

**ТОПОЛОГИЯ, ГЕОМЕТРИЯ
И СТЕРЕОСКОПИЯ
СОЛНЕЧНОЙ
АТМОСФЕРЫ В ОБЛАСТИ
ИСТОЧНИКОВ
СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА**

**Веселовский
Игорь Станиславович**

Основные физические принципы известны

Table 3. Irreducible and full set of independent orthogonal dimensionless parameters in the ‘velocity normalised basis’

Symbol	Name	Formula / Definition	Significance
M	Mach number	v/c_s	Temperature
Ma	Magnetic Mach (Mach – Alfvén)	v/V_A	Magnetic field and currents
S	Strouhal	vt/x	Time
Tr	Trieste numbers (set)	Ratio of internal and boundary crossing fluxes	Openness degree of the object against energy, momentum and mass fluxes
Ve	“Velocity-emission”	$\left(\frac{E_{kin}}{E_{at}}\right)\left(\frac{x}{v\tau_{rad}}\right)$	Mass density
Kn	Knudsen numbers (set)	λ/x	Length
Fr	Froude	v^2/gl	Gravity
F	Faraday number	$\frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t} / \nabla \varphi$	Electric fields and charges $\left(\frac{j}{\rho c}\right)\left(\frac{x}{ct}\right)$

Governing MHD equations with dissipation and radiation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \vec{\nabla}) \vec{v} \right) + \vec{\nabla} p - \frac{1}{4\pi} [(\vec{\nabla} \times \vec{B}) \times \vec{B}] + \vec{F}_{viscous} + \vec{F}_{gravity} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u + \frac{1}{2} \rho v^2) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i w + \rho v_i \frac{v^2}{2} + \rho v_k \sigma'_{ik} - \kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{1}{4\pi} e_{ikt} e_{lmn} v_m B_k B_n + \frac{c}{4\pi \sigma} e_{klt} j_k B) = -L + A \quad (3)$$

Вопрос в реализации

- Обобщенные топологические и геометрические образы лежат в основе современной стереоскопии Солнца
- Топология как часть геометрии: связность, сингулярность, непрерывное преобразование

Governing MHD equations with dissipation and radiation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho \left\{ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \vec{\nabla}) \vec{v} \right\} + \vec{\nabla} p - \frac{1}{4\pi} [(\vec{\nabla} \times \vec{B}) \times \vec{B}] + \\ + \vec{F}_{viscous} + \vec{F}_{gravity} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho u + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho v_i w + \rho v_i \frac{v^2}{2} + \rho v_k \sigma'_{ik} - \kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} + \right. \\ \left. + \frac{1}{4\pi} e_{ikl} e_{lmn} v_m B_k B_n + \frac{c}{4\pi \sigma} e_{ikl} j_k B_l \right) = -L + A \end{aligned} \quad (3)$$

Масштабирование

- Линейные размеры
- характерные времена
- плотность
- скорость
- температура
- состав плазмы
- напряженность магнитного поля
- напряженность электрического поля
- поверхностную связность
- степень открытости

Таков минимальный набор, необходимый для количественного описания и классификации рассматриваемых образов (эффективная размерность пространства физически независимых параметров 3-10 в зависимости от любопытства).

Ортогональный базис

Table 3. Irreducible and full set of independent orthogonal dimensionless parameters in the ‘velocity normalised basis’

Symbol	Name	Formula / Definition	Significance
M	Mach number	v/c_s	Temperature
Ma	Magnetic Mach (Mach – Alfvén)	v/V_A	Magnetic field and currents
S	Strouhal	vt/x	Time
Tr	Trieste numbers (set)	Ratio of internal and boundary crossing fluxes	Openness degree of the object against energy, momentum and mass fluxes
Ve	“Velocity-emission”	$\left(\frac{E_{kin}}{E_{at}} \right) \left(\frac{x}{v\tau_{rad}} \right)$	Mass density
Kn	Knudsen numbers (set)	λ/x	Length
Fr	Froude	v^2/gl	Gravity
F	Faraday number	$\frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t} / \nabla \varphi$	Electric fields and charges $\left(\frac{j}{\rho c} \right) \left(\frac{x}{ct} \right)$

Многообразиие

- Совокупность этих независимых и ортогональных друг другу «физических координат» в обобщенном многомерном пространстве весьма велика, что порождает большое число возможных комбинаций.
- Бинарная классификация: большой – малый. Число признаков, например, 7. Число различных типов $2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 128$.
- Более сложная классификация: большой – малый – средний.
3 3 3 3 3 3 3 лень считать.

Быстрый медленный средний

Разреженный плотный

Горячий холодный.....

Что такое источник?

- Место выхода линии потока солнечного ветра из-под воображаемой (не обязательно сферической) поверхности вокруг Солнца.
- «Поверхность источника солнечного ветра». Шаттен, Вилкоккс
- Скорость и магнитное поле всегда параллельны? Такого закона нет..

Условность и относительность понятия об источниках солнечного ветра (1)

- Скорость не инвариантна относительно выбора системы координат.
- Вещество в короне сохраняется. В этом смысле нет никаких «источников».
- Вещество поступает в корону снизу и обновляется там приблизительно за две недели, но не целиком. Где-то быстрее, где-то медленнее.
- Часть падает вниз. Часть улетает в межпланетное пространство. Турбосфера и турбопауза.
- Все источники временные. Постоянных нет.
- Время жизни известных источников СВ от многих месяцев (большие КД) до нескольких часов (эрупции)

Условность и относительность понятия об источниках солнечного ветра (2)

- Для поддержания солнечного ветра нужно не только вещество, но и энергия.
- Источники массы и энергии не всегда совпадают друг с другом в пространстве.
- Например, в корональных дырах вещество «подхватывается» сбоку от транзитных потоков в мелкомасштабных джетах и струях и увлекается ими путем нелокального нагружения массы. Процесс мало исследован. Конкурирующие процессы – ускорение потоком волн, которые могут быть каналированными.
- Аналогичные явления могут происходить вокруг эруптивных протуберанцев.
- Процесс формирования медленного солнечного ветра не универсален, а разнообразен.
- То же самое относится и к быстрому ветру.
- Множество физически различных режимов.

Турбопауза

- Мгновенная граница «невозврата».
- Совокупность самых удаленных нулевых точек в радиальной скорости – изолированные точки, линии, поверхности, объемы.
- Форма турбопаузы и ее удаленность от Солнца изменчивы и недостаточно изучены.

Турбосфера

- Кольцевая область пространства вокруг Солнца, в которой турбулентные неупорядоченные движения вверх-вниз и в стороны преобладают над регулярным радиальным расширением плазмы от Солнца.
- За внешними пределами этой кольцевой области энергия радиального движения больше энергии тепловых и турбулентных движений, но может быть еще меньше магнитной энергии.
- За ее внутренними пределами можно пренебречь потерями вещества и энергии на солнечный ветер.

Что знаем об источниках

- Мы знакомы лишь с небольшим числом структур и явлений в атмосфере Солнца, таких как корональные дыры, стримеры, псевдостримеры, лучи, петли, плазменные слои и трубки, выбросы массы, эруптивные протуберанцы, «полярные перья», разнообразные струи и «джеты», «жгуты», волокна, «фибриллы» вспышки и микровспышки, «плазмоиды», вихри, складки Уитни, узлы, фокусы, седла и другие проекционные сингулярности, реальные и ложные точки пересоединения магнитных полей, яркие точки, различные волны и конвективные движения, включая сюда разрывы, ударные волны и т.п.

Важно

- За пределами нескольких радиусов (~ 6) Солнца возврат плазмы назад никогда не наблюдался. Sheeley and Wang.
- В среднем полагают в моделях $\sim 2,5-3.5$.
- Это весьма грубое приближение, достаточное лишь в нулевом приближении по обратным числам Маха и Маха-Альвена.
- Результирующая точность по порядку величины не более нескольких $\sim 0,1$.

Что плохо известно

- Какую долю занимает поверхность источника на выбранной поверхности (например, сфере) вокруг Солнца в данный момент времени (от 0 до 1)?
- Какова топология (физическая связность «отверстий в сите»)?
- Какова мгновенная форма турбосферы вокруг Солнца?

Чего еще не знаем

- Очень мало пока знаем об электрических полях и дрейфах, важную роль которых М.М. Молоденский понимал, пожалуй, как ни кто другой.
- Не уставал он говорить и о независимой роли электрических токов в различных геометрических конфигурациях.

Электрический дрейф – причина подъема или опускания вещества в вершинах замкнутых петель

- «Большой Дед» 28 августа 1945 г.
- $V \sim c E/B \sim r/t$
- Автомодельный фрагмент
- Часть вверх. Часть вниз.
- Вращение. Электрический заряд.
- Спиральный узор. Продольный ток.

Простое и сложное

- Он отлично сознавал крайне ограниченный смысл в решении многочисленных задач о равновесии и линейной неустойчивости, хотя сам этим много и конкретно занимался в начале своего научного пути. Его суммарный вклад в науку о сложных плазменных процессах на Солнце еще предстоит оценить по достоинству.

«Фрагменты»

- Предстоит многое узнать и открыть, прежде чем станет понятной сложная «мозаика явлений и строительных блоков».
- В теоретическом плане наиболее интересными представляются сейчас вопросы о нелокальных связях и нелинейных процессах с хорошо понятными и осознанными начальными и граничными условиями.

Пример не из физики Солнца

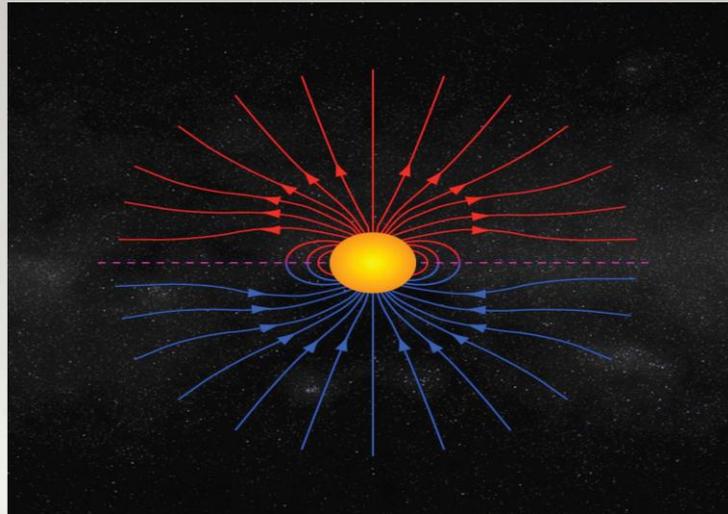
- Магнитная буря 21 января 2005 г. развивалась при северной ориентации ММП, что крайне необычно.
- Возможные причины столь странного явления обсуждаются в литературе.
- Подсказка от природы: на следующем слайде

Связность в ветре и в магнитосфере

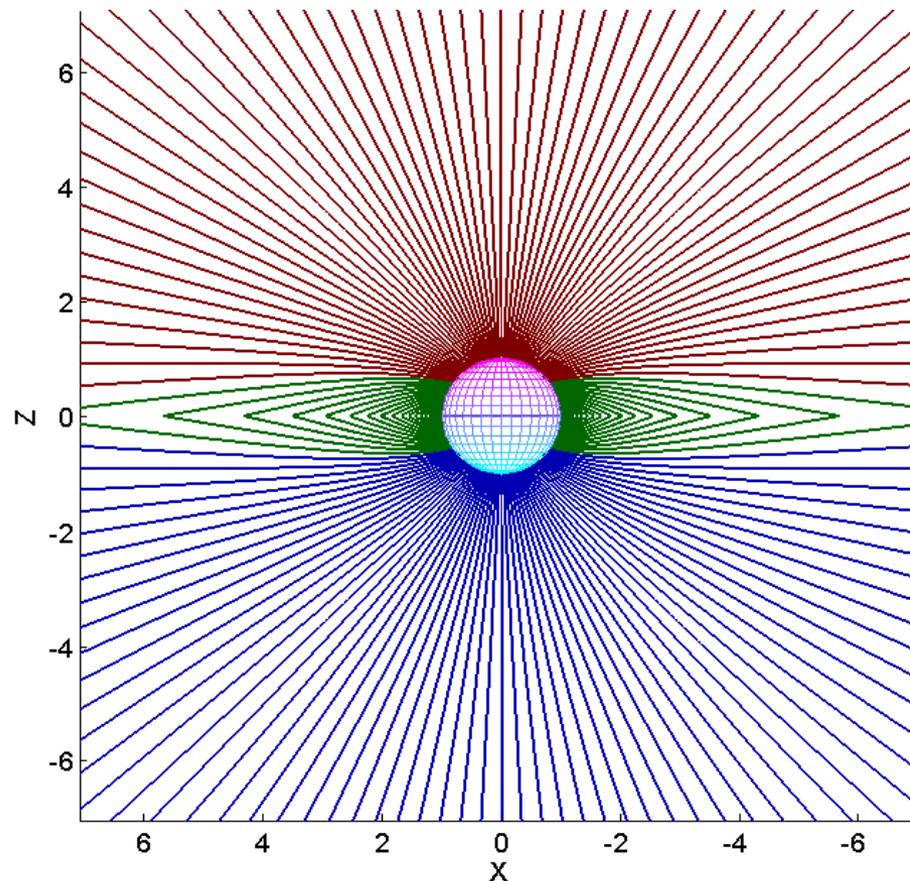
- Редкий случай очень больших градиентов в солнечном ветре и ММП на масштабе порядка поперечных размеров магнитосферы.
- Аналогичный случай в январе 1997 при скорости всего 400 км.с и в августе 1972.
- Предельно сильные неоднородности в солнечном ветре и ММП «рвут» внешнюю магнитосферу на части.

Область формирования солнечного ветра

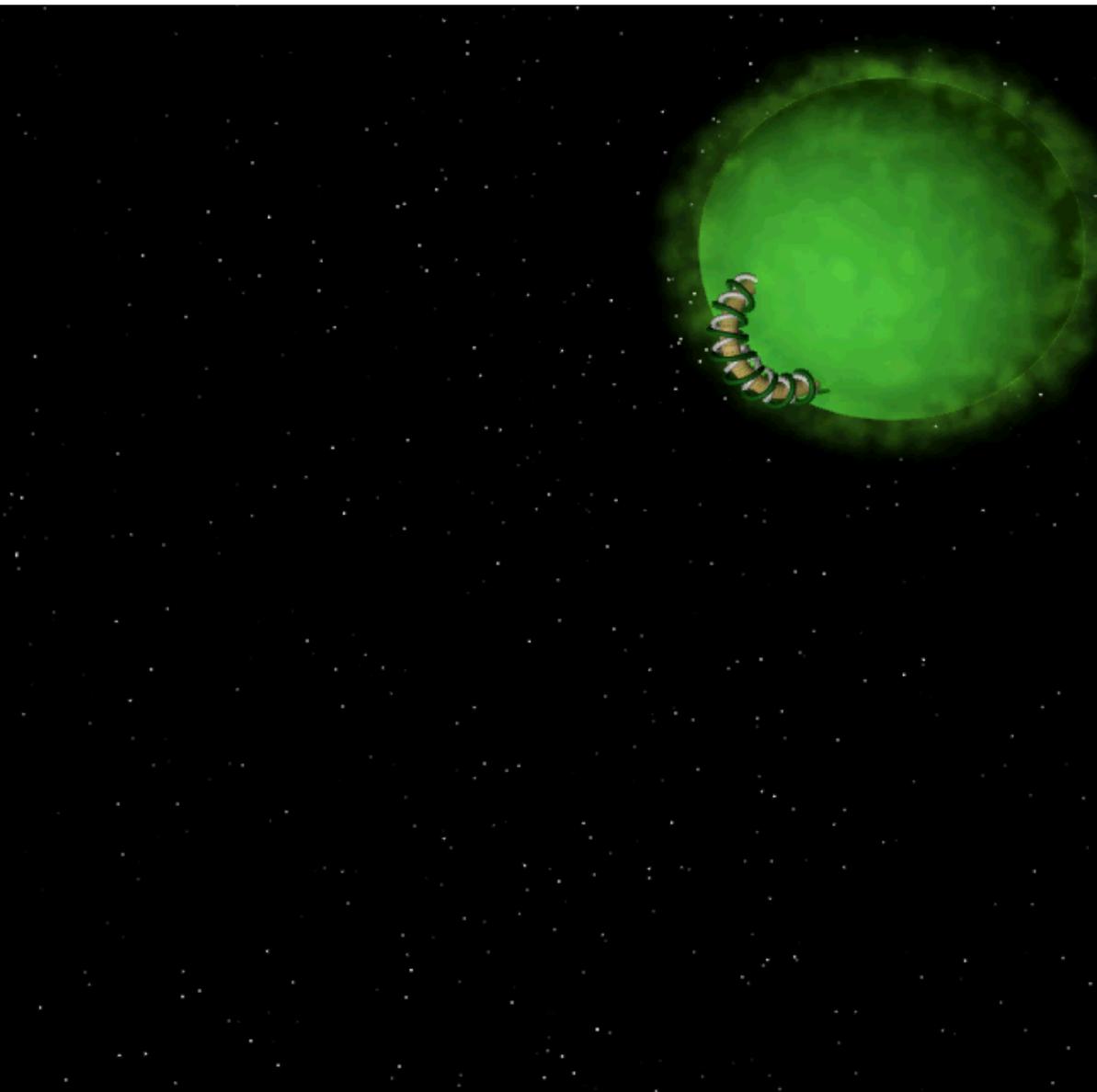
Magnetic field **also more simple**:
Radial magnetic field the same at all latitudes



Модель: Диполь + ТОНКИЙ ТОКОВЫЙ СЛОЙ



Модель петельного выброса



I.S. Veselovsky, and O.A. Panasenco, Coronal mass ejection and solar flare initiation processes without appreciable changes of the large-scale magnetic field topology, *Advances in Space Research*, Volume 37, Issue 7 , pp. 1305-1312, 2006. DOI: [10.1016/j.asr.2005.03.084](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.084)

Трехмерный вид



I.S. Veselovsky, and O.A. Panasenco, Coronal mass ejection and solar flare initiation processes without appreciable changes of the large-scale magnetic field topology, *Advances in Space Research*, Volume 37, Issue 7 , pp. 1305-1312, 2006. DOI: [10.1016/j.asr.2005.03.084](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.084)