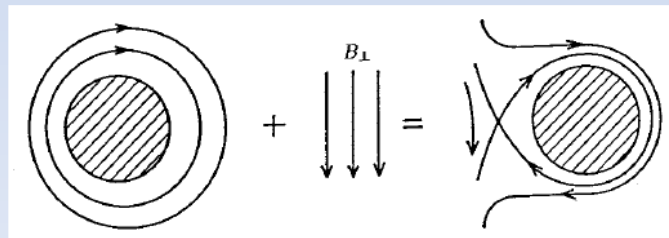
$$B_a = 2I/(ca)$$



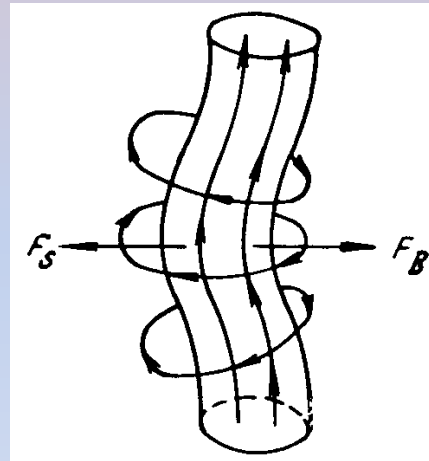
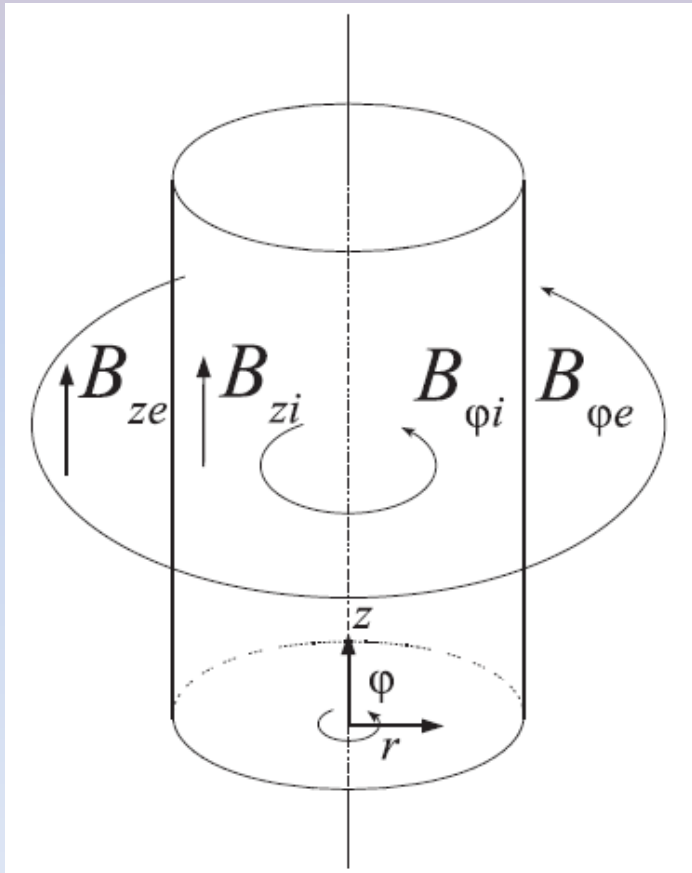
$V = 2\pi^2 a^2 R$ – объем тора, L – индуктивности внутри (i) и снаружи (e) жгута, R и a - большой и малый радиусы тора, B_e^2 и $\overline{B_i^2}$ квадрат внешнего и внутреннего продольного магнитного поля

Отметим, что тороидальную неустойчивость определяет стабилизирующая сила $V(JB_\perp)/c$?

Рис. Схематическое изображение влияния внешнего магнитного поля $B_\perp$ на плазменный тор (видно, что с внутренней части тора магнитное поле из-за эффекта наложения полей ослабевает).



Основная проблема – изгибная винтовая неустойчивость, которая возникает, если угол закрутки магнитных силовых линий $\Phi > 2\pi$ (критерий Крускала-Шафранова)



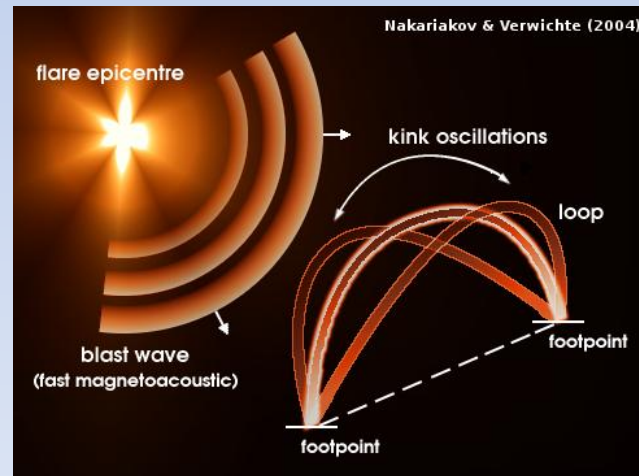
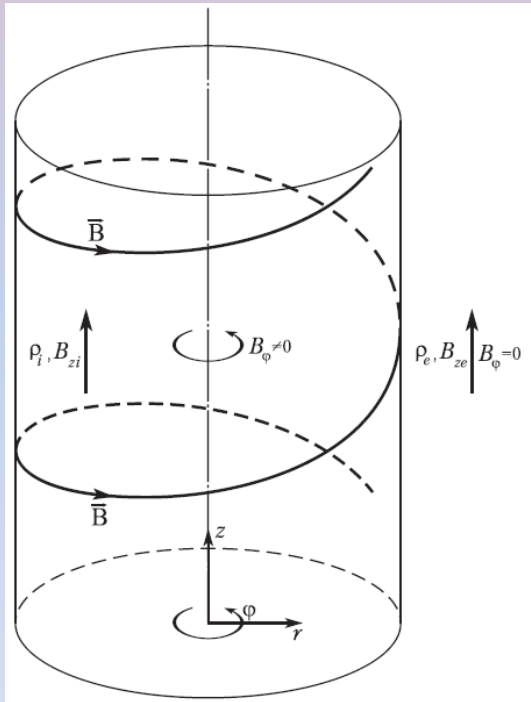
*Число витков магнитных силовых линий
вокруг оси:*

$$N = \frac{LB_{\phi}}{2\pi a B_z} \sim 1 \text{ при } L/a \sim 10$$

Между тем изгибная винтовая неустойчивость в случае **экранированного жгута** не возникает – жгут испытывает лишь поперечные колебания с частотой (Bennet et al., 1999; Cheremnykh, et al., 2017; Tsap et al., 2020):

$$\Omega^2 = \frac{k^2}{4\pi} \frac{B_{zi}^2 + B_{ze}^2}{(\rho_i + \rho_e)}.$$

где k – волновое число, B и ρ – магнитное поле и плотность внутри (i) и снаружи (e) жгута.



Но возникает проблема с баллонной силой

Соловьев & Уралов (1979) получили выражение для баллонной силы экранированного жгута из формулы Шафранова (1966):

$$F_R = -\frac{V}{R} \left\{ P_{ex} - \bar{P}_{in} - \frac{H_{\varphi, ex}^2(a)}{4\pi} \left[\ln \frac{8R}{a} - 1 - \frac{l_{in}}{2} \right] + \frac{\bar{H}_{z, in}^2}{8\pi} \right\}$$

$$P_{ex} - \bar{P}_{in} = \frac{1}{8\pi} \bar{H}_{z, in}^2 - \frac{1}{8\pi} H_{z, ex}^2(a)$$

$$l_{in} = \frac{\bar{H}_{\varphi, in}^2}{H_{\varphi, ex}^2(a)} \longrightarrow \infty \text{ при } H_{\varphi, ex} \rightarrow 0$$

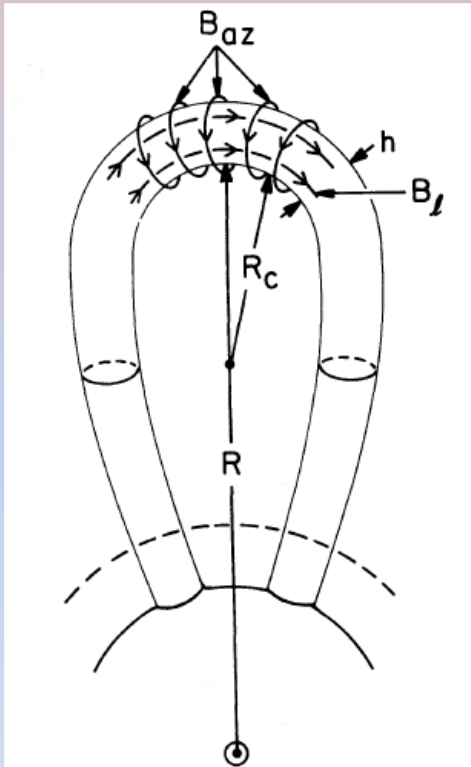
$$f_R = -\frac{1}{R} \frac{\bar{H}_{z, in}^2}{8\pi} (2 - \kappa),$$

$$\kappa = \bar{H}_{\varphi, in}^2 / \bar{H}_{z, in}^2$$

То же «на пальцах»

TELEMACHOS CH. MOUSCHOVIAS AND ARTHUR I. POLAND

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 220:675–682, 1978 March 1



$$\begin{aligned}\Delta(B_{az}^2) &\equiv B_{az}^2(\text{bottom}) - B_{az}^2(\text{top}) \\ &= \left[\bar{B}_{az} \frac{\bar{R}_c}{R_c(\text{bottom})} \right]^2 - \left[\bar{B}_{az} \frac{\bar{R}_c}{R_c(\text{top})} \right]^2 \\ &= 2\bar{B}_{az}^2 \frac{h}{\bar{R}_c} .\end{aligned}\quad (2)$$

$$\frac{\bar{B}_{az}^2}{4\pi\bar{R}_c} - \frac{\bar{B}_l^2}{4\pi\bar{R}_c} = \bar{\rho}g .$$

$$\bar{B}_{az} > \bar{B}_l .$$

Таким образом, эрупция возможна лишь для достаточно сильно скрученного жгута.

Действительно, угол закрутки и число оборотов, необходимое для эрупции жгута:

$$\text{Угол закрутки: } \Phi = \frac{LB_\phi}{aB_z} = \frac{L}{a} \frac{B_\phi}{B_z} \approx 10 \times 1.4 \approx 4.5\pi.$$

$$N = \frac{\Phi}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{LB_\phi}{aB_z} \right) = \frac{1}{2\pi} \frac{L}{a} \frac{B_\phi}{B_z} = \frac{1}{6.28} \times 10 \times 1.4 \sim 2.2.$$

Для того чтобы работал механизм Соловьева-Уралова, число оборотов вокруг магнитных силовых линий $N > 2$.

Выводы

Дабы выяснить, какой механизм определяет эрупцию петельного КВМ, необходимо определить число витков магнитных силовых линий вокруг оси N из наблюдений.

- Если $N < 1$, то доминирует механизм Шафранова (Клима-Торока).
- Если $N > 2$, то доминирует механизм Мушовиаса-Поланада (Соловьева-Уралова).
- Требуются наблюдения.