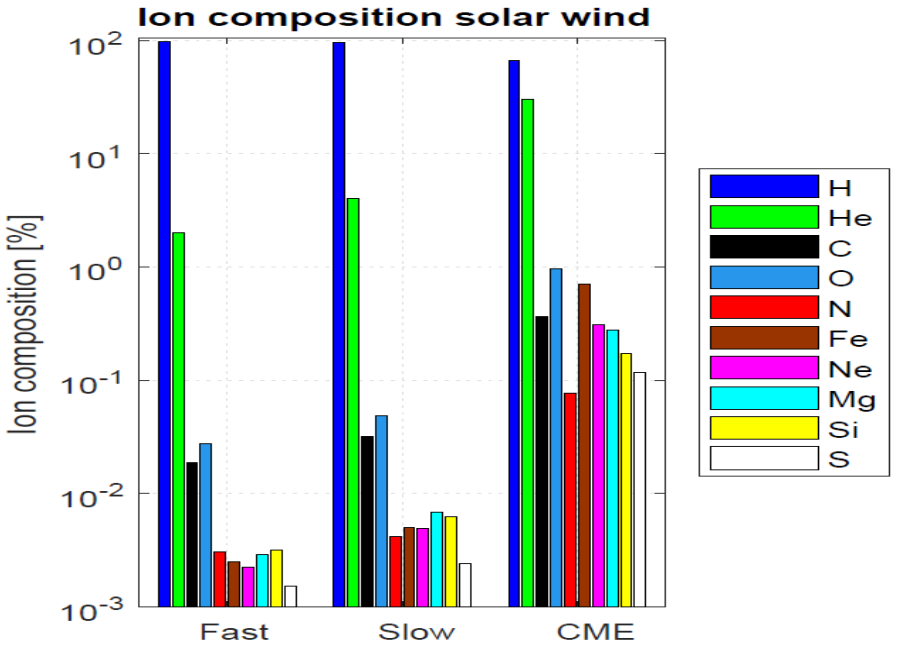
Симпозиум «Физические основы прогнозирования гелиогеофизических процессов и событий» («ПРОГНОЗ-2023»). Г. Троицк, ИЗМИРАН, 29 – 31 мая 2023 г.

ЗАРЯДОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ЕГО СВЯЗЬ С ПАРАМЕТРАМИ КОРОНАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ

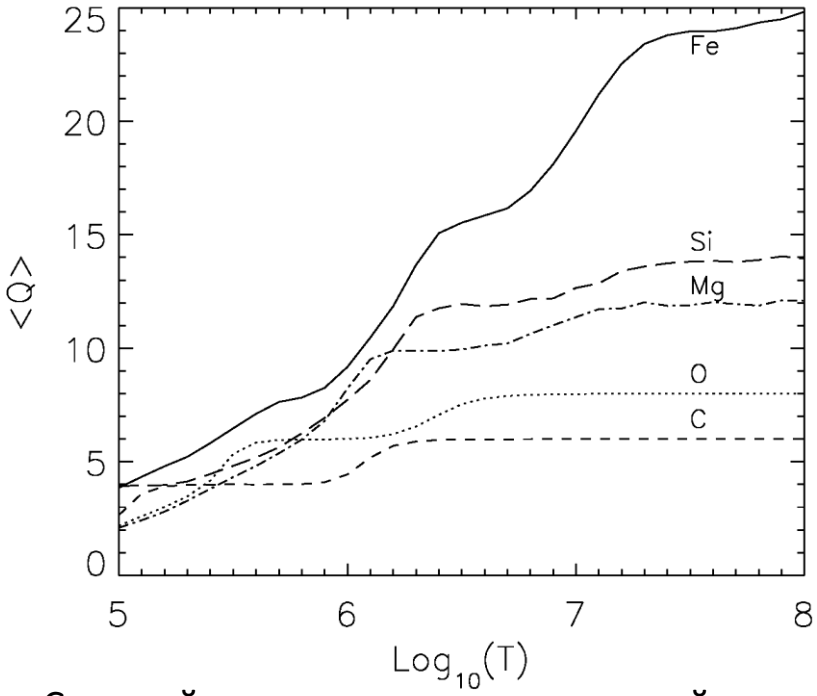
В.А. Слемзин, Ф.Ф. Горяев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия
slemzinva@lebedev.ru

Многозарядные ионы в солнечном ветре (СВ)



(SW_ions_angeo-38-919-2020)

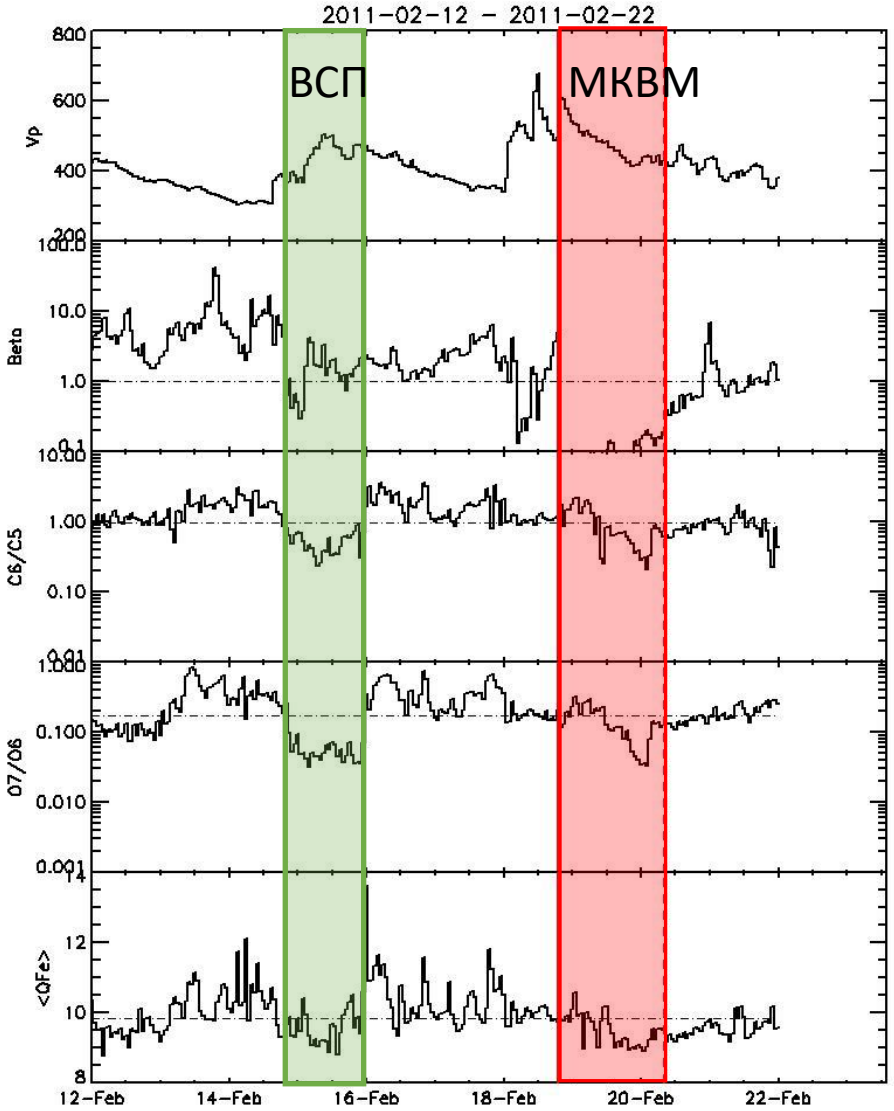


Средний заряд ионов в равновесной плазме

Обильные многозарядные ионы в СВ: C, O, N, S (FIP>10 eV), Fe, Ne, Mg, Si (FIP <10 eV)

Диапазоны чувствительности по температуре: C, O T=0.1 – 3 МК, Fe T=0.1 – 30 МК

Данные о распределениях ионов по заряду в СВ



Источники данных

Ulysses/SWICS (1990-2008**)** обилия и зарядовые распределения ионов S, C, O, Mg, Fe, Ne на разных гелиоширотах

ACE/SWICS1.1 (1997 - 21 августа 2011г.) средний заряд ионов C, O, Ne, Mg, Si, Fe, зарядовые отношения C^{6+}/C^{4+} ,C^{6+}/C^{5+} ,O^{7+}/O^{6+} , O^{7+}/O^{6+}, Fe/O, распределения ионов по заряду C, O, Mg, Si, Fe

ACE/SWICS 2.0 (после 23 августа 2011г.) только QFe и зарядовые отношения (после перекалибровки)

STEREO/PLASTIC: STA (2007-2023), **STB** (2007-октябрь 2014), C^{4+}/C^{5+}, O^{6+} , обилие Fe, зарядовое распределение Fe до19.07.2011

Уравнения баланса для моделирования зарядового распределения ионов плазмы СВ в короне

$$\frac{\partial N_Z}{\partial t} = N_e\left[N_{Z-1}C_{Z-1}(T_e) - N_Z\left(C_Z(T_e) + R_{Z-1}(T_e)\right) + N_{Z+1}R_Z(T_e)\right]$$

N_Z – обилия ионов с зарядами Z;
N_e – электронная плотность;
T_e – электронная температура;
C_Z – скорость ионизации z->z+1
R_Z – скорость рекомбинации для перехода $N_{Z+1} \rightarrow N_Z$;
V – скорость потока плазмы СВ

Характерные времена

$\tau_{ir} = 1/(C_z + R_{z-1}) \cdot Ne$ – время ионизации/рекомбинации иона с зарядом Z

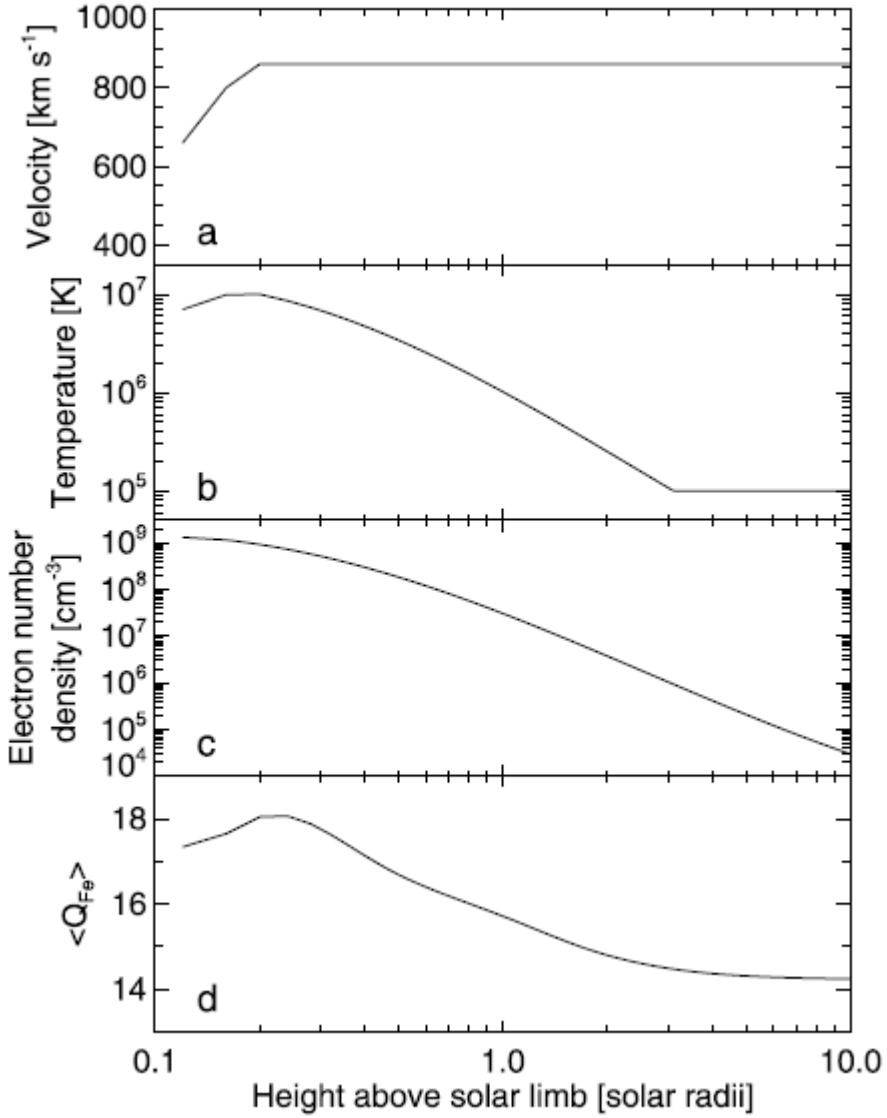
$\tau_{exp} = Ne/(V \cdot dNe/dr)$ – время расширения плазмы СВ

$\tau_{ir} << \tau_{exp}$ - условие равновесия ионизации/рекомбинации;
$\tau_{ir} >> \tau_{exp}$ - условие «замораживания», $\tau_{ir} \sim 10^5 - 10^6$ с

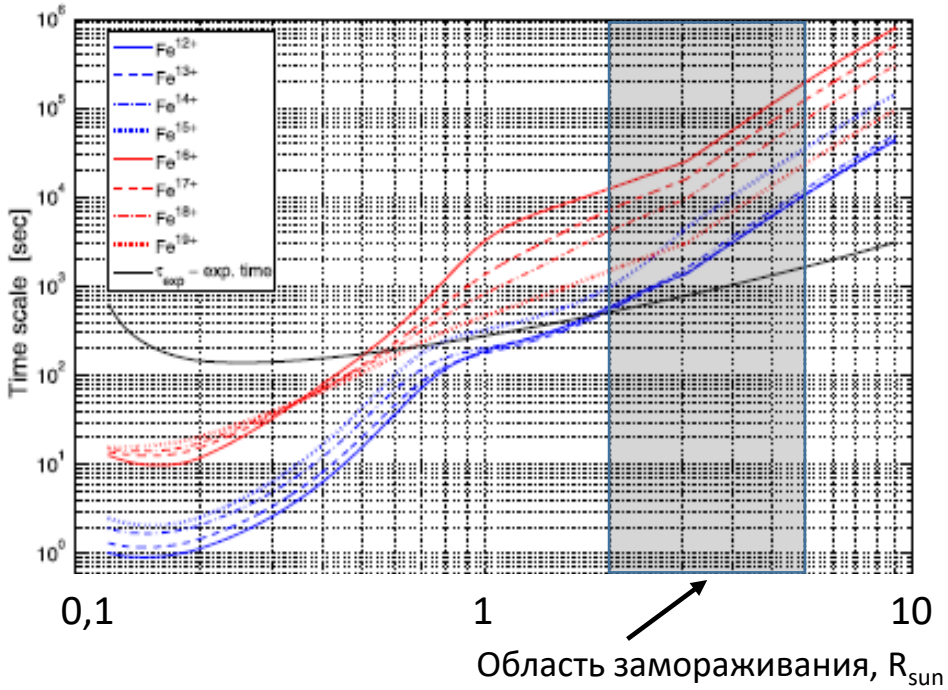
Высота «замораживания» ионов: C, O - R=1-2 R_{Sun} , Fe R=4 – 5 R_{Sun}

Расчет зарядового распределения ионов Fe в МКВМ 24.02.2011

Исходные данные

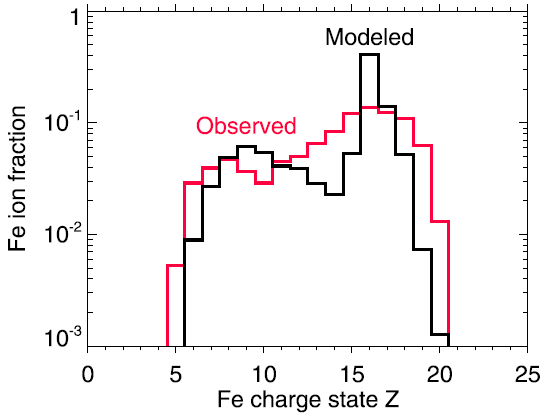


Расчет времени рекомбинации ионов Fe в короне



Grechnev et al. Sol. Phys. 2019.

Би-модальное зарядовое распределение ионов Fe в МКВМ связано с ранней заморозкой ионов Fe с Z >12 при большей температуре

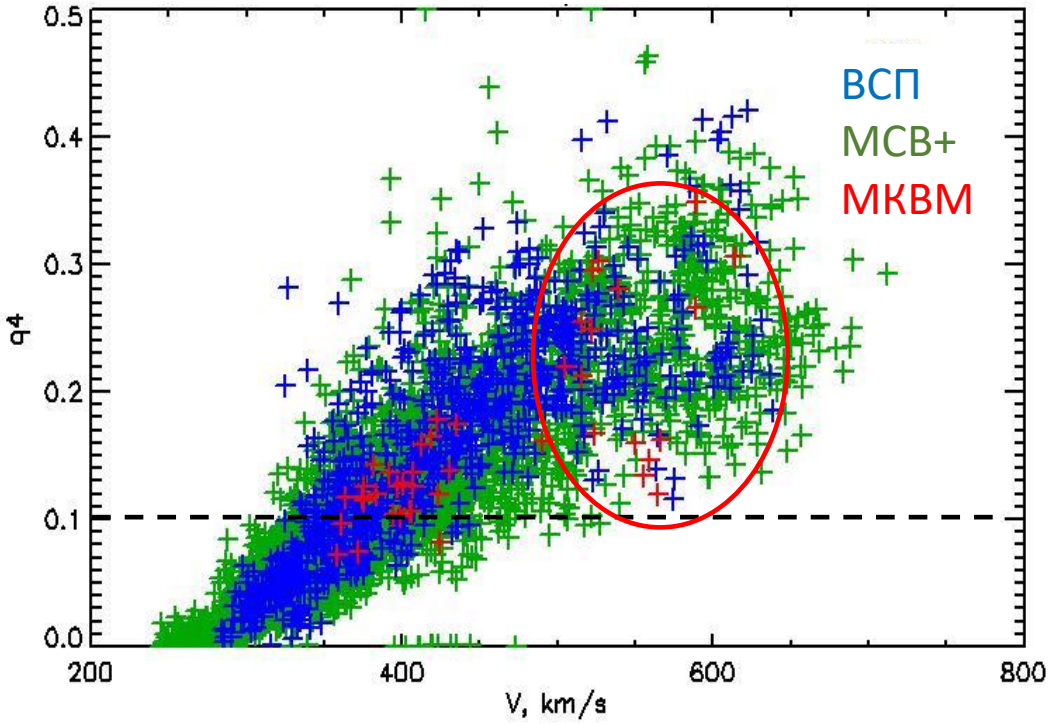


Параметры распределения ионов Fe по заряду q4, q8, q12

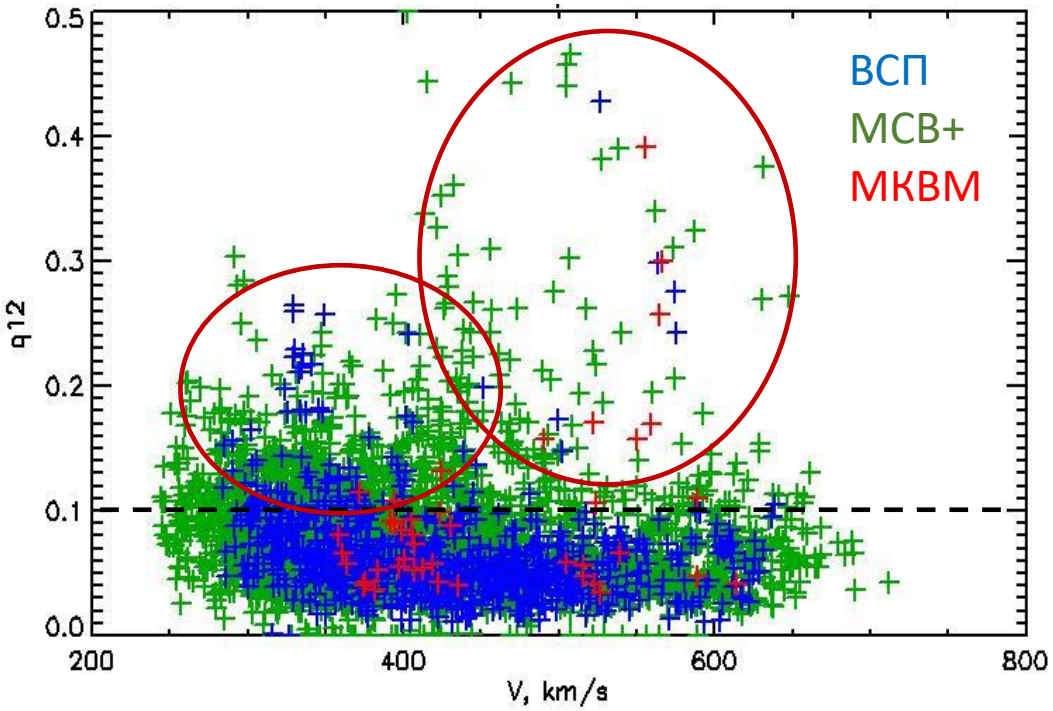
$$q4 = \frac{\sum_{0\le Z\le 7} n_z}{\sum_{0\le Z\le 20} n_z},\ q8 = \frac{\sum_{8\le Z\le 11} n_z}{\sum_{0\le Z\le 20} n_z},\ q12 = \frac{\sum_{12\le Z\le 20} n_z}{\sum_{0\le Z\le 20} n_z},\ q4+q8+q12 = 1\,,$$

STEREO-A/PLASTIC, 2010

q4 – холодные ионы



q12 – горячие ионы



Линейный рост q4 со скоростью – соответствует зависимости T ~ $1/V^{\alpha}$

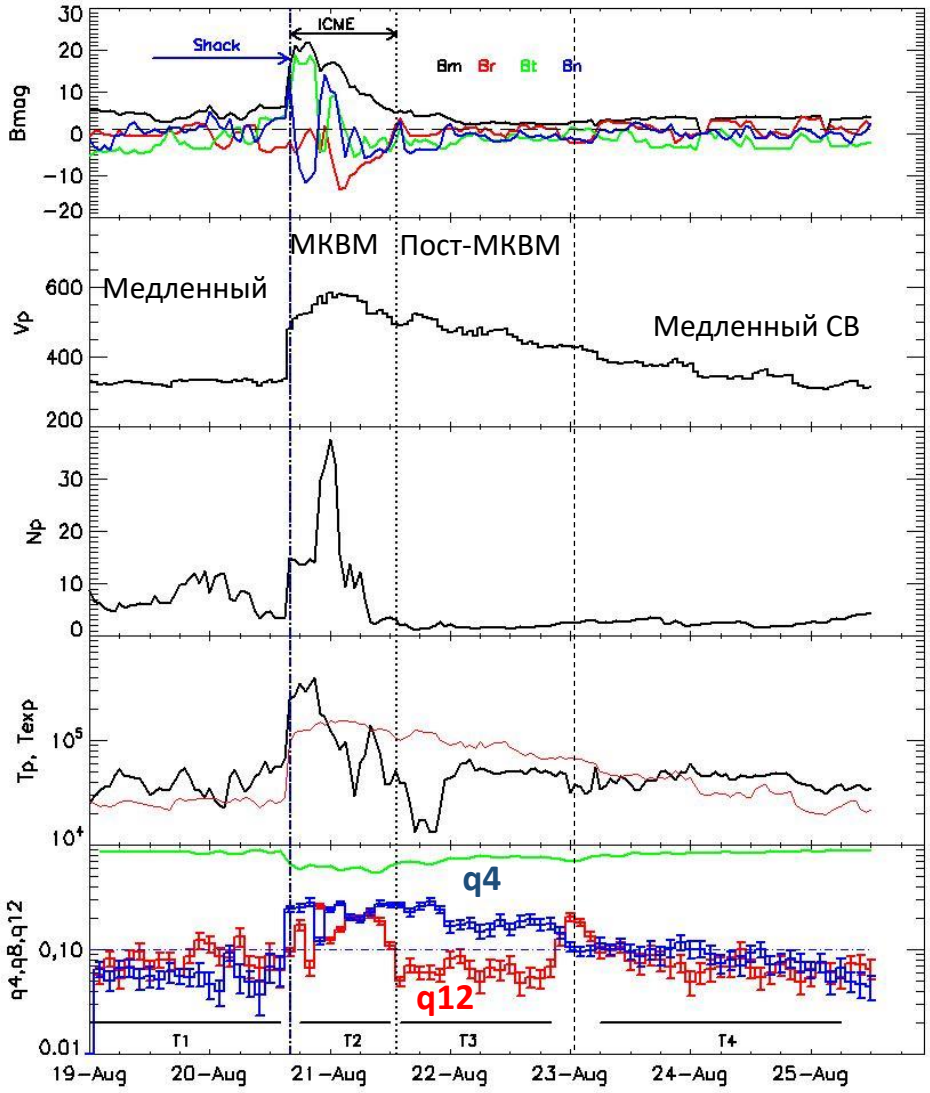
Аномалии: по q4 – быстрые МКВМ с большим содержанием холодных ионов,

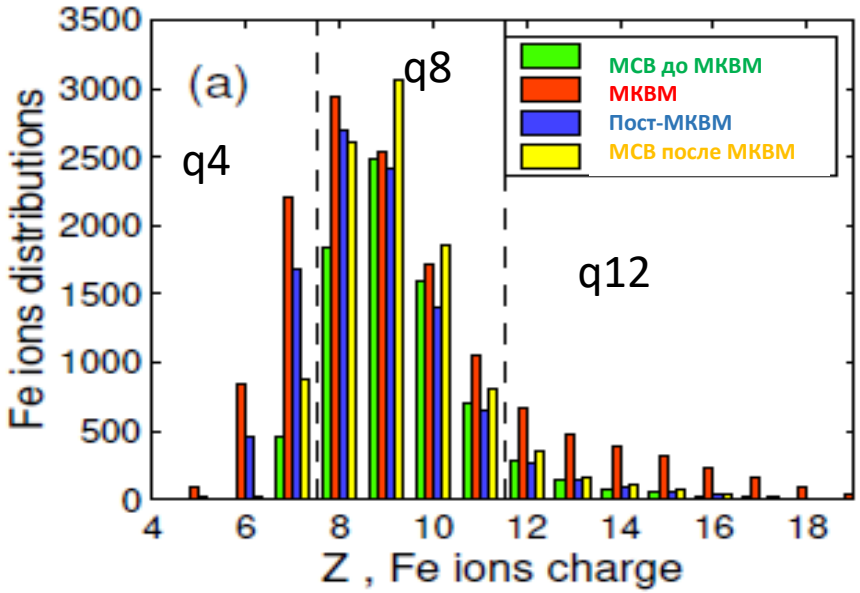
по q12 – наличие горячих ионов в ВСП (при малых скоростях) и МСВ при всех скоростях (слабые МКВМ?)

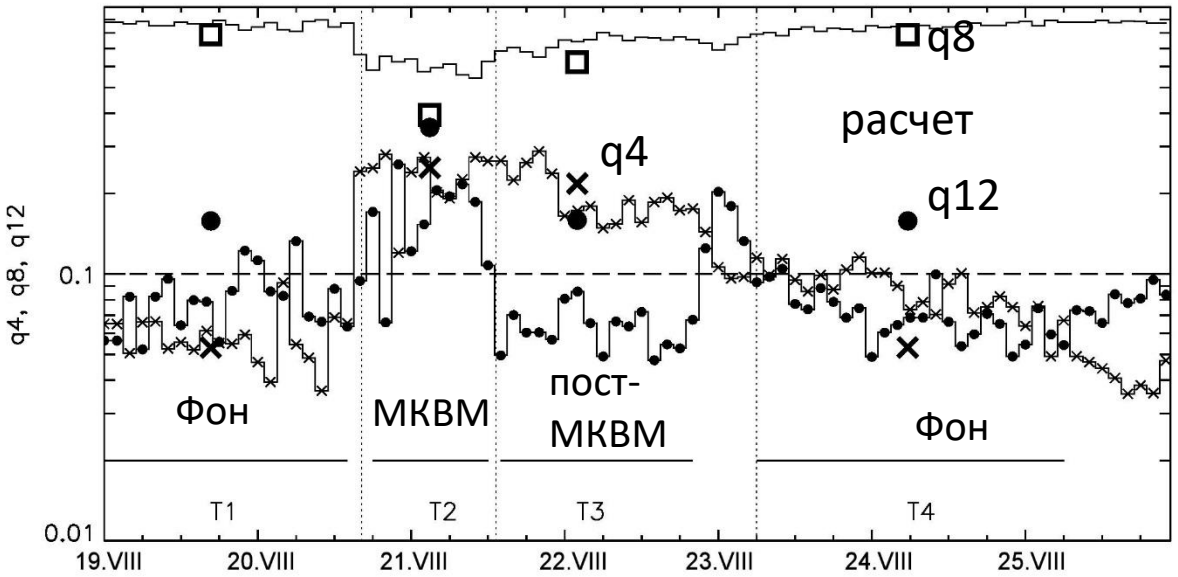
Профили параметров q4 – q8 - q12 в СВ 19-25 .08.2010 г.

Slemzin V.A.et al. ApJ. 2022

STEREO-A/PLASTIC/IMPACT



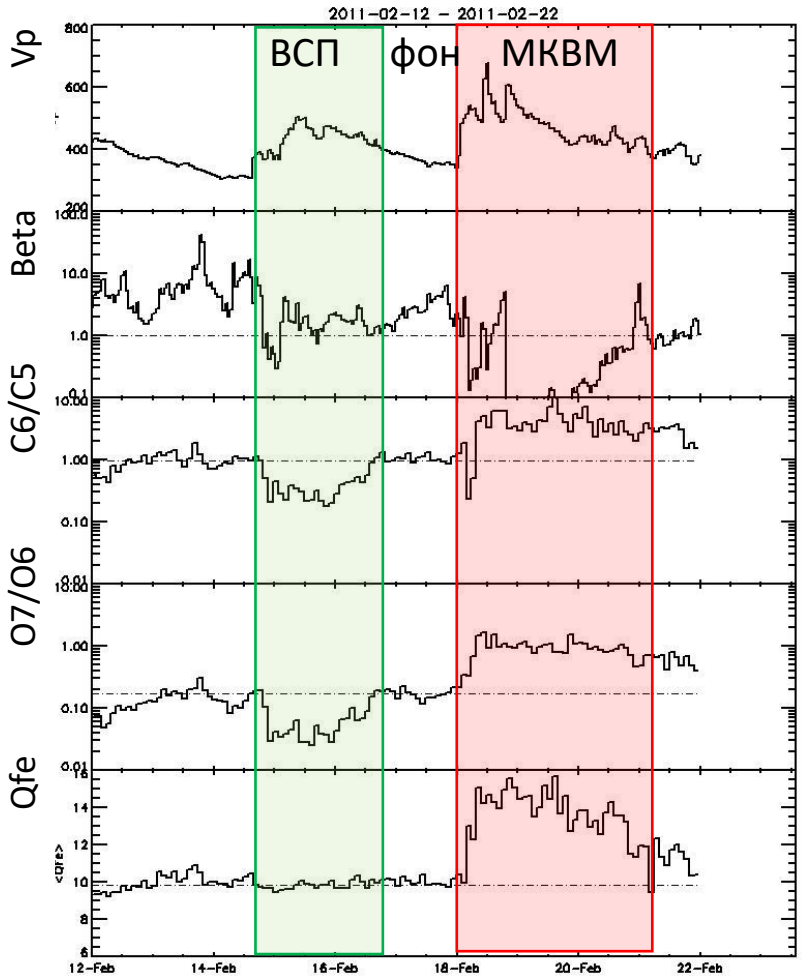




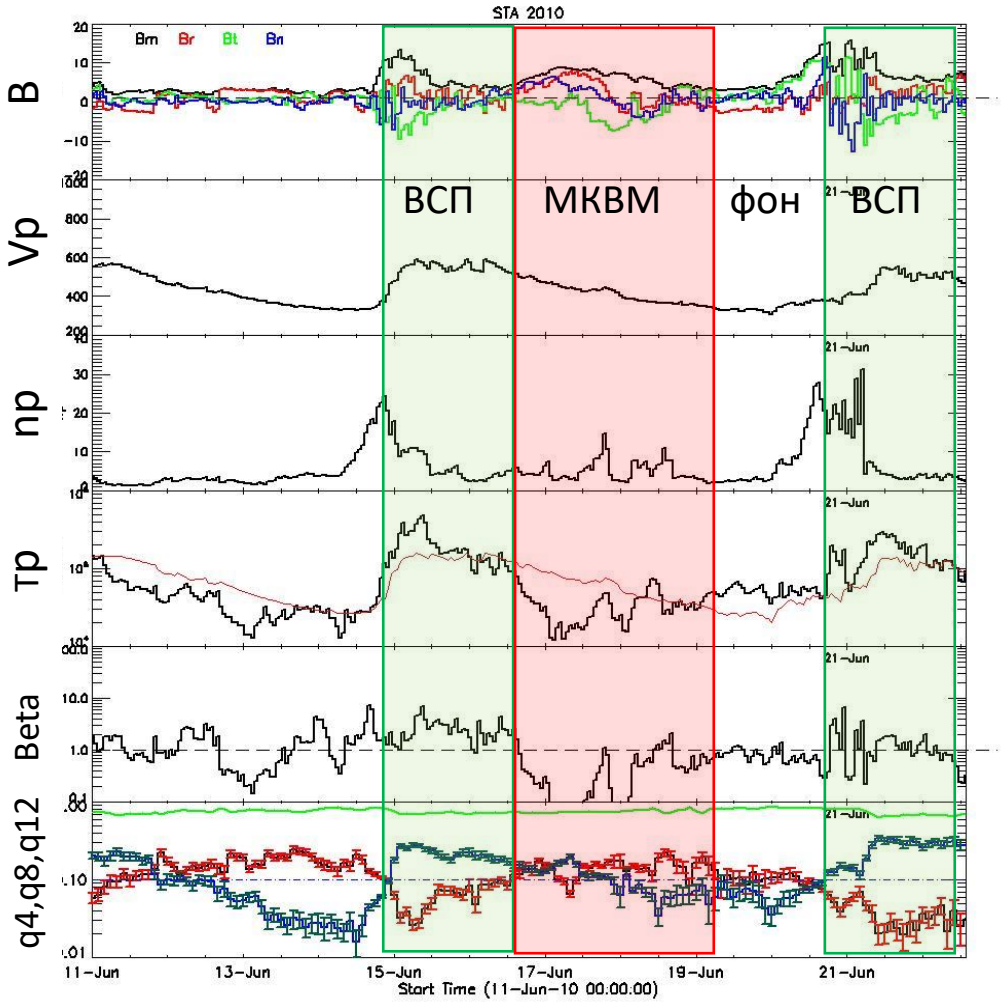
q4 - кресты –, q12 - кружки, q8 - квадраты

Зарядовые распределения ионов в комплексных структурах взаимодействующих потоков СВ в гелиосфере

Нет взаимодействия



Взаимодействие ВСП-МКВМ



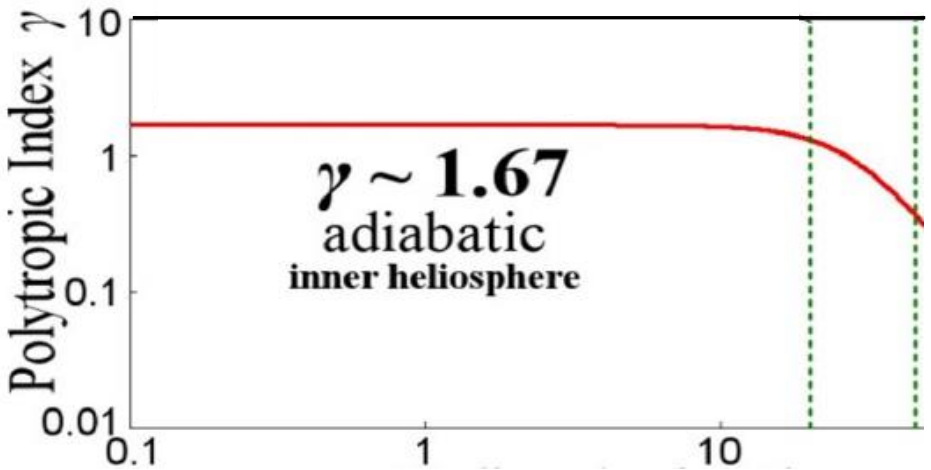
Оценка потока энергии нагрева СВ в короне

Тепловой режим плазмы СВ описывается с помощью уравнения политропы: $pV^{\Upsilon}=const$

В ближней гелиосфере (0,1 – 10 AU) $\Upsilon_a=5/3$ (адиабата),

в дальней (10- 200 AU) $\Upsilon \longrightarrow 0$

(Livadiotis, 2016, 2021; Elliott et al. 2019; Fahr & Chashei 2002).



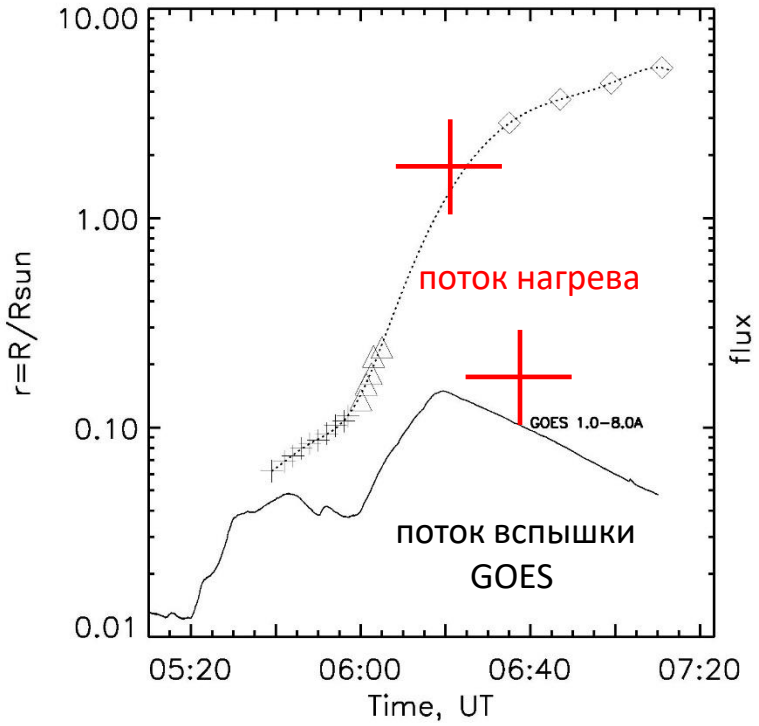
В короне $T \sim n_e^{\Upsilon-1}$, Υ определяется по зависимости $logT=(1-\gamma)\cdot logn+C$

Поток энергии нагрева $\varepsilon = \frac{\Delta U}{\Delta t} = c\frac{\Delta T}{\Delta t}$, теплоемкость $c = \frac{3}{2}\frac{\gamma-\gamma_a}{\gamma-1}n_e \cdot k$, $\varepsilon > 0$ при $0 < \Upsilon < \Upsilon_a$

Температуру на высотах замерзания ионов C, O и Fe можно определить с помощью совмещения модельных зарядовых распределений с измеренными, плотность - из измерений или по стандартной модели $n \sim \frac{1}{R^3}$, Δt - по скорости движения КВМ

Пример: расчет для КВМ 4-7 августа 2010 г.

h, $R_\odot$	Оценка температуры	T(h), МК	$N_e(h)$, $см^{-3}$	V(h), км/с	<ϒ>	<ε>, $эрг/см^{-3}с$
0.25	МГД	4	$1.5\cdot10^9$	300	---	---
1.5	O^{7+}/O^{6+}	1.4	$1\cdot10^8$	800	1.35	$2\cdot10^{-5}$
4.0	<Qfe>	2.1	$5\cdot10^6$	900	0.75	$1.4\cdot10^{-6}$



Заключение

Анализ зарядового распределения многозарядных ионов и его моделирование дают важную информацию об источниках, формировании и эволюции солнечного ветра:

- **уточнение идентификации типа потока**, по временным профилям холодных и горячих компонент распределения зарядов в СВ, особенно если другие признаки отсутствуют или неясно выражены;
- **уточнение типов источников СВ** в короне Солнца и их классификации;
- **данные о термодинамике СВ в короне** при разработке и тестировании моделей формирования СВ;
- **данные для анализа комплексных структур**, возникающих в гелиосфере при взаимодействии нескольких потоков СВ и проверки разрабатываемых моделей такого взаимодействия