Взаимосвязь минутных вариаций плотности и скорости солнечного ветра на 1 а.е.

Д.А. Парунакян, Е.С. Беленькая
(НИИЯФ МГУ)

Физика плазмы в Солнечной системе, ИКИ *2014-02-11*

Солнечный ветер

СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР - бимодальный поток электрически нейтральной плазмы, истекающей из солнечной короны. Различают быстрый и медленный СВ [Parker, 1958].

В основном солнечный ветер состоит из протонов и электронов; типичное содержание альфа-частиц от 2% до 4.5% [Aellig, 2001].

- Средняя плотность $\langle n \rangle = 7 см^{-3}$
- Средняя скорость $\langle v \rangle = 400$км/с

  [Модель космоса (2007), т.1, с.319-320]

Солнечный ветер

- Источниками рекуррентного быстрого СВ являются корональные дыры [Krieger, 1973]; спорадические потоки быстрого СВ связывают с корональными выбросами массы [Gosling, 1993].

- Количество корональных выбросов массы достигает своего пика в максимуме СА [Webb, Howard, 1994].

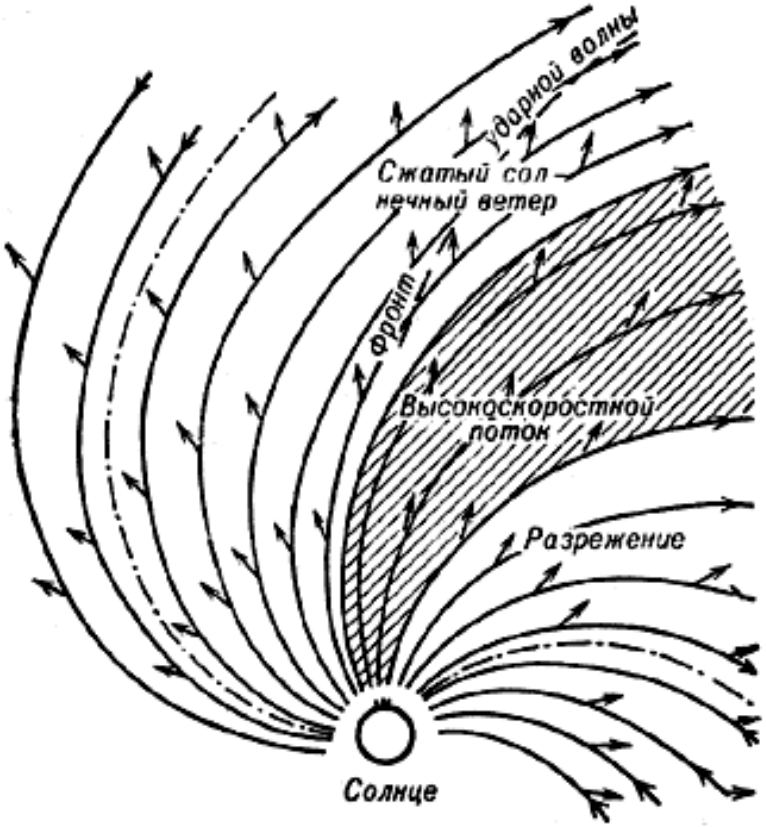
- Наибольшая активность корональных дыр приходится на спадающую фазу цикла СА [Bravo, 1997].

Свойства солнечного ветра

- Солнечный ветер в экваторе на 1 а.е. распространяется со сверхзвуковой и сверхальвеновской скоростью [Hundhausen, 1968].

- Ускорение медленного СВ продолжается по крайней мере до гелиоцентрических расстояний $20R_{\odot}$ [Tappin et al., 1999], быстрого - до $10R_{\odot}$ [Esser et al., 1999].

Ударные волны и разрывы в СВ



Изображение с сайта astronet.ru

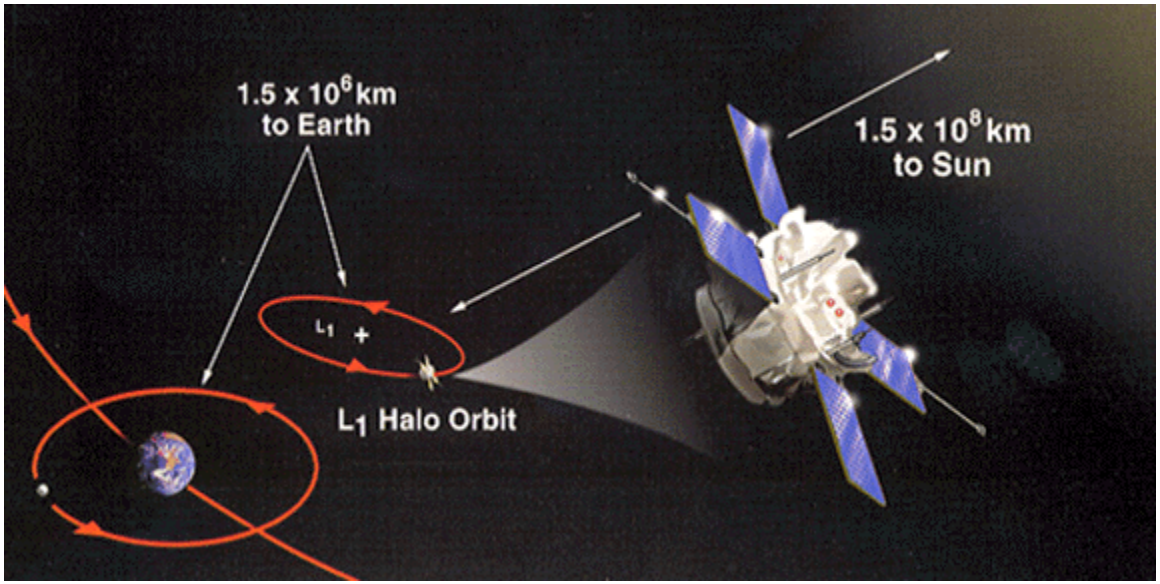
МГД-разрывы в солнечном ветре

- Тангенциальный разрыв: скачок плотности при непрерывном полном давлении и нормальной скорости. Поток вещества через плоскость разрыва отсутствует.

- Вращательный разрыв: поворот вектора магнитного поля, скачок тангенциальной компоненты скорости при непрерывной плотности и давлении.

- Ударная волна: резкий скачок давления, плотности, температуры и скорости.

Источник данных и обработка



Космический аппарат ACE

Источник данных и обработка

- Полная база данных за 1998-2012гг.
- 64-секундные усреднения по прибору SWEPAM.
- Средние погрешности измерения скорости ~2.25%, плотности ~ 15% [McComas et al., 1998].
- Абсолютные погрешности производных для медианных значений $v \approx 470$км/с, $n \approx 6$см$^{-3}$:

  $dv/dt \approx 0.33$км/с^2

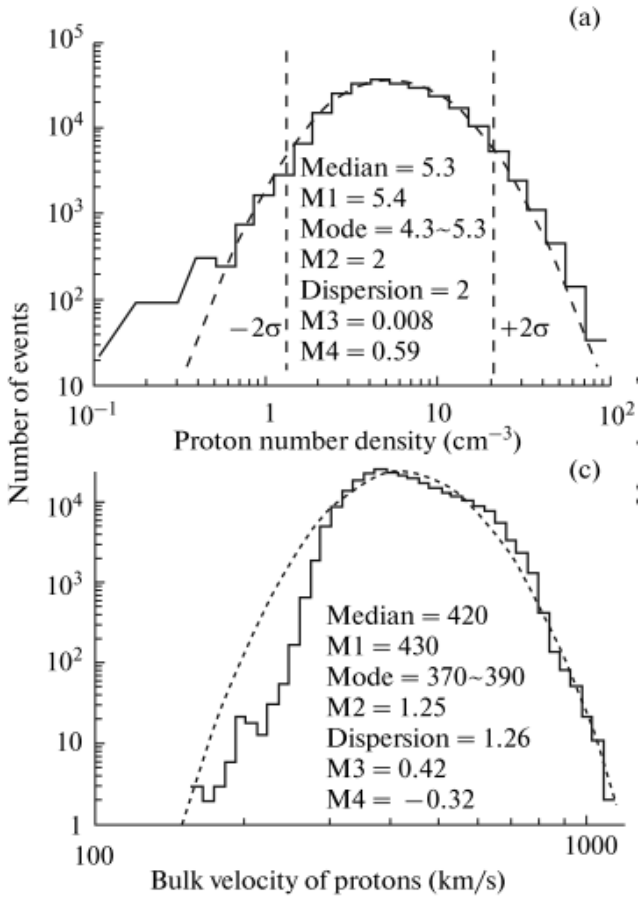
  $dn/dt \approx 0.003$см$^{-3}$/с

Статистические свойства СВ

Статистические распределения значений плотности и скорости солнечного ветра имеют в первом приближении логнормальную форму.

Распределение для скорости обладает широким плато в области 300-700км/с и имеет высокие коэффициенты асимметрии и эксцесса.

[Veselovsky et al.,2010]

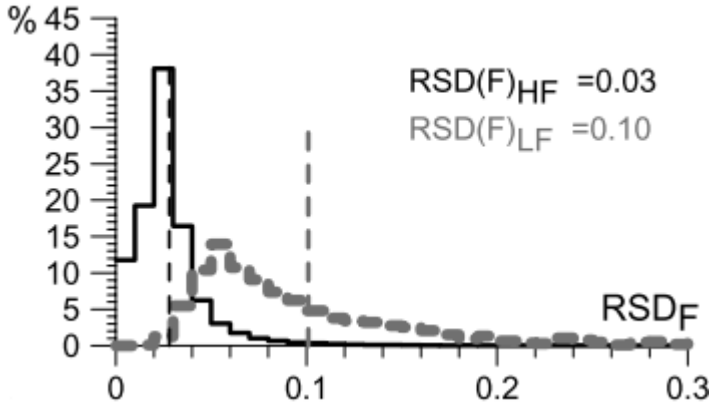


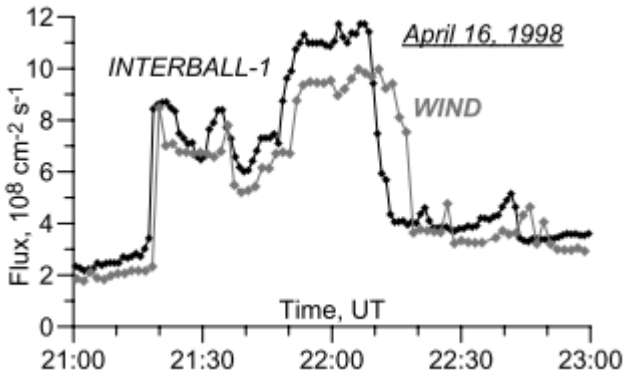
Статистические свойства СВ

Относительное стандартное отклонение плотности СВ по данным Interball-1 составляет около 3% для секундных и около 10% для минутных вариаций.

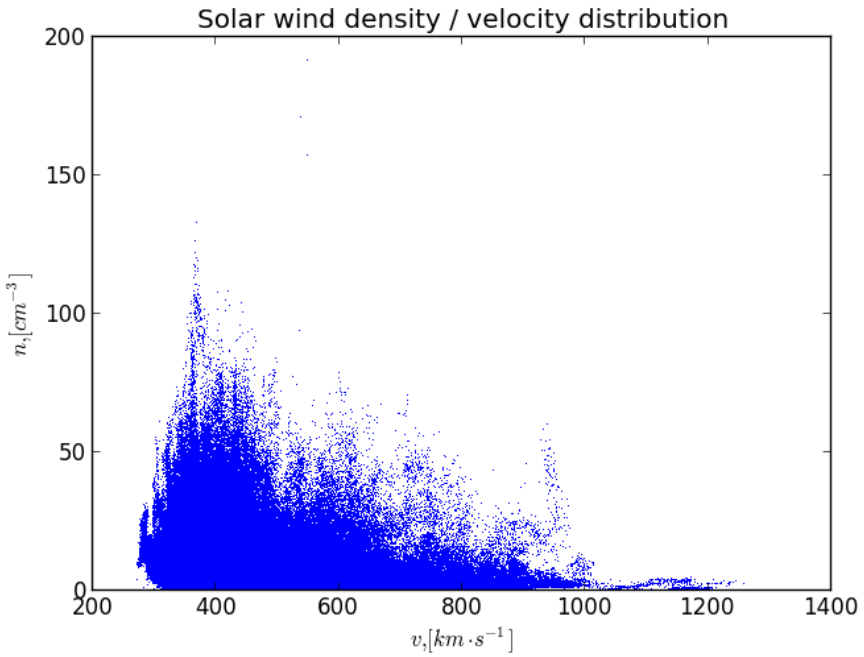
Наблюдаются отдельные измерения, при которых за короткое время (от секунд до нескольких минут) значение плотности меняется от 20% до сотен процентов.

[Zastenker, 2007]



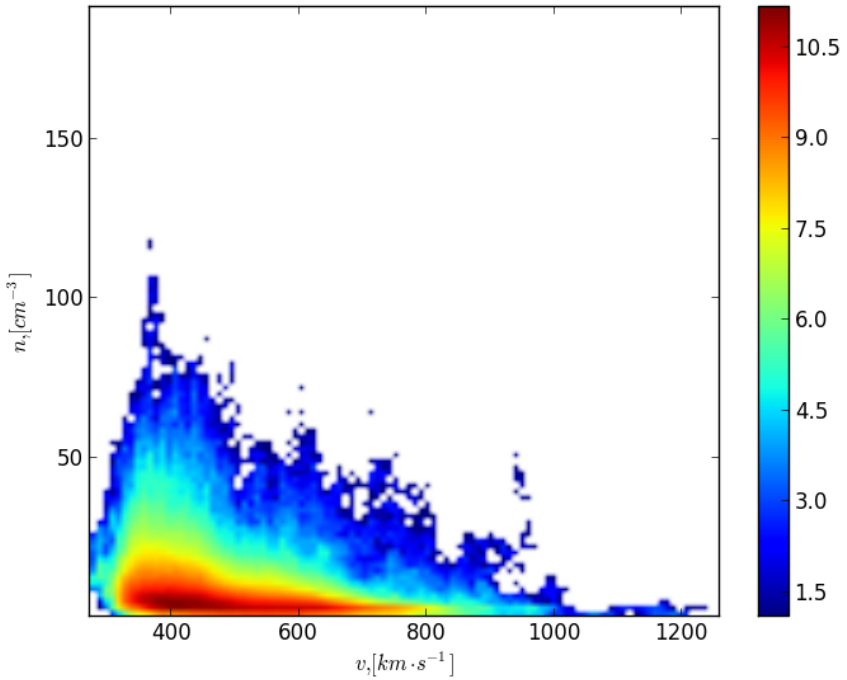


Статистика по плотности и скорости



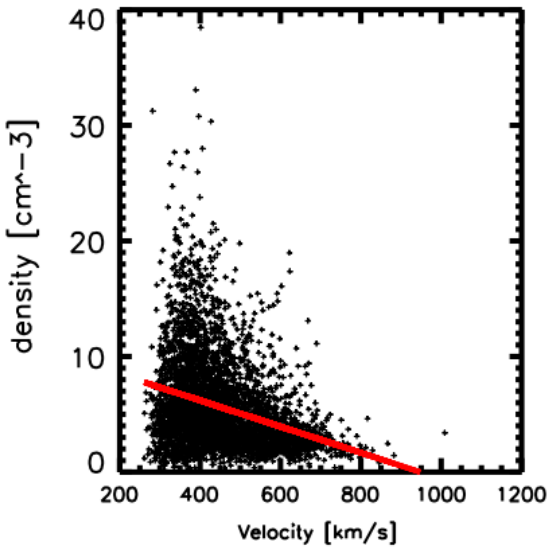
- Каждому измерению соответствует точка на фазовой плоскости *nv*.
- Хорошо видны верхняя и нижняя границы распределения, а также отдельные разбросы по плотности при квазипостоянной скорости.

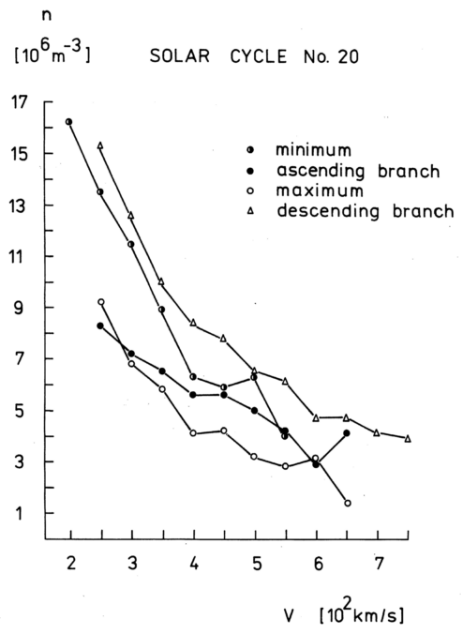
Плотность распределения v *vs* n



- Диаграмма плотности измерений на графике распределения v и n солнечного ветра. Сетка 100x100 бинов; логарифмический масштаб.
- Около 83% собранных измерений находятся в выделенной красным цветом области (lnC>9.0): плотность варьируется в пределах 1.5-10см$^{-3}$, скорость - в пределах 340-670км/с.

Моделирование состояния СВ





- Уравнение политропного процесса:
- На 1а.е. $p \sim \rho v^{1.42}$ [Jacobs et al, 2011]

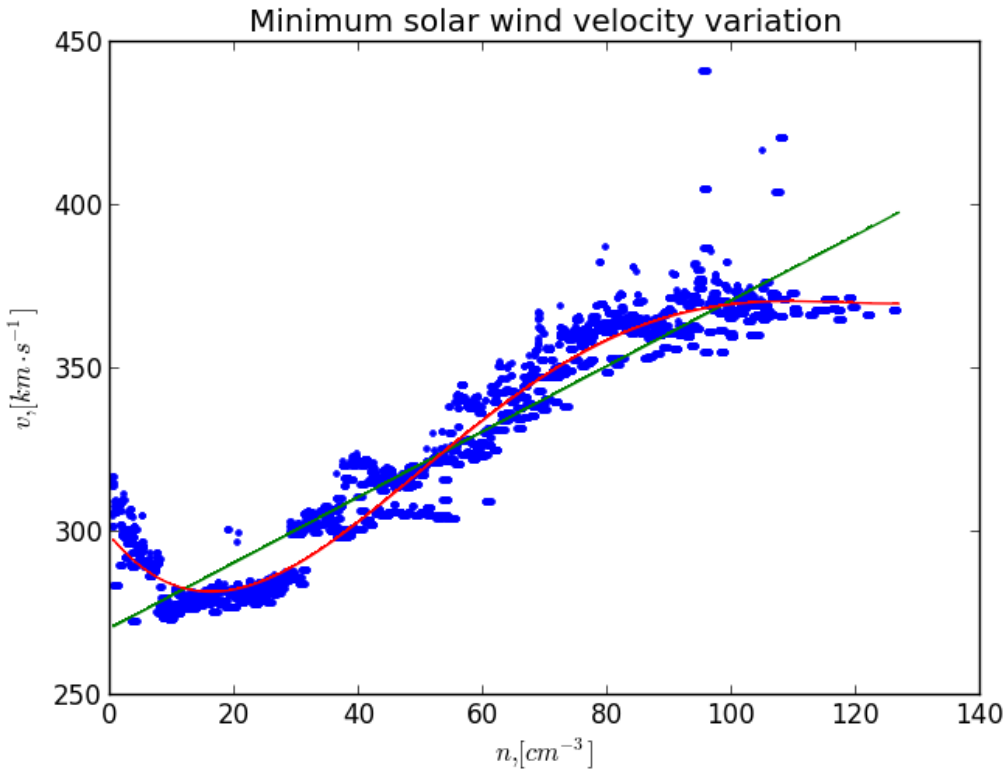
- $n \sim v^{-1.5}$ [Kulčár, 1988]
- Для спокойного СВ $n \sim v^{-2.13}$, по данным различных космических аппаратов степень v варьируется от 1.5 до 3 [Neugebauer, 1976], [Steiniz, 1980]

Показатели степени политропы или зависимости n от v обычно контролируется фазой цикла СА.

[Jacobs, Poedts, 2011]

[Kulčár, 1988]

Минимальные скорости СВ



Линейное приближение

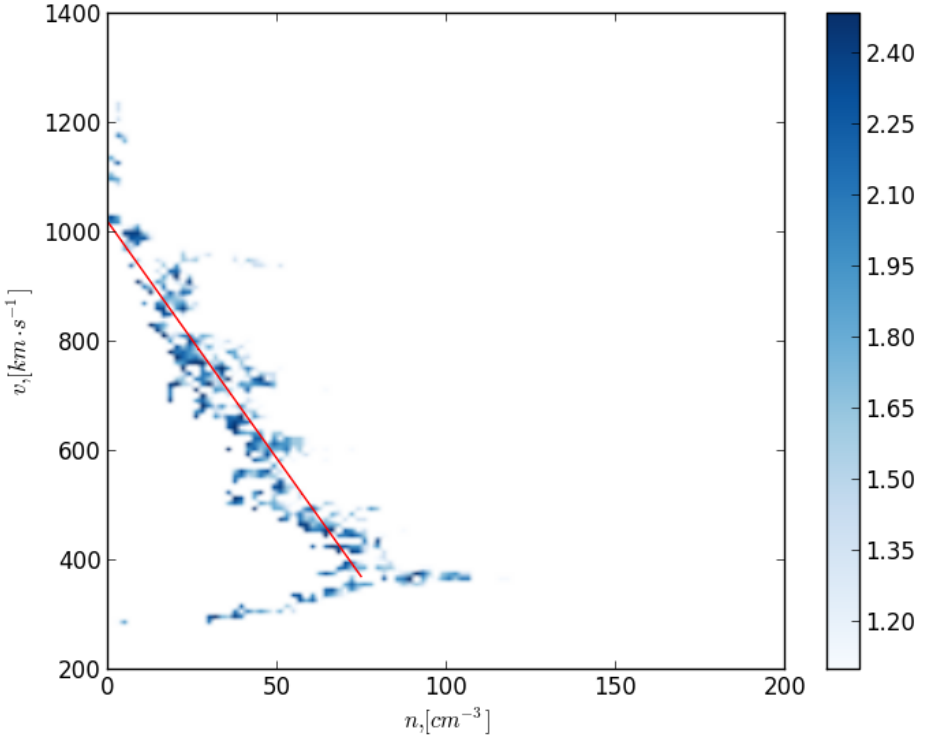
$$v_{min}[m/sec] = v_0 + 1e6 \cdot n[m^{-3}]$$

$$v_0 = 2.7e5[m/sec]$$

Более точное приближение дается полиномом четвертой степени:

[2.6e-06; -8.7e-04; 9.1e-02; -2.3; 3.0e+02]

Максимальные скорости СВ

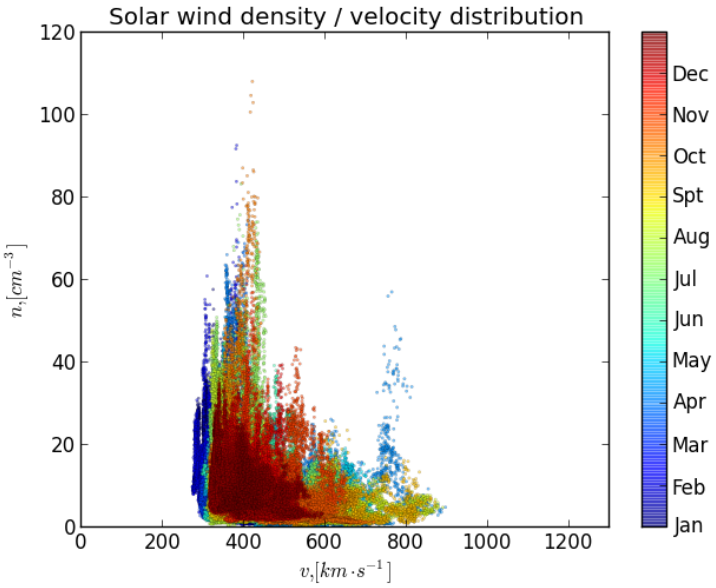


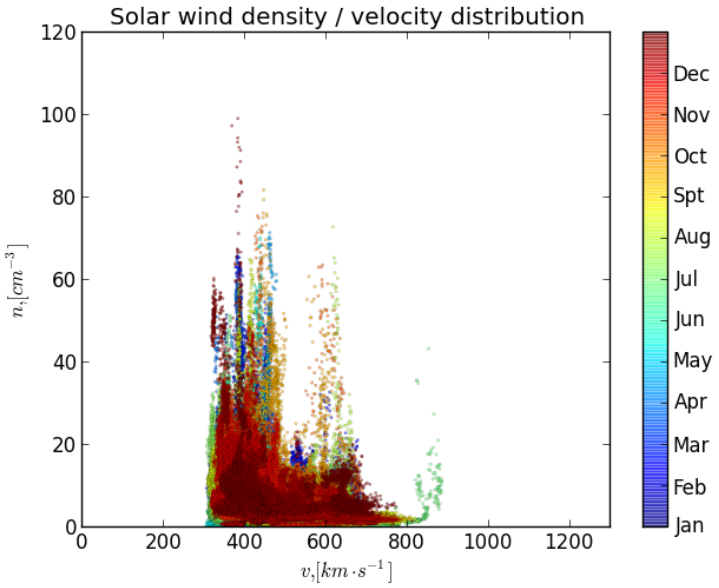
Линейное приближение

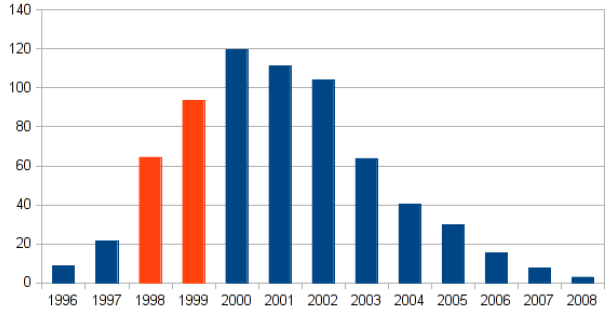
$$v_{max}[m/sec] = v_0 - 8.67 \cdot n[m^{-3}]$$

$$v_0 = 1.018e3[m/sec]$$

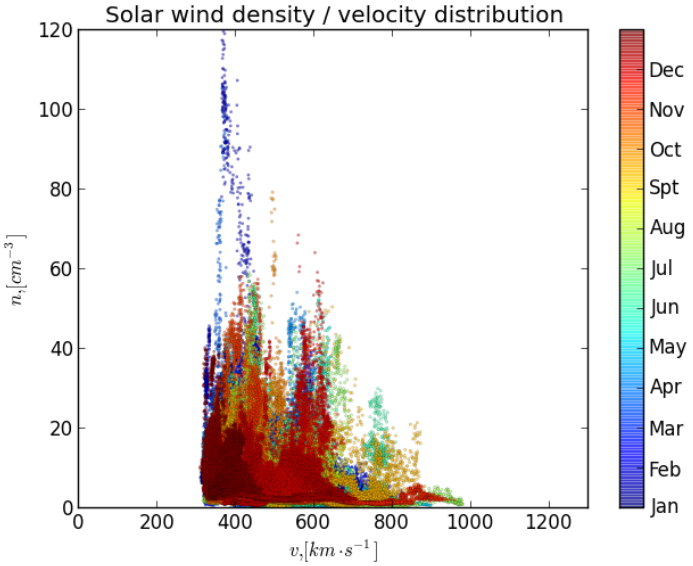
Локализованные по времени события

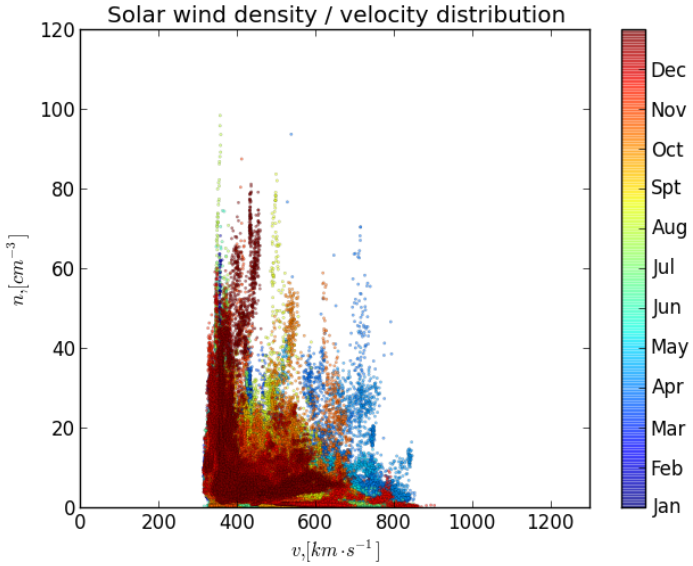


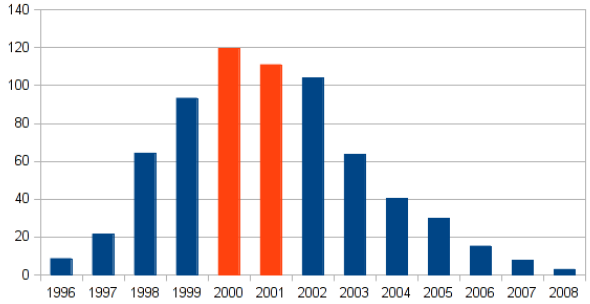




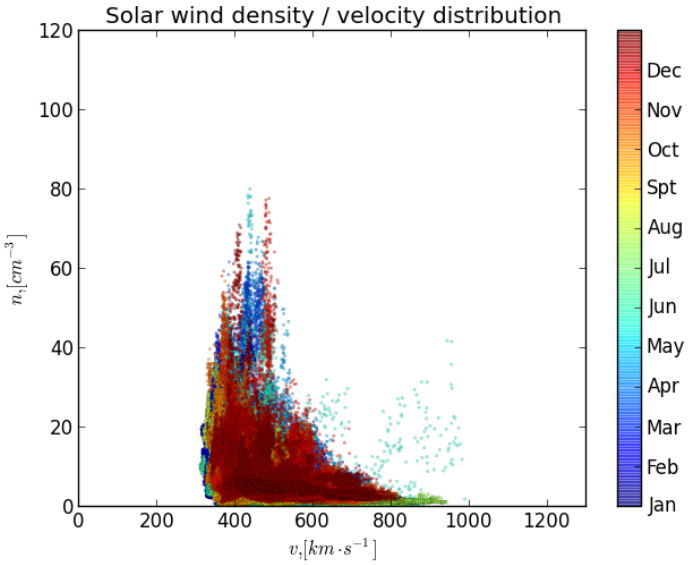
Локализованные по времени события

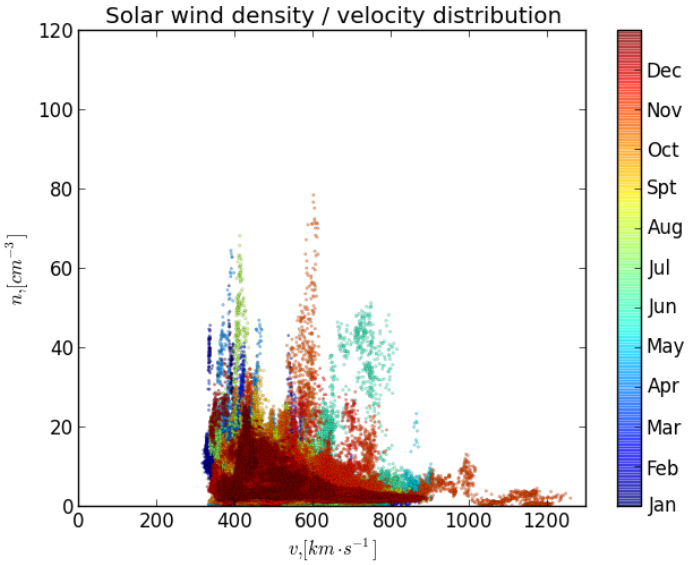


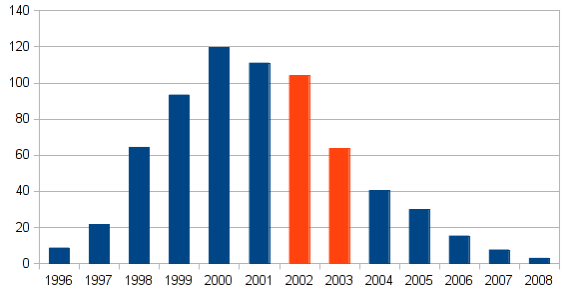




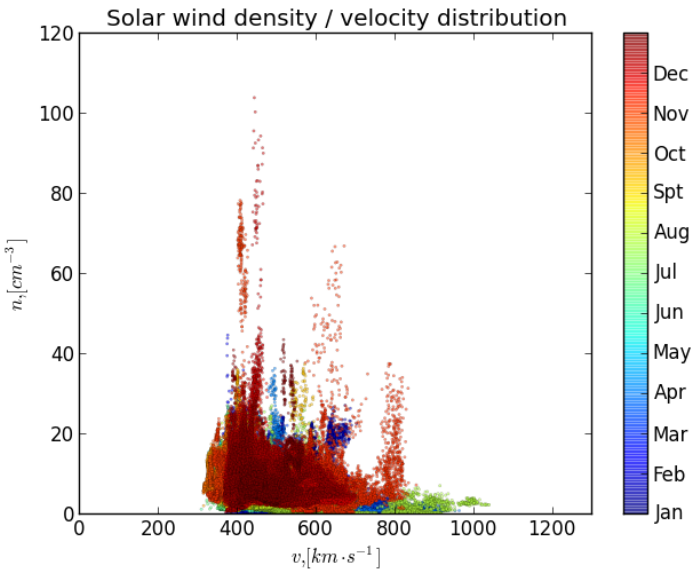
Локализованные по времени события

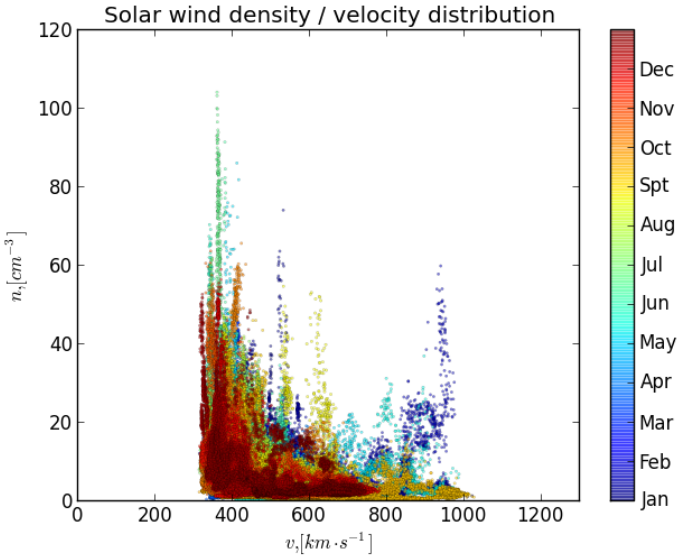


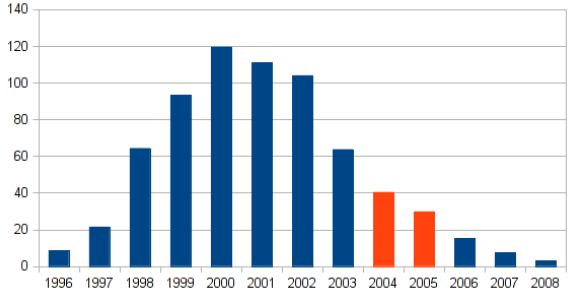




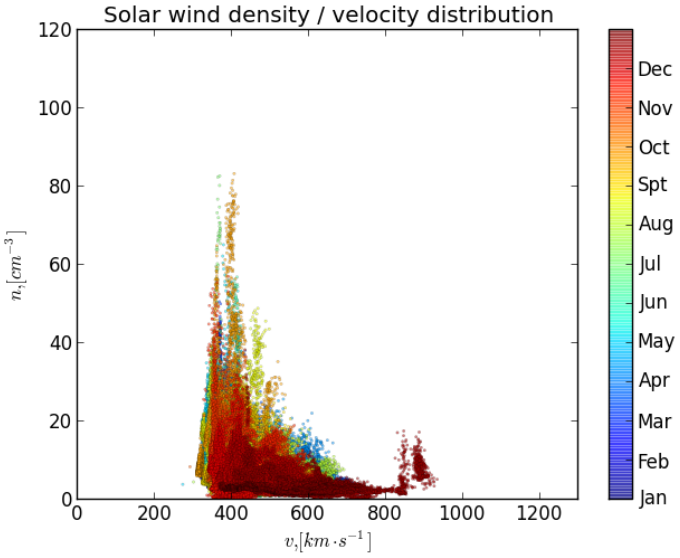
Локализованные по времени события

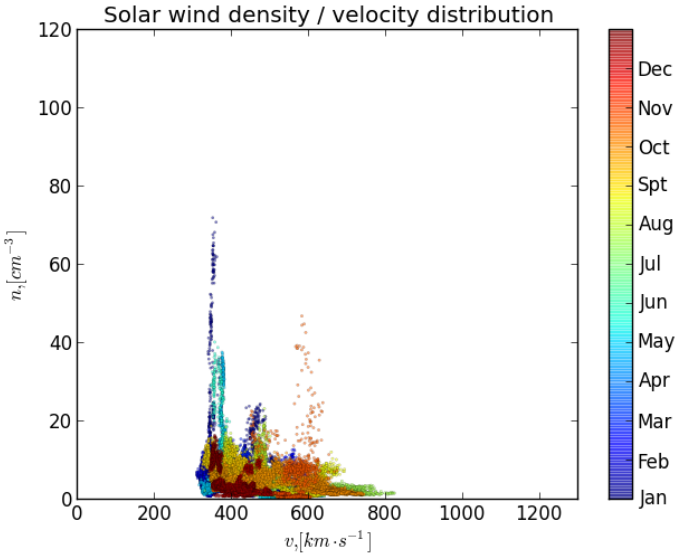


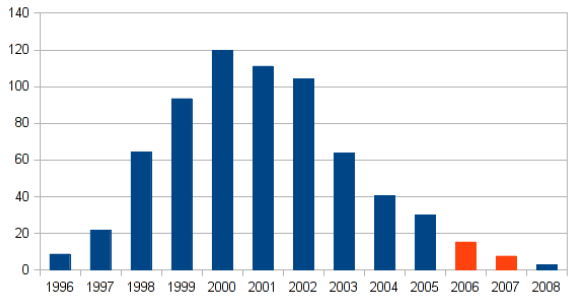




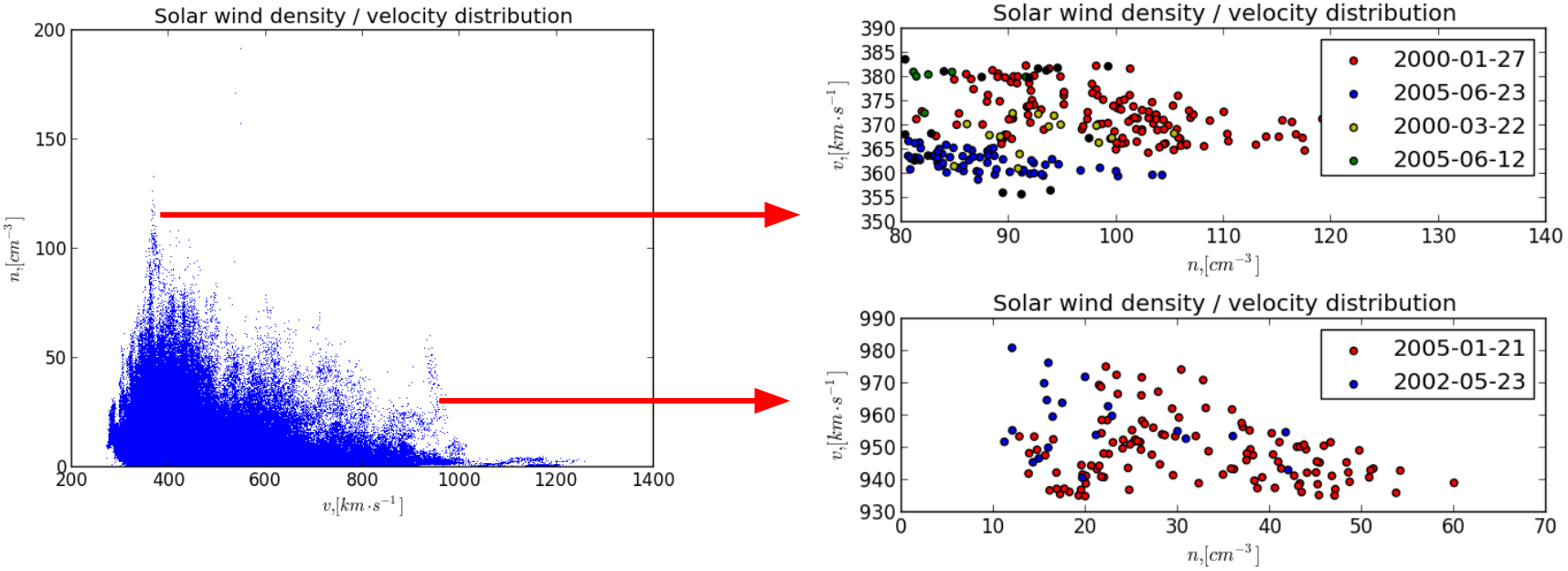
Локализованные по времени события







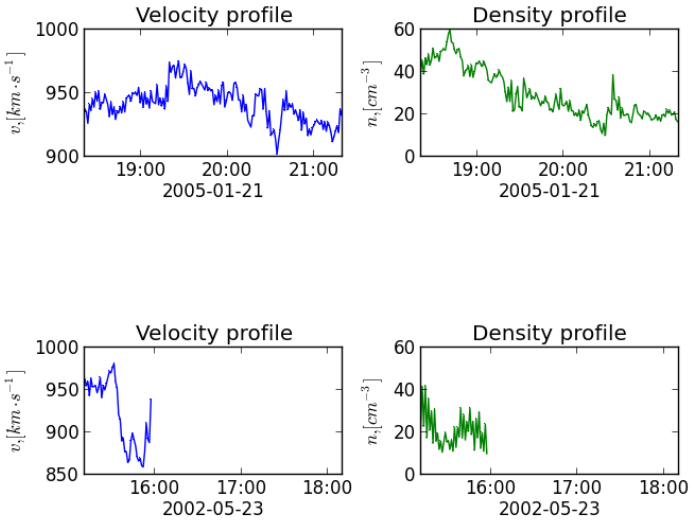
Анализ экстремальных по плотности событий



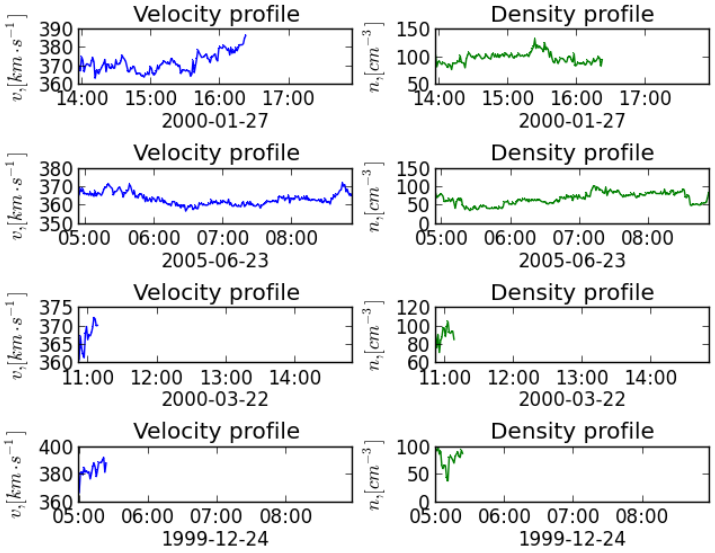
Анализ экстремальных по плотности событий

События при скоростях 935-985 км/с	События при скоростях 355-385 км/с
• 2002-05-23 15:11 - 15:59 • 2005-01-21 18:20 - 21:23	• 2000-01-27 13:56 - 16:24 • 2000-03-22 10:12 - 11:10 • 2005-06-23 04:01 - 08:56 • 2006-07-04 11:30 - 12:07

Анализ экстремальных по плотности событий



935-985 км/с



355-385 км/с

Статистические свойства СВ

Распределение плотности вероятности флуктуаций параметров СВ на 0.3а.е. по данным КА Helios для малых τ имеет негауссову форму с ярко выраженным пиком [Marsch, Tu, 1994]

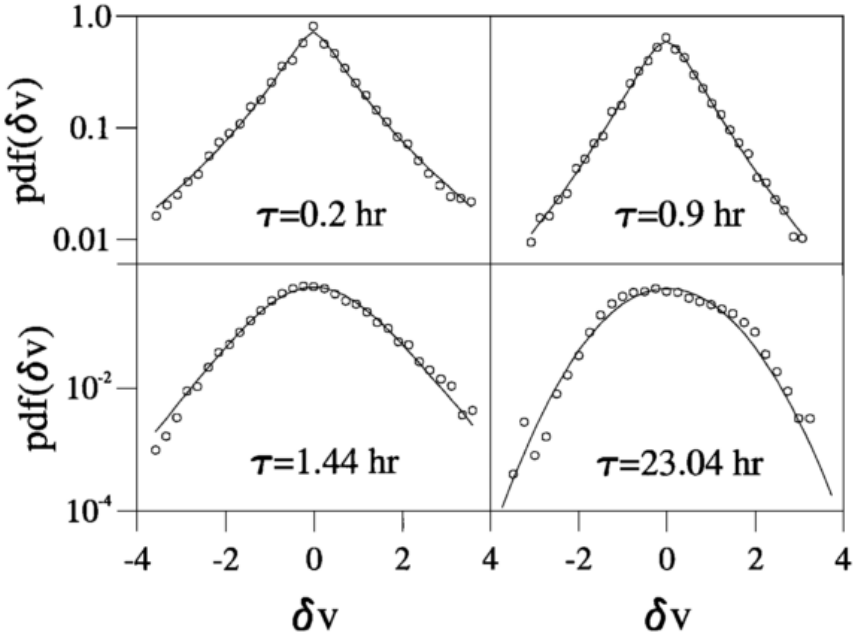
$$\Delta x = x(t+\tau) - x(t)$$

Статистические свойства СВ

Этот результат был впоследствии улучшен для скорости по данным КА Helios-2 за первые 4 месяца полёта [Sorriso-Valvo, 1999].

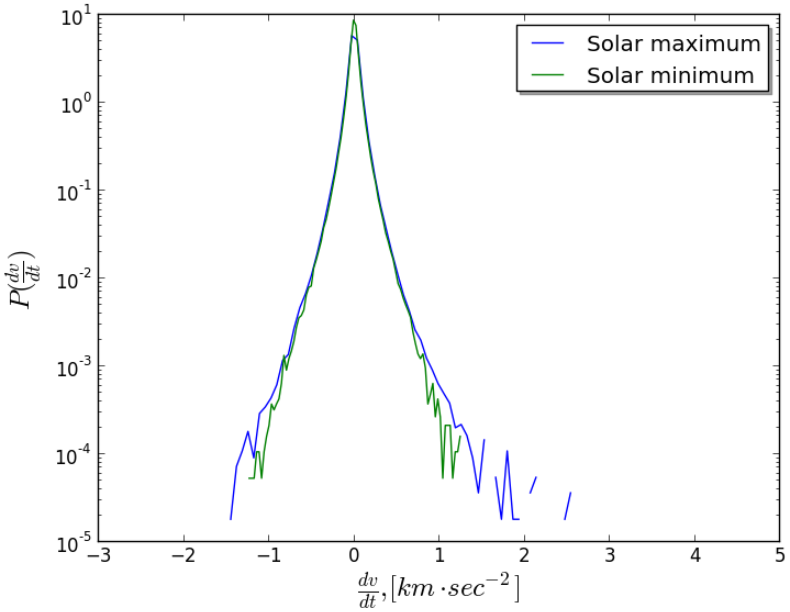
$$G_\tau(\sigma)\,d\sigma = \frac{1}{\lambda(\tau)\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\ln^2(\sigma/\sigma_0)}{2\lambda^2(\tau)}\right] d(\ln\sigma)$$

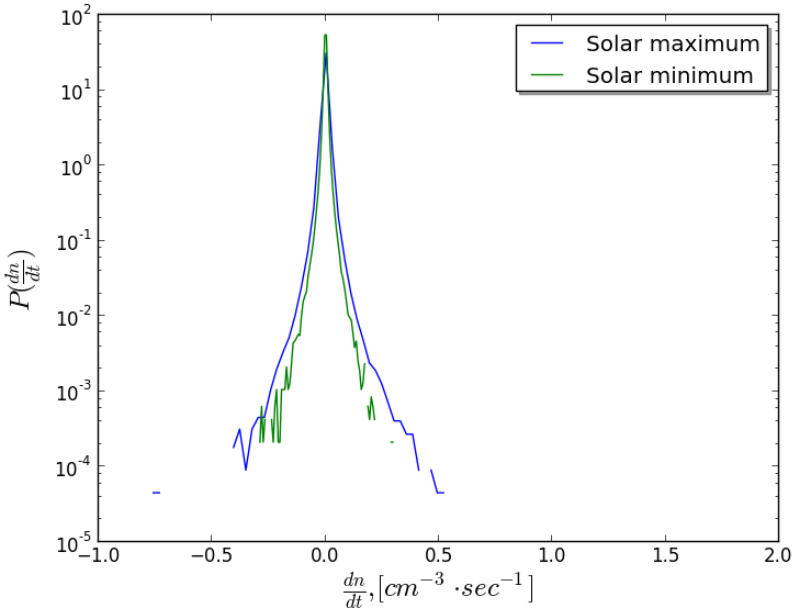
$$\lambda(\tau) = < (\Delta \ln \sigma)^2 >^{1/2}$$



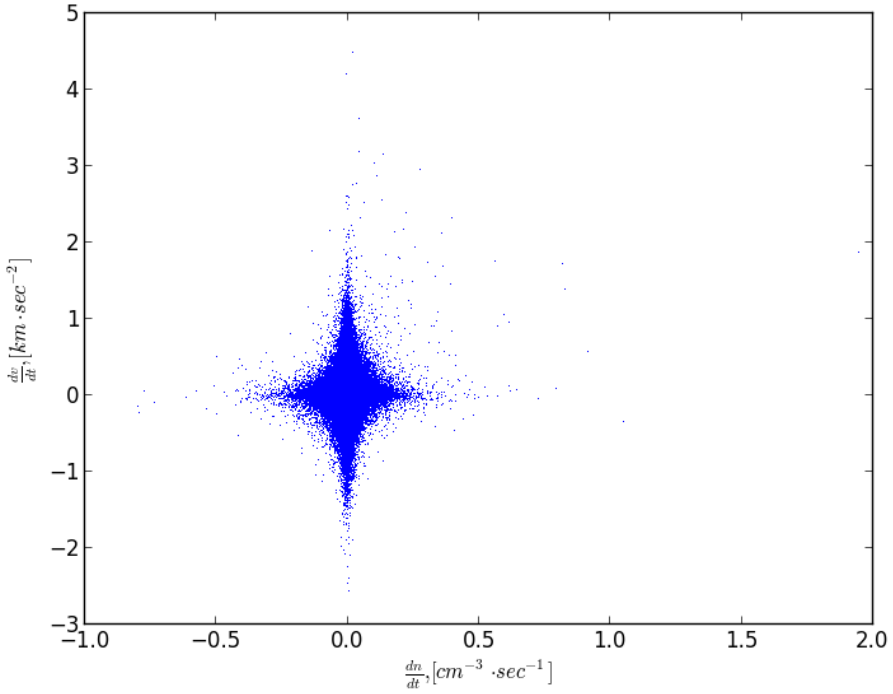
Статистические свойства СВ

Построение распределений плотности вероятности для n и v по большому набору имеющихся данных подтверждает упомянутые результаты. Также получены распределения в минимуме и максимуме 23-го цикла солнечной активности.





Взаимосвязь между dv/dt и dn/dt



Сравнение с имеющимися результатами

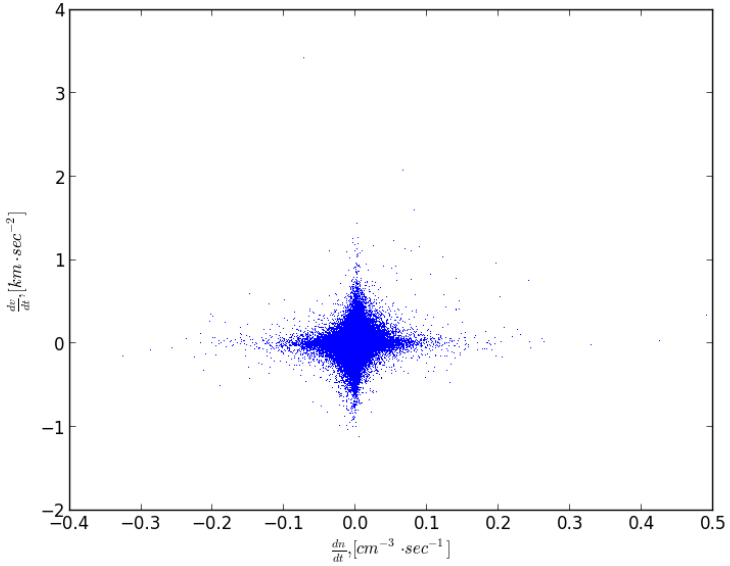
- Большие изменения потока солнечных ионов происходят за времена менее 1 минуты в 63% случаев.
- Около 60% изменений потока солнечных ионов сопровождается крайне малыми изменениями скорости.

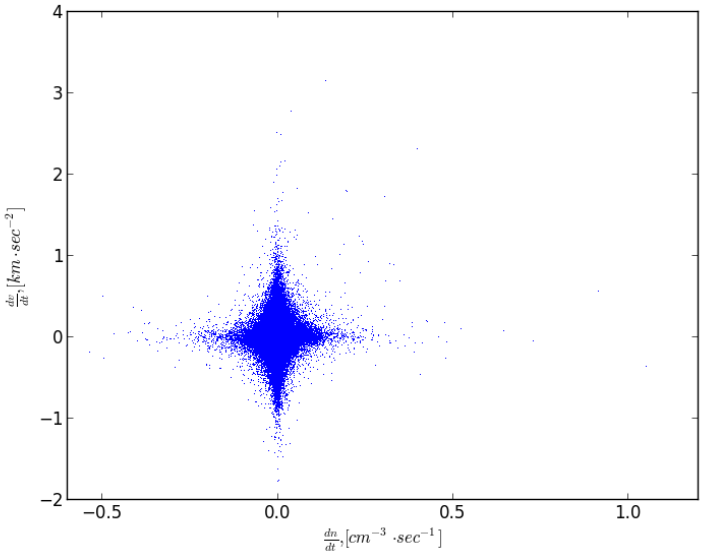
[Riazantseva et al, 2005]

- Большая часть изменений давления >1–2нПа происходят на временных масштабах порядка минуты и менее.
- Большая часть скачков давления, не связанных с ударными волнами, происходит исключительно благодаря изменениям плотности при постоянной скорости.

[Dalin et al, 2001]

Взаимосвязь между dv/dt и dn/dt

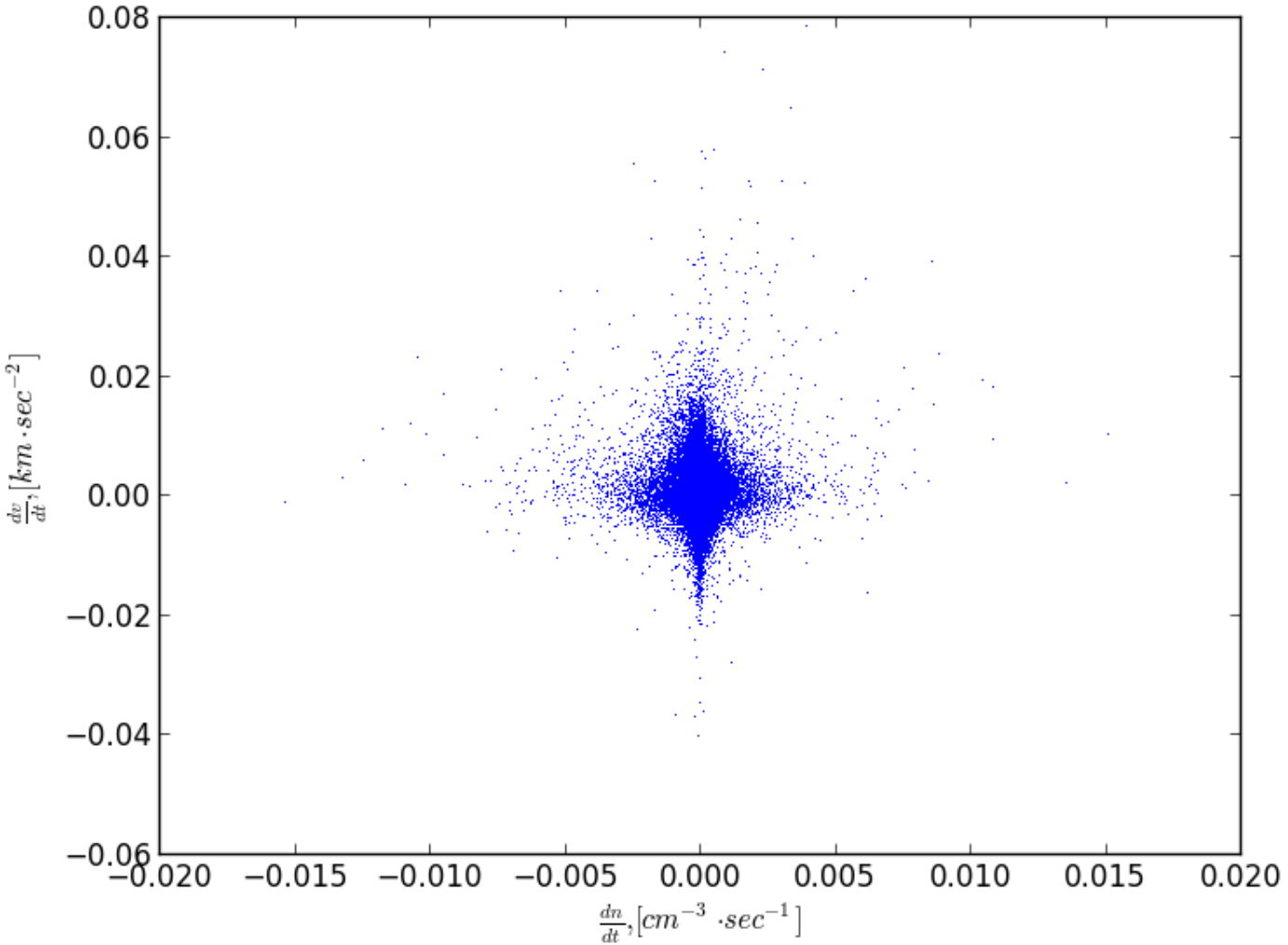




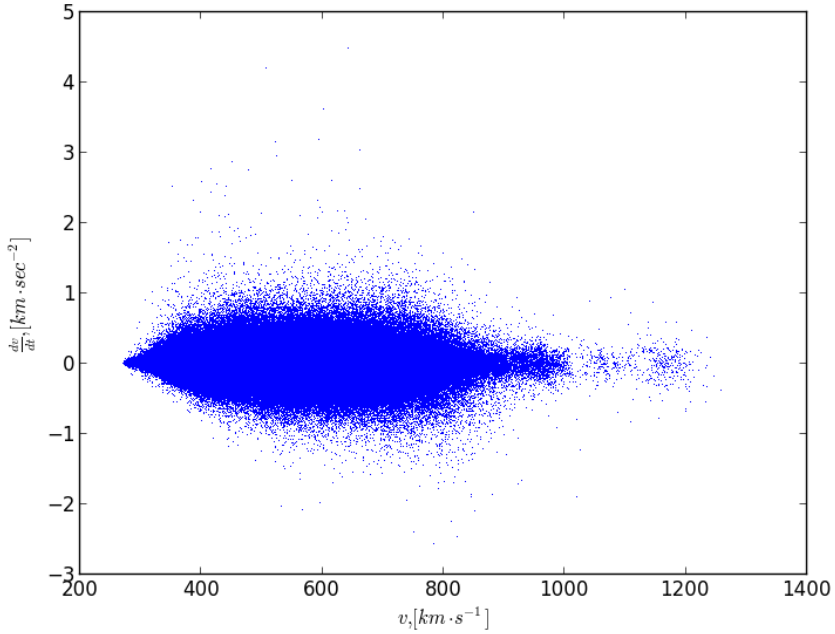
WIND **ACE**

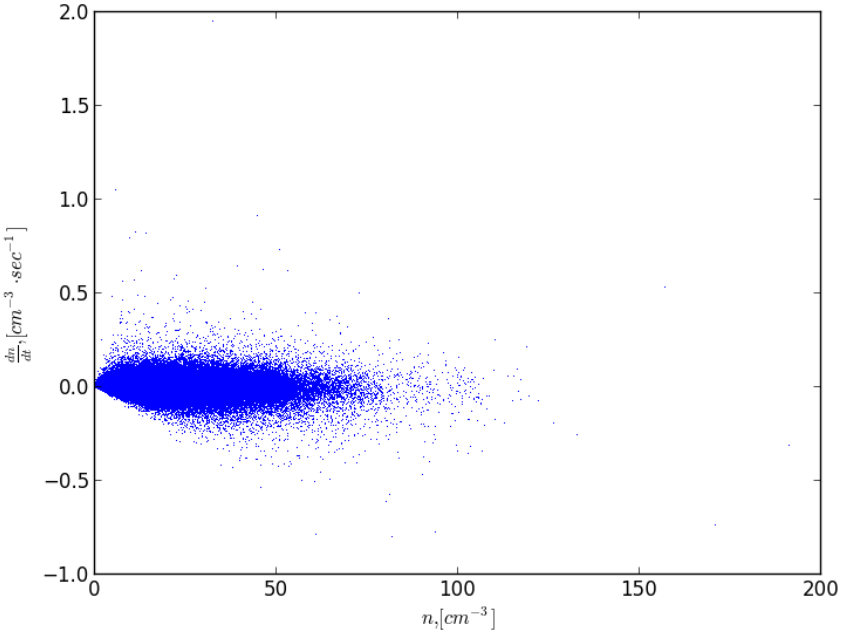
- Аналогичное распределение получено по данным КА WIND (90-секундные усреднения).
- Данные за 1999-2000гг.

Взаимосвязь между dv/dt и dn/dt



Распределения dv/dt *vs* v и dn/dt *vs* n





Выводы

- Форма неоднородностей в солнечном ветре, по-видимому, такова, что большие синхронные скачки плотности и скорости СВ встречаются крайне редко. В этих случаях наблюдается одновременный *рост* n и v на малых временных интервалах

- Наибольшие по модулю резкие скачки скорости наблюдаются при скоростях СВ в диапазоне 450-750км/с.

- Около 80% скачков скорости происходит не быстрее, чем 0.2км/$с^2$, остальные 20% - до 1км/$с^2$; отдельные скачки достигают 4км/$с^2$.

Выводы

- Наибольшие по модулю резкие скачки плотности наблюдаются при плотностях СВ в диапазоне 10-35см$^{-3}$.
- Около 80% скачков по плотности лежат в коридоре ±0.05см$^{-3}$/сек.
- Более 83% измерений описывают состояния СВ с плотностями в диапазоне 1.5-10см$^{-3}$ и скоростями в диапазоне 340-670км/с.
- Возможно построение вероятностной модели, прогнозирующей с заданной достоверностью коридор возможных значений параметров СВ.

Благодарности

Авторы благодарят *М.О. Рязанцеву* за продуктивное обсуждение работы, а также *А.П. Кропоткина и В.А. Пилипенко* за ценные замечания.

Литература

1. Parker, E. (1958), Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields., *Astrophys. J.*
2. Aellig, M. (2001), The solar wind helium abundance: Variation with wind speed and the solar cycle, *Geophys. Res. Lett., 28*(14), 2767–2770.
3. McComas, D. J. et al. (1998), An unusual coronal mass ejection: First Solar Wind Electron, Proton, Alpha Monitor (SWEPAM) results from the Advanced Composition Explorer, *Geophys. Res. Lett., 25*(23), 4289–4292.
4. Jacobs, C., and S. Poedts (2011), A polytropic model for the solar wind, *Adv. Sp. Res., 48*(12), 1958–1966, doi: 10.1016/j.asr.2011.08.015.
5. Kulčár, L. (1988), Long-term variations of the solar wind density-velocity relation, Contrib. Astron. Obs. Skaln. Pleso, 17, 21–36.
6. Webb, D., and R. Howard (1994), The solar cycle variation of coronal mass ejections and the solar wind mass flux, J. Geophys. Res. …, 99, 4201–4220.
7. Krieger, A., A. Timothy, and E. Roelof (1973), A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream, Sol. Phys., 29, 505–525.
8. Bravo, S., and G. Stewart (1997), The correlation between sunspot and coronal hole cycles and a forecast of the maximum of sunspot cycle 23, Sol. Phys., 173(1), 193–198.
9. Gosling, J. (1993), The solar flare myth, J. Geophys. Res. Sp. Phys. (…, 98(A11), 18937–18949.
10. Hundhausen, A. J. (1968), Direct observations of solar-wind particles, Space Sci. Rev., 8(1963), 690–749.
11. Tappin, S. (1999), A determination of the outflow speeds in the lower solar wind, Astron. Astrophys, 350, 302–309.
12. Esser, R., and S. Fineschi (1999), Plasma properties in coronal holes derived from measurements of minor ion spectral lines and polarized white light intensity, Astrophys. J., 510, 63–67.

Литература

1. Veselovsky, I. S., a. V. Dmitriev, and a. V. Suvorova (2010), Algebra and statistics of the solar wind, Cosm. Res., 48(2), 113–128, doi:10.1134/S0010952510020012.
2. Marsch, E., and C. Y. Tu (1994), Non-Gaussian probability distributions of solar wind fluctuations, Ann. Geophys., 12(12), 1127, doi:10.1007/s005850050136.
3. Zastenker, G. (2007), Dynamics of the Solar Wind, Sun Geosph., 2(1), 25–28.
4. Sorriso‐Valvo, L., and V. Carbone (1999), Intermittency in the solar wind turbulence through probability distribution functions of fluctuations, Geophys. Res. Lett., 26(13), 1801–1804.
5. Riazantseva, M. O., O. V. Khabarova, G. N. Zastenker, and J. D. Richardson (2005), Sharp Boundaries of Solar Wind Plasma Structures and an Analysis of Their Pressure Balance, Cosm. Res., 43(3), 157–164, doi:10.1007/s10604-005-0030-8.
6. Dalin, P., and G. Zastenker (1999), A Survey of large, rapid solar wind dynamic pressure changes observed by Interball-1 and IMP 8, Ann. …, 293–299.