



ПРОБЛЕМА ОТКРЫТОГО МАГНИТНОГО ПОТОКА СОЛНЦА И КВАНТ МАГНИТНОГО ПОТОКА

Струминский А.Б. astrum@cosmos.ru

Институт Космических Исследований РАН, Москва, Россия

Проблема «открытого магнитного потока» Солнца (OSF - open solar flux) [1] сводится к тому, что 1) наблюдательные карты магнитного поля недооценивают магнитный поток Солнца, или 2) значительная доля магнитного потока $\Phi_B = B_R \cdot S$, наблюдаемого в солнечном ветре (СВ) рождается вне корональных дыр, например, выносятся вместе с замкнутыми магнитными структурами СВ различного пространственного масштаба [2-3].

- [1] Linker J. A., et al., (2017), The Open Flux Problem, Astrophys. J., 848:70 (11pp)
[2] Raouafi N.E., et al. (2023) Magnetic Reconnection as the Driver of the Solar Wind, Astrophys. J. 945:28 (9pp)
[3] Lockwood, M., et al. (2017), Coronal and heliospheric magnetic flux circulation and its relation to open solar flux evolution, J. Geophys. Res. Space Phys., 122, 5870-5894

Квант магнитного потока

Энергия тока \mathcal{E} определяется через поток Φ и ток I : $\mathcal{E} = I\Phi/2c$
Если полное число электронов в кольце N , период их обращения T , то $I = Ne/T = Nev/2\pi r$ и $\mathcal{E} = Nev\Phi/4\pi rc = N(mv^2/2)$, откуда $\Phi = 2\pi mvr/e = 2\pi rc/e$, но $pr = nh/2\pi$, поэтому $\Phi = nhc/e$, или $\Phi_0 = nhc/2e$ в случае куперовских пар. Это с точностью до константы совпадает с магнитным зарядом (монополя Дирака) в системе СГС $g_0 = hc/4\pi e$

Квант магнитного потока и магнитный поток солнечного ветра

A floor in the total unsigned flux of $\sim 1.5 \times 10^{23}$ Mx was approached during the deep solar minimum of 2008-2009 [5]

[5] Cliver & Ling (2011) The Floor in the Solar Wind Magnetic Field Revisited Solar Phys 274:285-301

Сделаем оценки

$$\Phi = nhc/e, \Phi_0 = hc/e = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Гс} \cdot \text{см}^2, \Phi = \Phi_0 \cdot N = \Phi_0 \cdot n_s \cdot S$$

$$1.5 \cdot 10^{23} = 4 \cdot 10^{-7} \cdot n_s \cdot 4\pi R^2 \quad R = 2.5 \cdot 696340 \text{ км}$$

$$\Phi/(\Phi_0 \cdot S) = n_s = 984688 \text{ см}^{-2}$$

$$n_s = 9.8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3} - \text{оценка плотности в источнике СВ}$$

$$B = \Phi_0 n_s = 0.4 \text{ Гс} - \text{оценка магнитного поля на } R = 2.5 R_s.$$

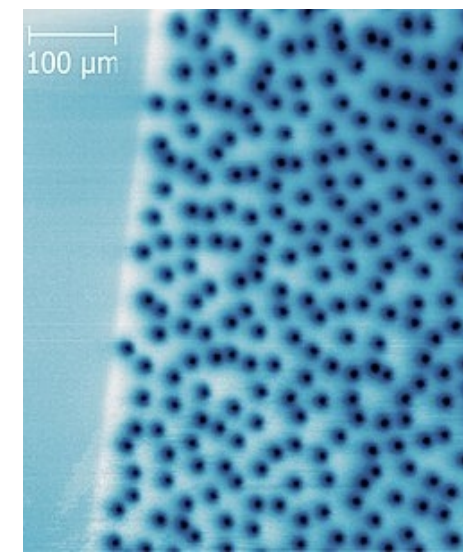
Квантование магнитного потока и магнитное поле в сверхпроводниках II рода

Магнитный поток Φ квантован. Так как, если бы $\Phi/2\pi$ не было бы целым, то нельзя было бы однозначно определить волновую функцию электрона и корректно сформулировать квантовую задачу [4]. Квант магнитного потока равен $\Phi_0 = hc/e = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Гс} \cdot \text{см}^2$ (при электронной проводимости), тогда $\Phi = \Phi_0 \cdot N = \Phi_0 \cdot n_s \cdot S = B \cdot S$, где n_s — поверхностная плотность квантов магнитного потока, S — площадь, а B — магнитное поле.

[4] Смилга А.В. Квантовая теория поля на обед // Изд. МЦНМО. Москва: 2019.

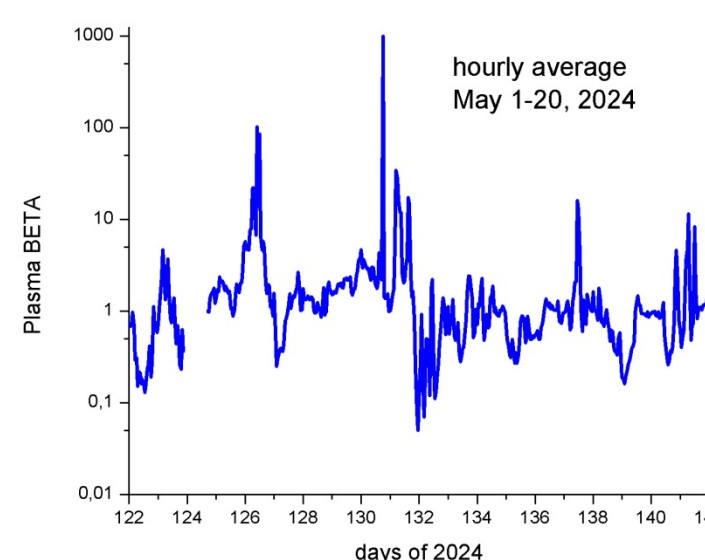
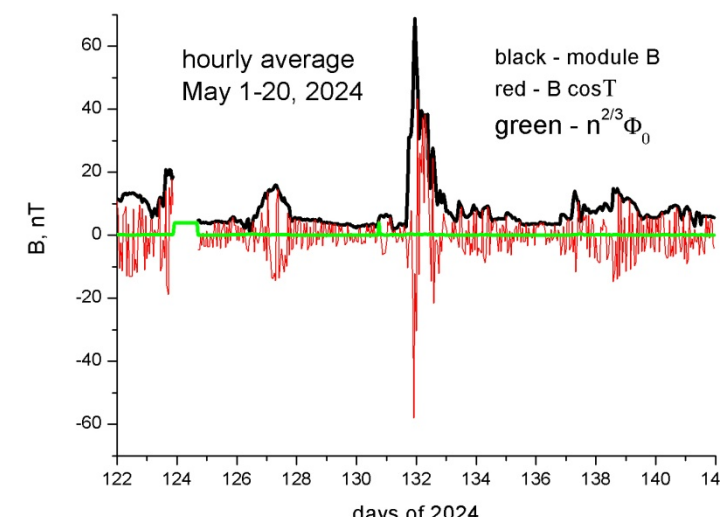
Магнитное поле проникает в сверхпроводники II рода в виде вихрей сверхпроводящего тока («вихрей Абрикосова»). Циркулирующий сверхпоток порождает магнитное поле, величина которого определяется квантом магнитного потока. Так как магнитное поле считается замороженным в плазму солнечной короны и СВ, то аналогия со сверхпроводниками представляется уместной.

Зная магнитный поток на какой-либо поверхности можно делать оценки необходимых величин n_s , S , и B или наоборот, по известным n_s и B на расстоянии R от предполагаемого источника, оценивать Φ при $S = 4\pi R^2$. Ниже сравниваются оценки магнитного потока, выносимого СВ, сделанные по наблюдаемым величинам n_s и B_R : $\Phi_1 = \Phi_0 \cdot n_s \cdot S$ и $\Phi_2 = B_R \cdot S$.



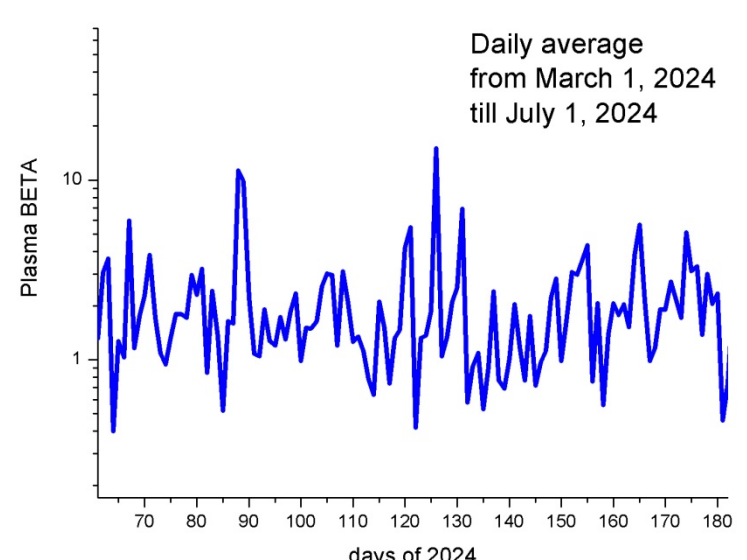
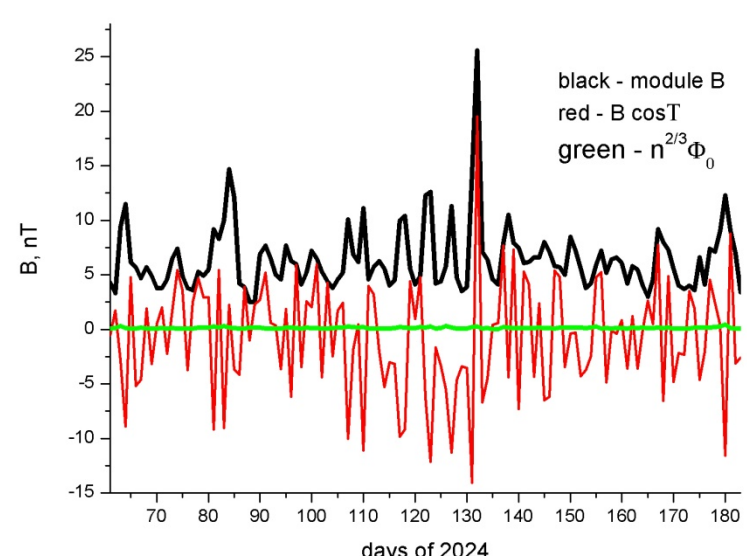
Изображение «вихрей Абрикосова» в пленке YBCO толщиной 200 нм, полученное с помощью сканирующей СКВИД-микроскопии

HOURLY, May 1-20, 2024



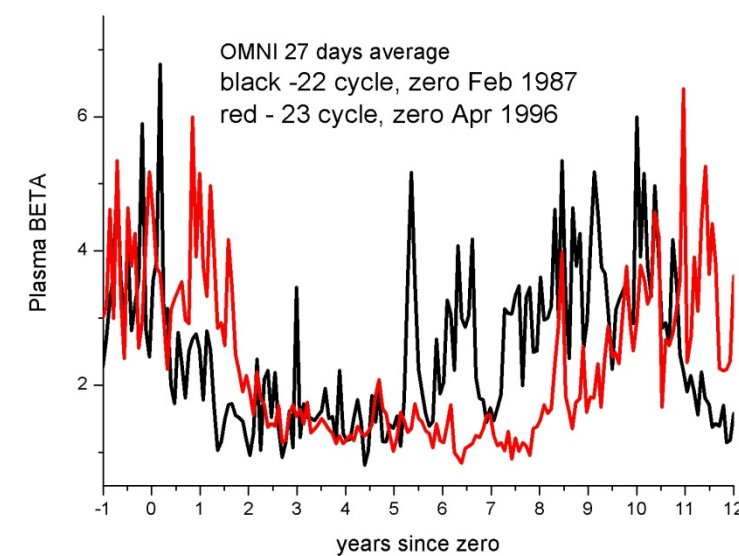
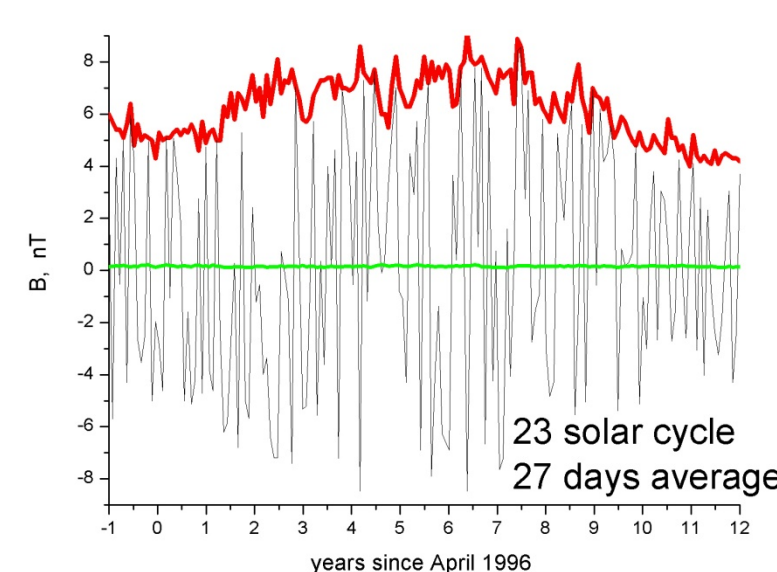
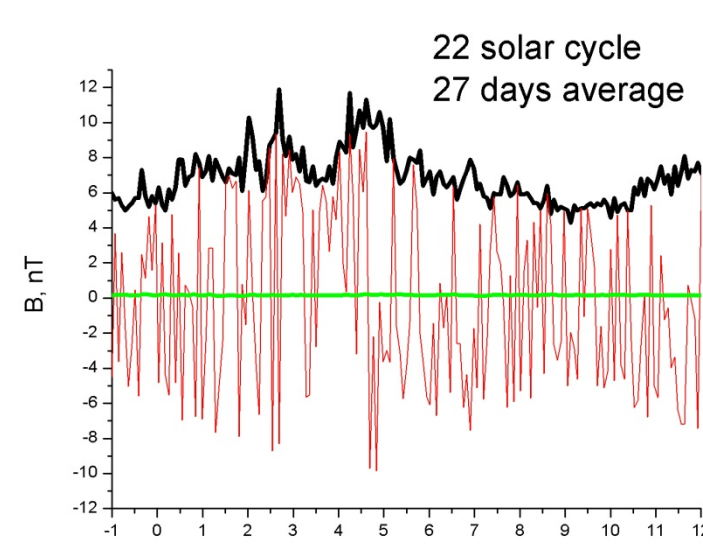
- Среднее знаковое магнитное поле солнечного ветра 1-20 мая 2024 года было минус 2.3 нТл,
- Это сопоставимо с оценкой "a floor of 2.8 nT" в [5].
- Оценка радиального магнитного поля по плотности 0.15 нТл.
- Следовательно, большую долю магнитного поля дают локальные электрические токи масштаба более часа!
- Плазменная бета, как больше 1 так и меньше 1, что показывает возможность непрерывный переход энергии теплового движения в магнитную, и наоборот.

DAILY, March 1 - July 1, 2024



- Среднее знаковое магнитное поле солнечного ветра с 1 марта по 31 июля 2024 было 0.71 нТл, т.е. магнитное поле меняет знак чаще 1 раза в сутки («switch back»?).
- Оценка радиального магнитного поля по плотности 0.14 нТл.
- Это значительно меньше оценки "a floor of 2.8 nT" в [5]. Большую долю магнитного поля дают локальные электрические токи масштаба менее 1 дня!
- При таком усреднении плазменная бета значительно реже меньше 1, т.е. энергия теплового движения чаще преобладает над магнитной.

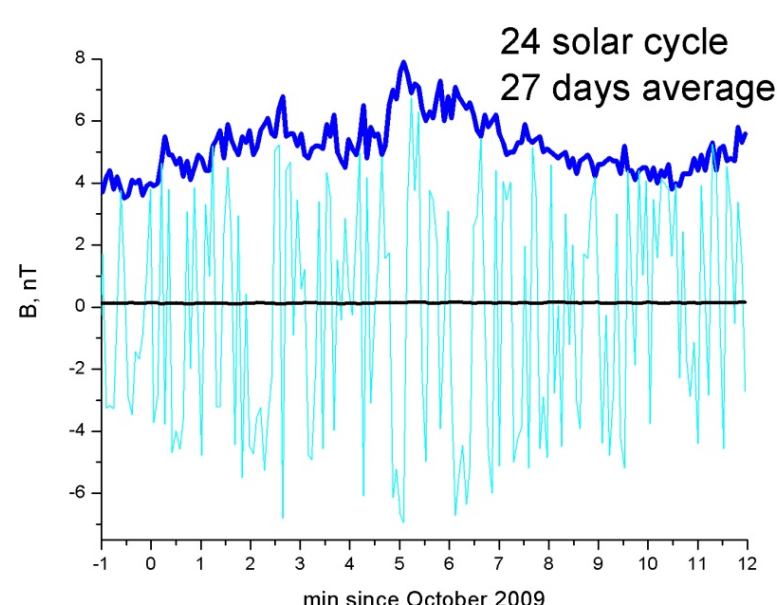
22-23 циклы



№	весь	0-4.5	4.5-7.5	>7.5 лет
22	+0.27	+0.37	-3E-4	+0.36
23	-0.1	-0.26	-0.06	-0.02
	0.13	0.14	0.12	0.12

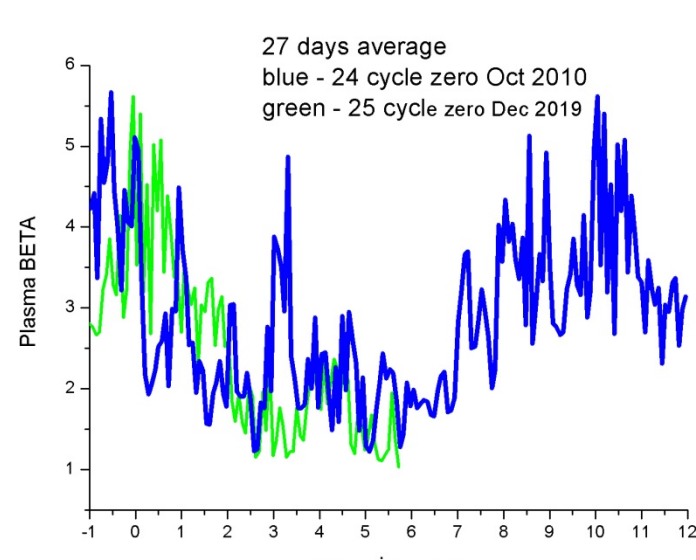
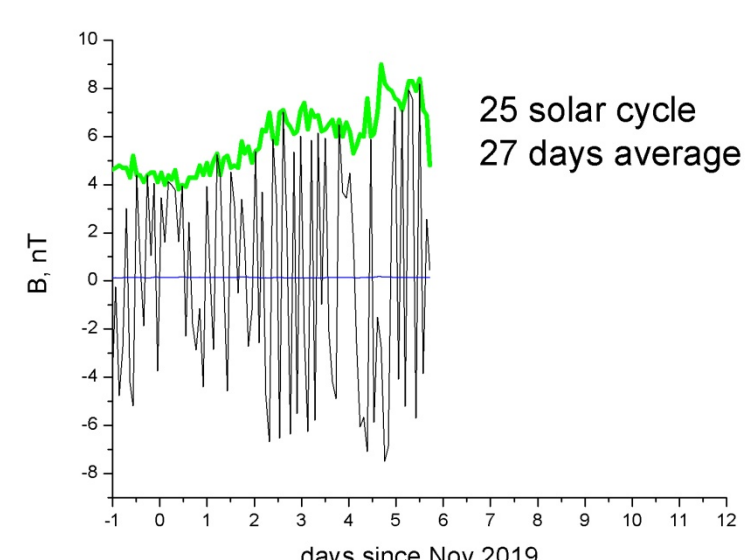
Среднее магнитное поле СВ [нТл], что значительно меньше оценки "a floor of 2.8 nT" в [5].

24-25 циклы OMNI



№	весь	0-4.5	4.5-7.5	>7.5 лет
24	+0.02	+0.30	-0.34	-0.05
	0.13	0.12	0.14	0.13
25	+0.06	+0.06		
	0.13	0.13		

Среднее магнитное поле СВ [нТл], что значительно меньше оценки "a floor of 2.8 nT" в [5].



Солнце в Солнечном, Санкт-Петербург

«... в плазме с низкой плотностью понятие замороженных силовых линий представляется сомнительным. Понятие замороженных силовых линий может быть полезно в физике Солнца, где мы имеем дело с плазмой высокой и средней плотностью, но может оказаться ошибочным в приложении к магнитосфере Земли. В применении к плазме межпланетного пространства этим понятием следует пользоваться с осторожностью.» [6]
[6] Альвен Г., Фельтхаммар К.- Г. Космическая электродинамика, «Мир», Москва 1967

ВЫВОДЫ

- «Проблема открытого магнитного потока Солнца» является следствием не аккуратного перехода от корональной плазмы к плазме солнечного ветра.
- Возможно согласовать потоки при правильном выборе высоты (плотности) на поверхности источника СВ.
- В наблюдаемый магнитный поток без знака большую долю должны давать локальные электрические токи масштаба менее 1 дня (~0.2 AU). Лучше говорить не о магнитном потоке без знака, а о плотности магнитной энергии в потоке СВ.

Автор выражает признательность В.А Ожередову и И.Ю. Григорьевой за полезную дискуссию и помощь в работе над постером.