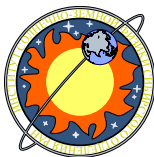


# Магнитная спиральность и ее роль в эруптивных процессах на Солнце

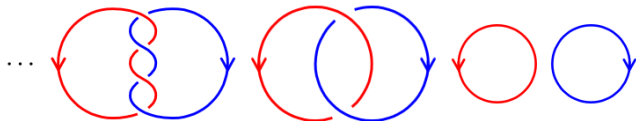
Сергей Анфиногентов <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН

Он-лайн семинар, 27 июня 2018



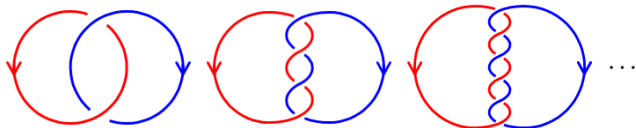
# Число зацепления



linking number  $-2$

linking number  $-1$

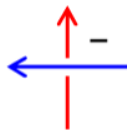
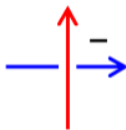
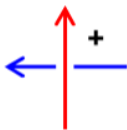
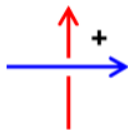
linking number  $0$



linking number  $1$

linking number  $2$

linking number  $3$



# Спиральность двух потоковых трубок

$$H = \pm(\Phi_1\Phi_2^1 + \Phi_2\Phi_1^2) = \pm 2\Phi_1\Phi_2$$

$$H = \Phi_1 \int_{S_1} \vec{B} \cdot d\vec{S} + \Phi_2 \int_{S_2} \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$H = \int_1 \Phi_1 \vec{A}^a \cdot d\vec{l} + \int_2 \Phi_2 \vec{A} \cdot d\vec{l}$$

$$H = \int_1 \vec{A} \cdot B_1 d\vec{l} \delta S_1 + \int_1 \vec{A} \cdot B_2 d\vec{l} \delta S_2$$

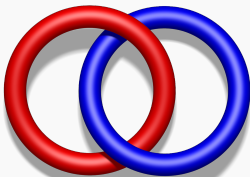
$$H = \int_{V_1} \vec{A} \cdot \vec{B} dV + \int_{V_1} \vec{A} \cdot \vec{B} dV = \int_V \vec{A} \cdot \vec{B} dV$$

---

$${}^a\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$$

<sup>1</sup>поток через первую трубку \* поток внутри первой трубки

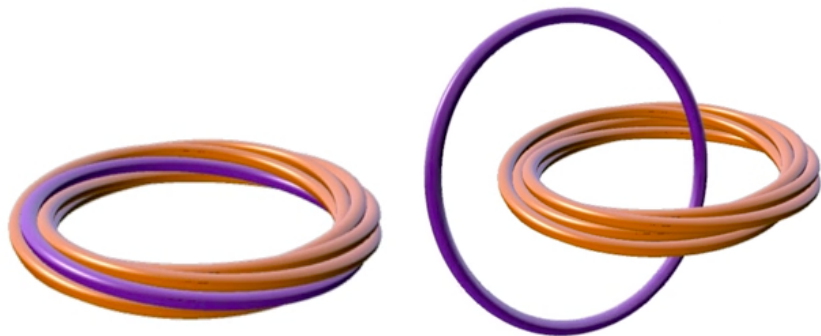
<sup>2</sup>поток через вторую трубку \* поток внутри второй трубки



# Связь между зацеплением и скрученностью

Спиральность магнитного жгута

$$H = \Phi^2$$



# Self и mutual спиральности

- Собственная (self) спиральность связана со скрученностью потоковых трубок и обусловлена их внутренней структурой
- Перекрестная (mutual) спиральность — спиральность обусловленная зацеплением разных потоковых трубок



$$H_m = 0$$



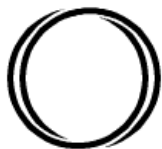
$$H_m = T\Phi^2$$



$$H_m = \pm 2\Phi_1\Phi_2$$

## Две формы собственной спиральности

$$H_{\text{self}} = (T + W)\Phi^2$$



Twist = -1, Writhe = 0.

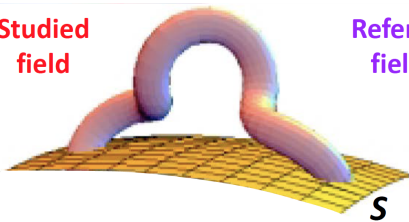


Twist = 0, Writhe = -1.

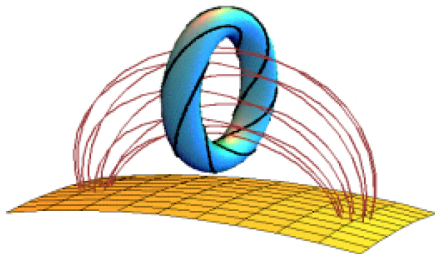
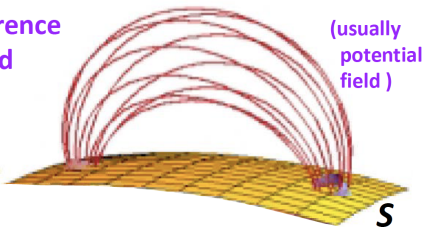
# Относительная магнитная спиральность

Поле = потенциальное поле + токнесущее поле

**Studied field**



**Reference field**



# Относительная магнитная спиральность

- 1 Собственная спиральность токонесущего поля

$$H_{\text{self}} = \int_V \vec{A}_{cl} \cdot \vec{B}_{cl} dV$$

- 2 Собственная спиральность потенциального поля не определена. Пренебрегаем ею.
- 3 Перекрёстная спиральность токонесущего и Потенциального полей

$$H_{\text{mutual}} = 2 \int_V \vec{A}_p \cdot \vec{B}_{cl} dV$$

$$\begin{aligned} H &= \int_V (\vec{A} - \vec{A}_p) \cdot (\vec{B} - \vec{B}_p) + 2\vec{A}_p \cdot (\vec{B} - \vec{B}_p) dV = \\ &= \int_V (\vec{A} + \vec{A}_p) \cdot (\vec{B} - \vec{B}_p) dV \end{aligned}$$



# Сохранение спиральности

- Спиральность сохраняется, если не изменяется топология магнитного поля.
  - ▶ Поточковые трубки магнитного поля не разрываются и не пересоединяются
- Магнитная спиральность сохраняется в идеальной МГД
- Магнитная спиральность приближённо сохраняется в резистивной МГД и при пересоединении
  - ▶ Подтверждено численным моделированием

# Поток магнитной спиральности

$$\frac{dH}{dt} = 2 \oint ((\vec{A}_p^3 \cdot \vec{v}^4) \vec{B} - (\vec{A}_p \cdot \vec{B}) \vec{v}) \cdot \hat{n} dS$$

- 1 слагаемое: скручивание потоковых трубок на границе объёма
- 2 слагаемое: перемещение потоковых трубок на границе объёма

---

<sup>3</sup>Векторный потенциал в калибровке Кулона

<sup>4</sup>Скорость движения плазмы

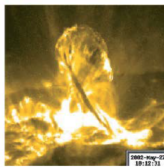
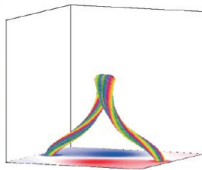
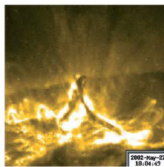
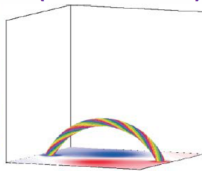
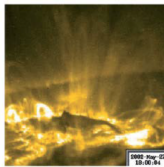
# Можно ли локализовать спиральность?

- Магнитная спиральность принципиально нелокальная и не аддитивная величина
- Спиральность нельзя локализовать вплоть до отдельной точки (воксела в пространстве)
- Физический смысл спиральности связан с магнитным потоком через замкнутые силовые линии
- Спиральность можно локализовать только вплоть до отдельной силовой линии или потоковой трубки
  - ▶ Спиральность силовой линии — это поток поля через поверхность ограниченную этой силовой линией

# Магнитная спиральность и КВМ

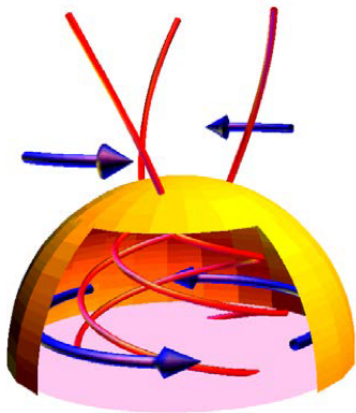
Трансформация закрутки (Twist) в искривление оси (Writhe) потоковой трубки

(Török et al. 05)



# Магнитная спиральность и глобальное магнитное поле

Поток спиральности их Солнца в Гелиосферу из-за его вращения



# Методы расчета магнитной спиральности

- 1 Прямое численное интегрирование
  - 1 NLFFF Экстраполяция
  - 2 Расчёт потенциального поля
  - 3 Определение векторных потенциалов
  - 4 Интегрирование
- 2 Интегрирование потока спиральности через фотосферу
  - 1 Серия магнитограмм, с момента всплытия активной области
  - 2 Расчет горизонтальных скоростей (LCT)
  - 3 Расчет потока спиральности и его интегрирование
- 3 По топологическим свойствам
  - 1 NLFFF экстраполяция
  - 2 Выделение отдельных потоковых трубок
  - 3 Расчёт закрутки поля и собственной спиральности в трубках

# Выводы

## Магнитная спиральность

- характеризует зацепленность (силовых линий) магнитного поля
- является сохраняющейся величиной в идеальной МГД (силовых линий) магнитного поля
- В отличие от магнитной энергии не переходит в другие формы (кинетическая, тепловая, излучение)
- Играет важную роль в эрупции волокна и формировании КВМ
- Играет важную роль в процессах генерации и эволюции магнитных полей внутри Солнца