

• 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, выносится 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 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 $\mathcal{E}=NeV\Phi/4\pi r c=N(mv^2/2)$, откуда $\Phi=2\pi mvr/e=2\pi r prc/e$, 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

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

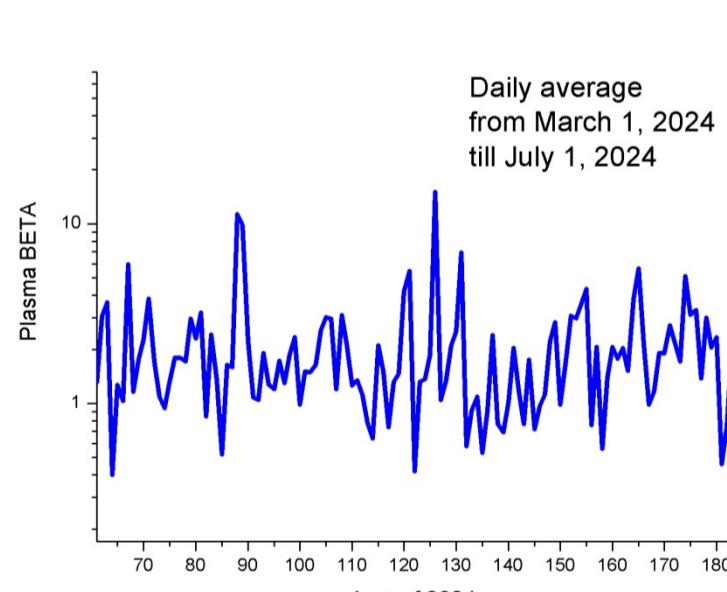
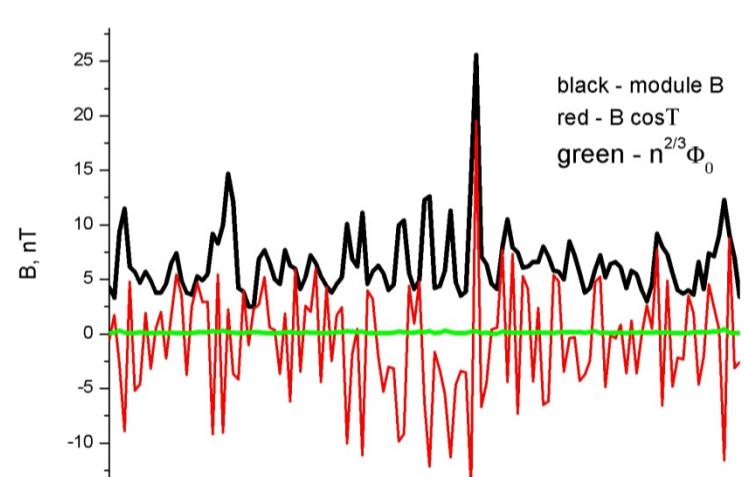
$$1.5 \cdot 10^{23} = 4 \cdot 10^{-7} \cdot n_s \cdot 4\pi R^2 \quad R=2.5 \cdot 696340 \text{ км}$$

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

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

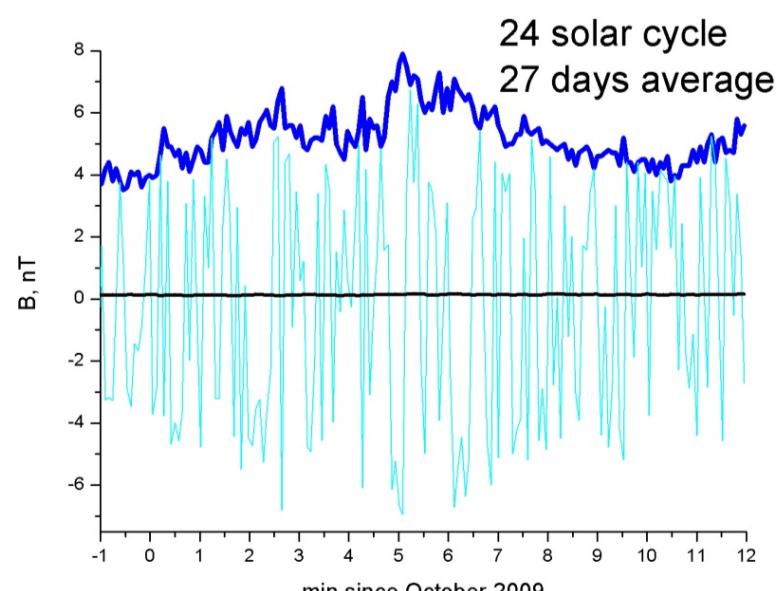
$B=\Phi_0 \cdot n_s=0.4 \text{ Гс}$ – оценка магнитного поля на $R=2.5R_s$.

• DAILY, March 1 - July 1, 2024



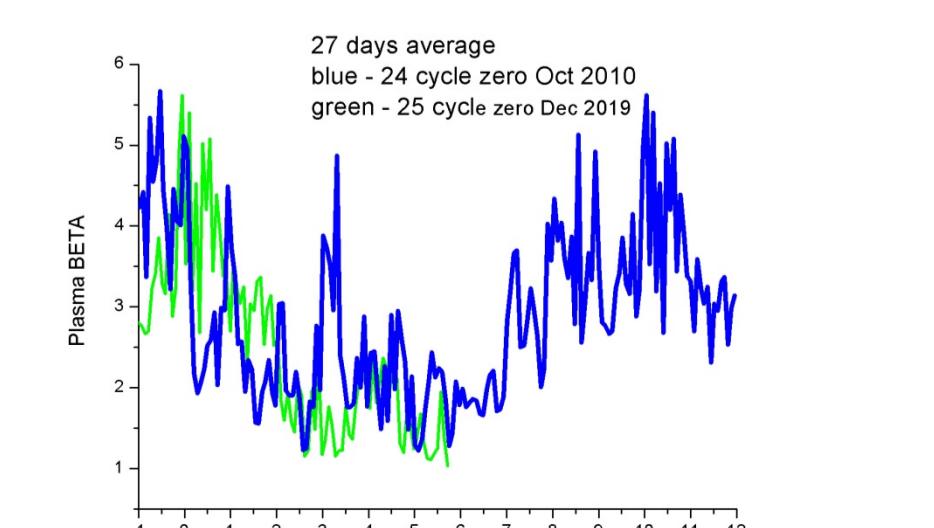
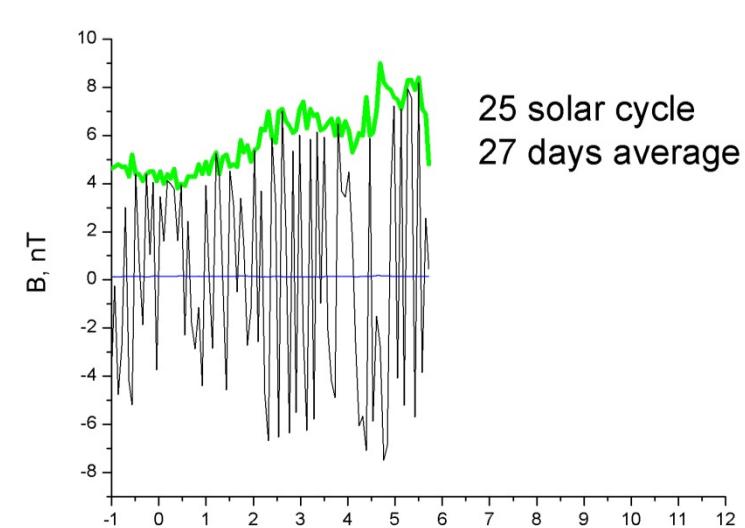
- Среднее знаковое магнитное поле солнечного ветра с 1 марта по 31 июля 2024 было 0.71 нТл, т.е. магнитное поле меняет знак чаще 1 раза в сутки («switch back»?).
- Оценка радиального магнитного поля по плотности 0.14 нТл.
- Это значительно меньше оценки «a floor of 2.8 nT» в [5].
- Большую долю магнитного 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.

24-25 циклы OMNI



| № | весы | 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 |

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



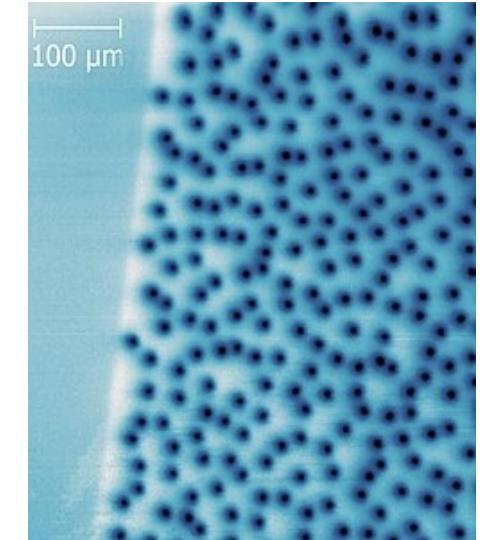
Квантование магнитного потока и магнитное поле в сверхпроводниках II рода

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 («вихрь Абрикосова»). Циркулирующий сверхпоток порождает магнитное поле, величина которого определяется квантом магнитного потока. Так как магнитное поле считается вмороженным в плазму солнечной короны и СВ, то аналогия со сверхпроводниками представляется уместной.

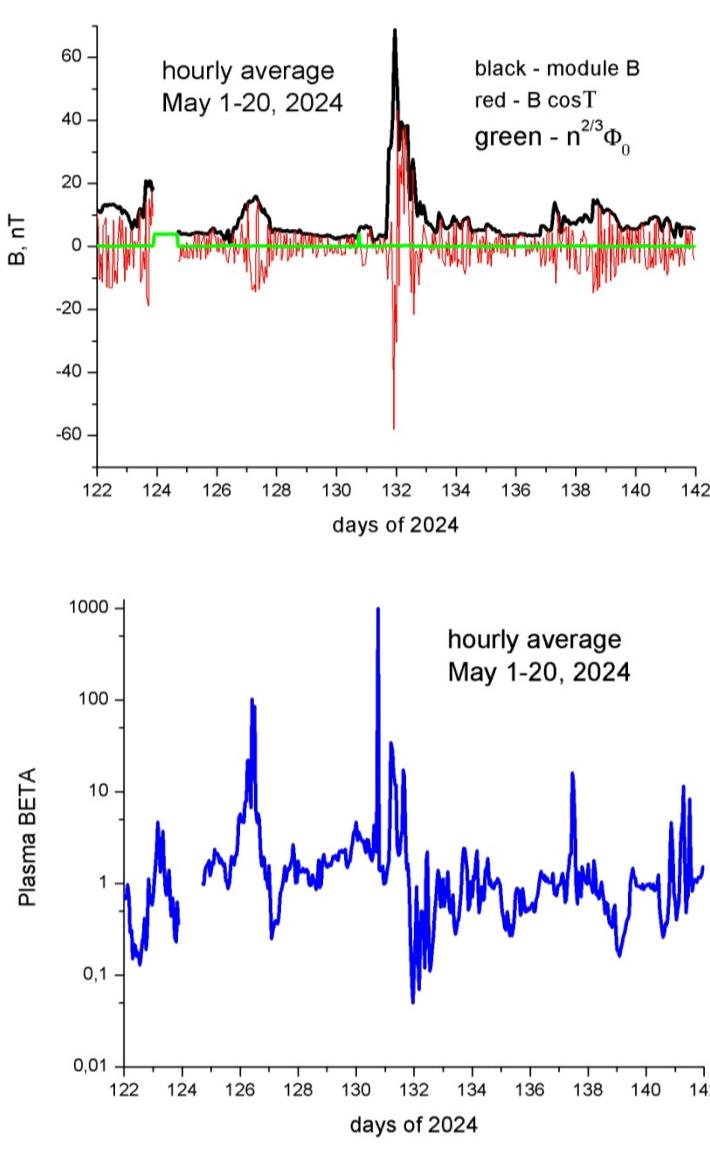
Зная магнитный поток на какой-либо поверхности можно делать оценки необходимых величин n_s , S и B или наоборот, по известным n_s и B на расстоянии R от предполагаемого источника, оценивать Φ при $S=4\pi R^2$. Ниже сравниваются оценки магнитного потока, выносимого СВ, сделанные по наблюдаемым величинам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



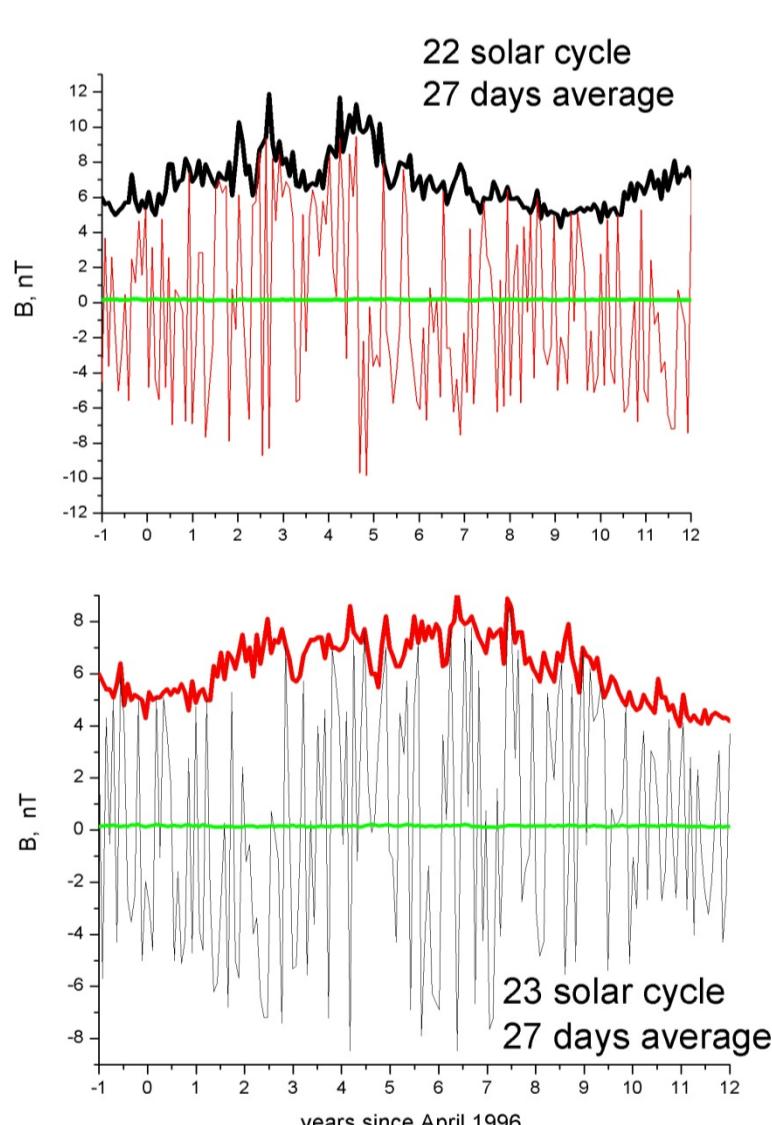
Изображение «вихрей Абрикосова» в пленке УВСО толщиной 200 нм, полученное с помощью сканирующей СКВИД-микроскопии

• 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.



• 22-23 циклы



| № | весы | 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 |

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

«... в плазме с низкой плотностью понятие вмороженных силовых линий представляется сомнительным. Понятие вмороженных 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., Фельхаммар 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.



Солнце в Солнечном, Санкт-Петербург

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