

Возмущенная зона и поршневая ударная волна впереди CME в нижней короне по данным SDO

М.В. Еселевич

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Главная трудность таких исследований – это отождествление и измерение ударного фронта на фоне других, сравнимых по своим пространственным размерам, неоднородностей. Эта проблема до сих пор не решена. Поэтому, практически во всех зарубежных работах ударный фронт перед CME скорее угадывается (не всегда правильно), чем регистрируется. Приведем конкретный пример 13 июня 2010 г. типичного рассмотрения ударной волны перед CME по современным данным инструмента AIA/SDO из статьи Ma et al., ApJ, 738, 160 (2011).

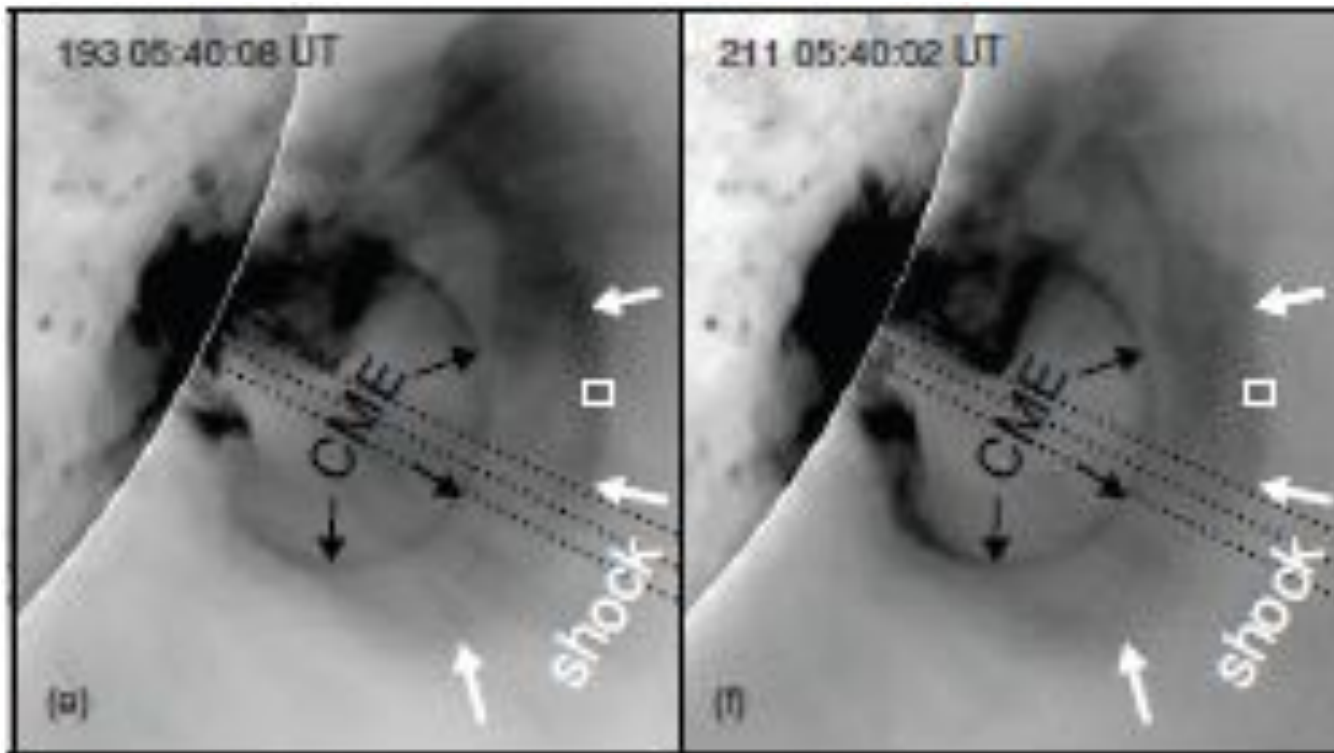


Рисунок из работы Ma et al., ApJ, 738, 160 (2011)

На рисунке предполагаемое положение ударной волны указано тремя белыми стрелками. Как будет показано далее, это, не только не очень обосновано, но и не правильно.

Целью данной работы является регистрация ударного фронта и измерение его ширины в событии 13 июня 2010 г. по данным AIA/SDO. Сопоставление результатов с обобщенными выводами, сделанными ранее для ударных волн на расстояниях $1.5R_0 < R < 30R_0$ в работах [Eselevich, M. and V., 2008; Eselevich, M., 2010].

Событие 13 июня 2010 г. рассмотрено в работах:

Patsourakos S., Vourlidas A., and Stenborg G., ApJ, 724, L188, 2010.

Kozarev K.A. et al., ApJ Lett., 733, L25, 2011.

Ma et al., ApJ, 738, 160, 2011.

Данные анализа

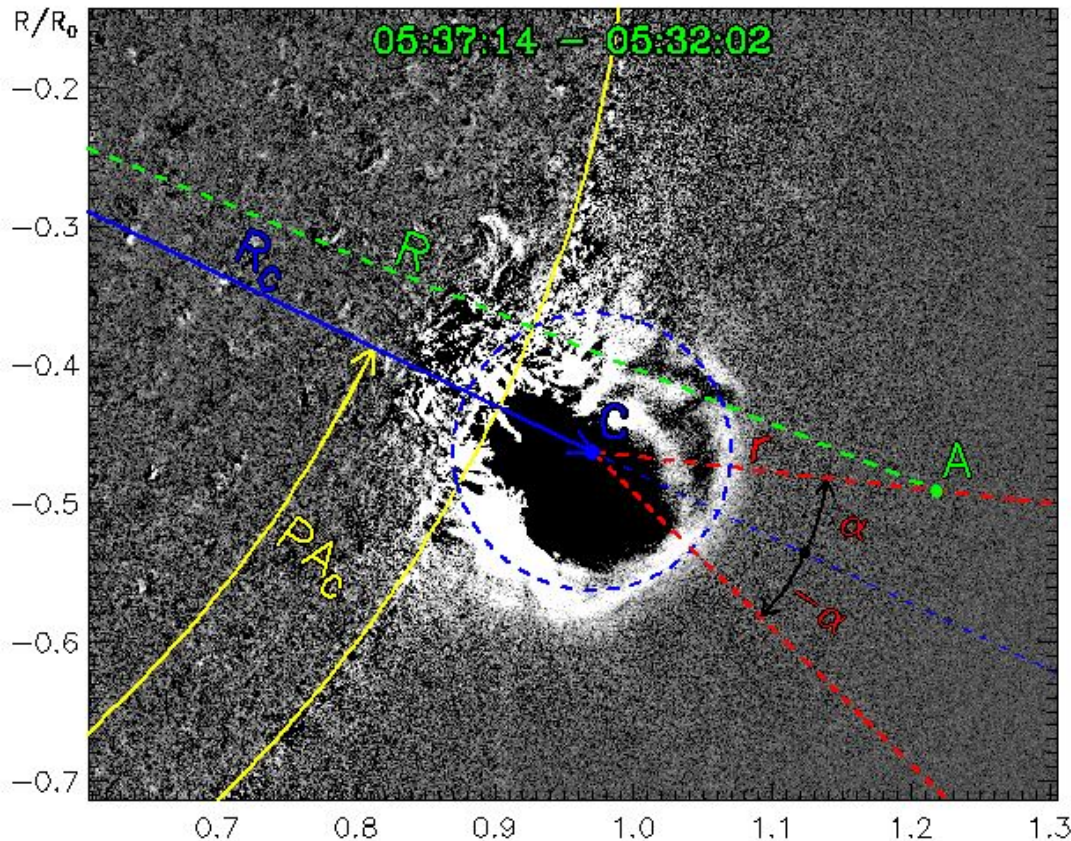
Использовались данные инструмента AIA/SDO,
канал с длиной волны 211Å (FeXIV)

http://www.imsal.com/get_aia_data/

Временное разрешение 12 сек., диапазон расстояний в нижней
короне до $(1.3-1.4)R_0$.

Метод анализа данных

Изображения в 211\AA представлялись в виде разностной яркости $\Delta P = P(t) - P(t_0)$, где $P(t_0)$ – невозмущенная яркость в момент t_0 до рассматриваемого события, $P(t)$ – возмущенная яркость в момент времени $t > t_0$. По изображениям разностной яркости исследовалась динамика возмущенной зоны впереди СМЕ и формирование ударной волны во времени и в различных направлениях относительно оси распространения СМЕ.



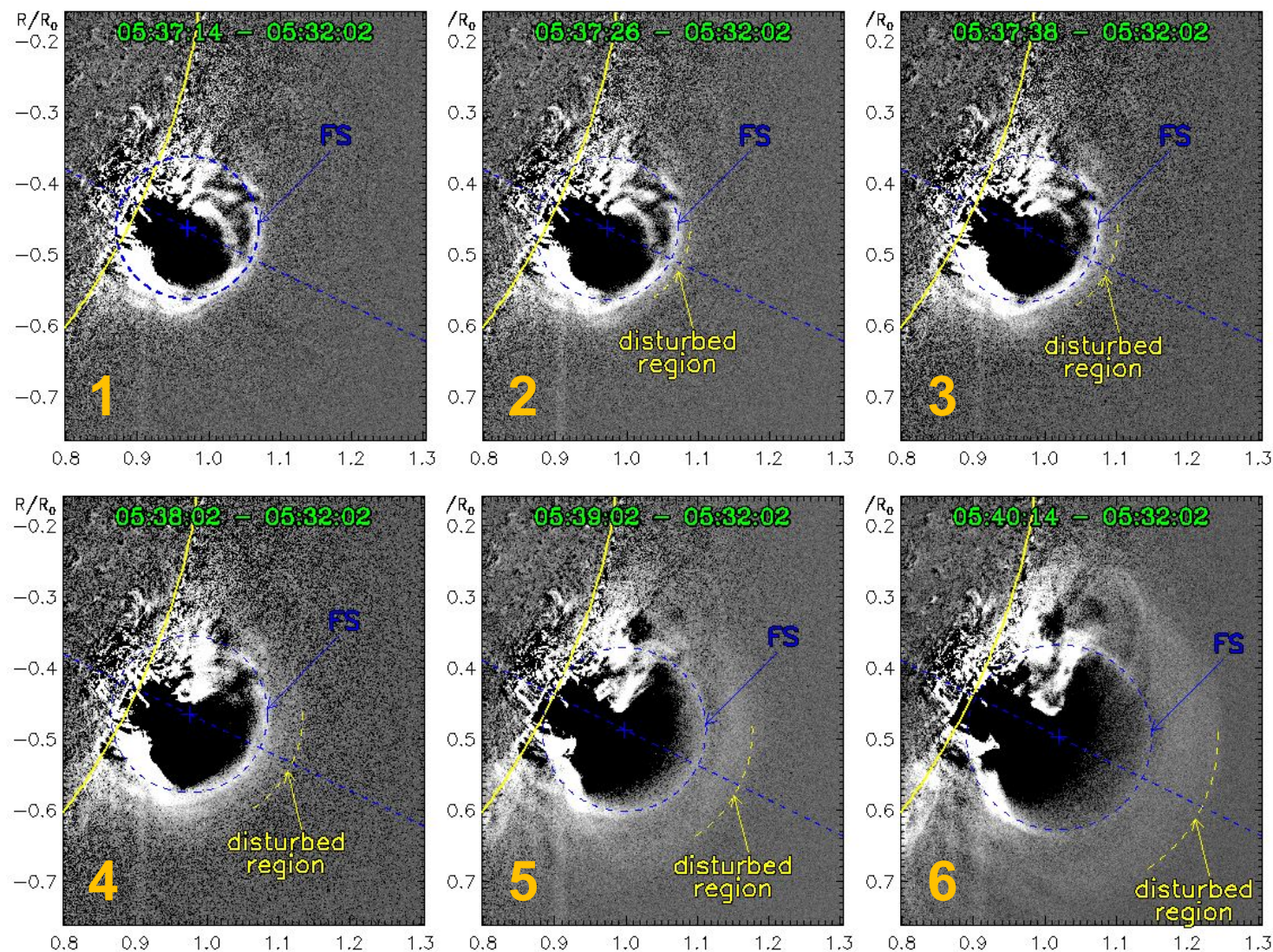
Фронтальная структура СМЕ имеет вид окружности с центром C который располагался на расстоянии R_C в направлении позиционного угла PA_C .

Для измерения ширины ударного фронта строились распределения $\Delta P(r)$ под различными углами α относительно оси движения СМЕ.

Расстояние R от центра Солнца связано с расстоянием r от центра СМЕ:

$$R = [R_C + r + 2 \cdot R_C \cdot r \cdot \cos(\alpha)]^{1/2}$$

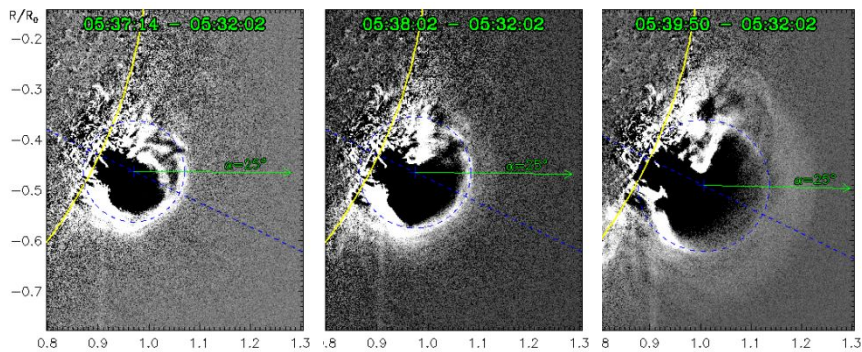
СМЕ 13 июня 2010 г.



Фронтальная структура (**FS**) СМЕ оказывается сформированной к моменту 05:37:14 (рис. 1).

Перед фронтальной структурой постепенно формируется **возмущенная зона** (рис. 2-6).

Чтобы показать, что на границе возмущенной зоны есть ударный разрыв необходимо исследовать распределения разностной яркости ΔP вдоль различных направлений α относительно линии $PA_C \approx 244^\circ$.

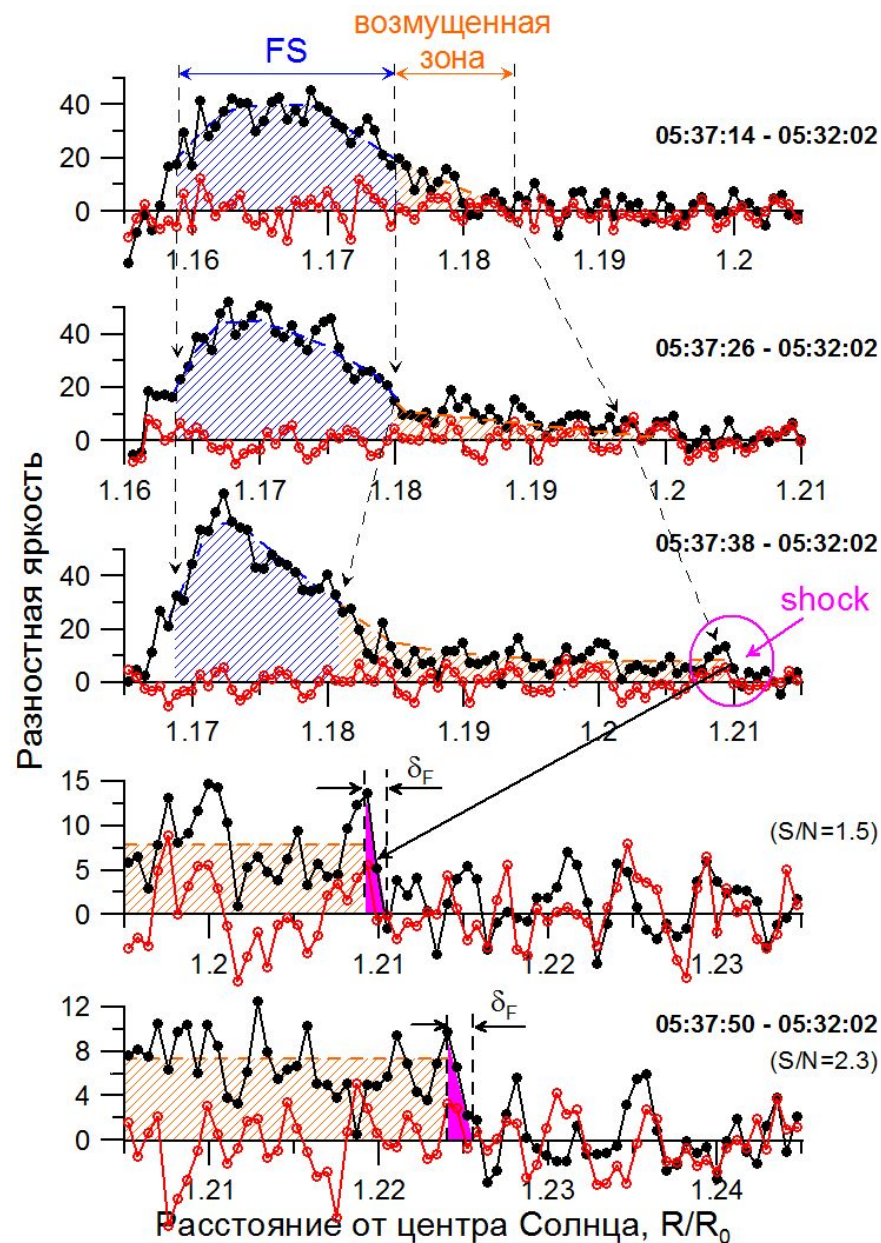


Распределения разностной яркости $\Delta P(R)$ вдоль направления $\alpha = 25^\circ$ относительно линии $PA_C \approx 244^\circ$ в последовательные моменты времени (черные кружки).

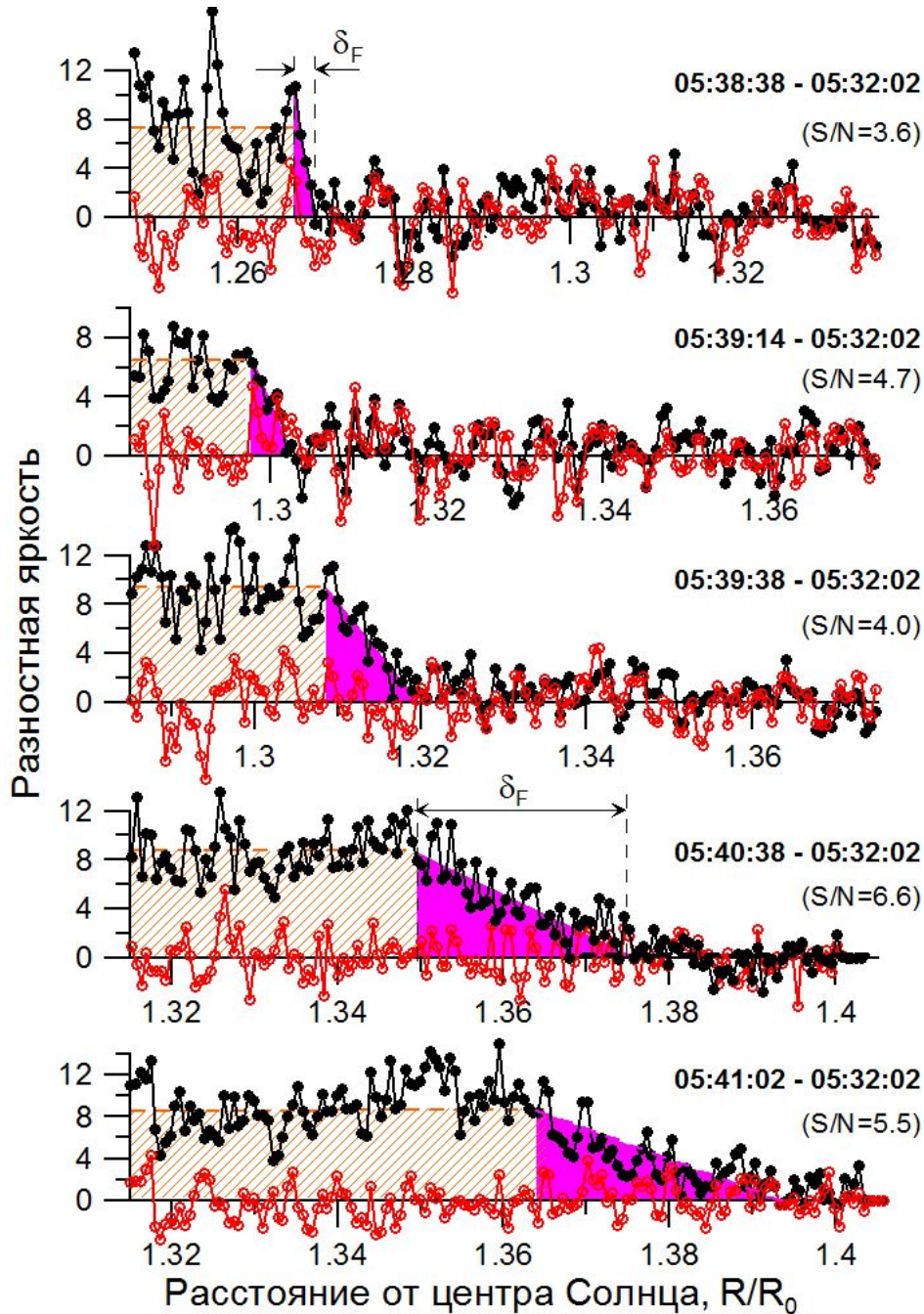
Красными кружками показаны распределения разностной яркости $\Delta P_N(R)$ до появления CME (т.е. не возмущенные) в том же направлении.

В момент 05:37:38 в передней части возмущенной зоны появляется фронт с шириной δ_F .

Распределения разностной яркости во времени

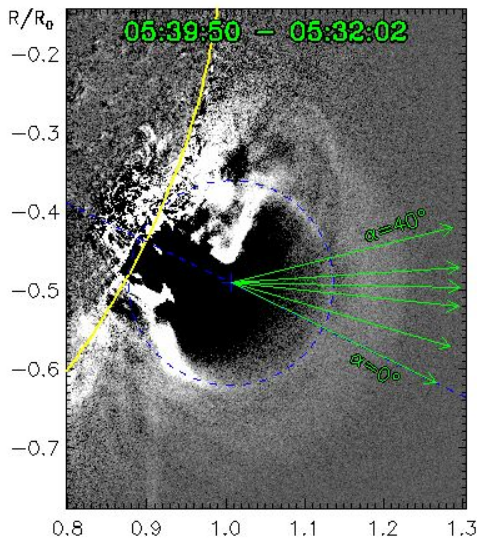


Распределения разностной яркости во времени (продолжение)

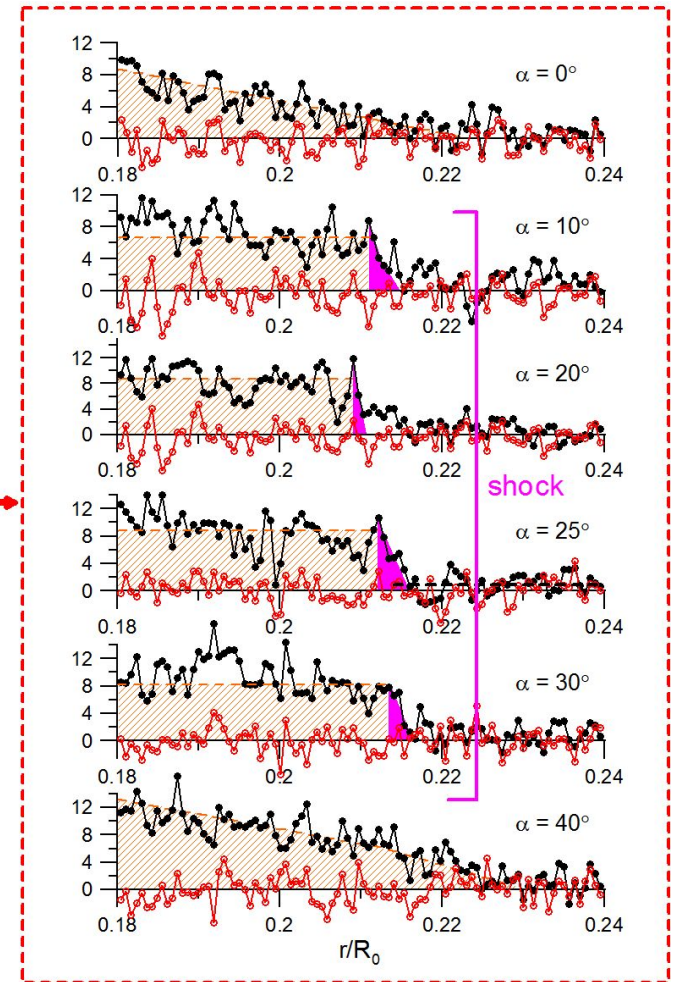
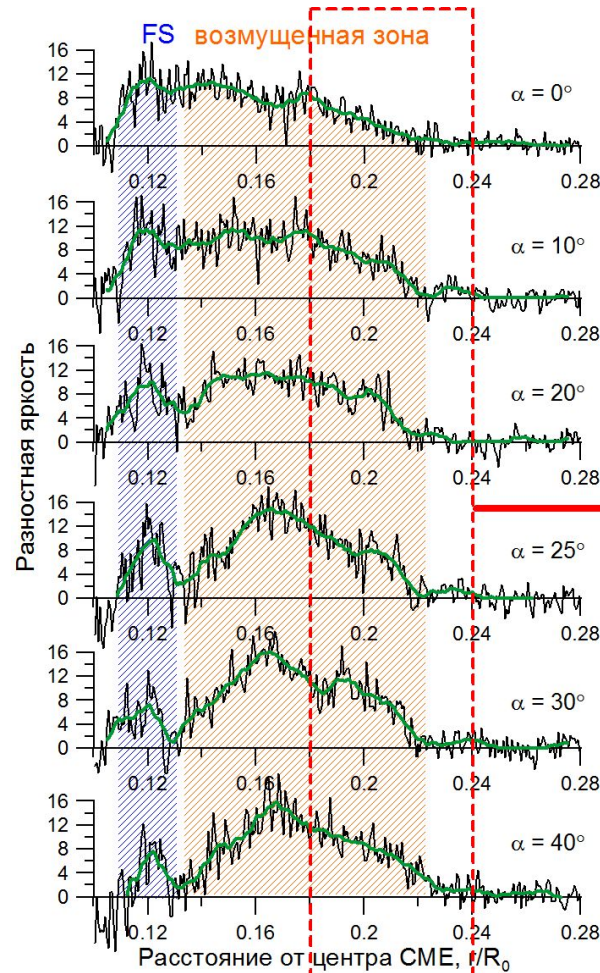


Величина δ_F почти не
меняется на расстояниях $R < 1.27R_0$
и постепенно
возрастает при $R > 1.27R_0$

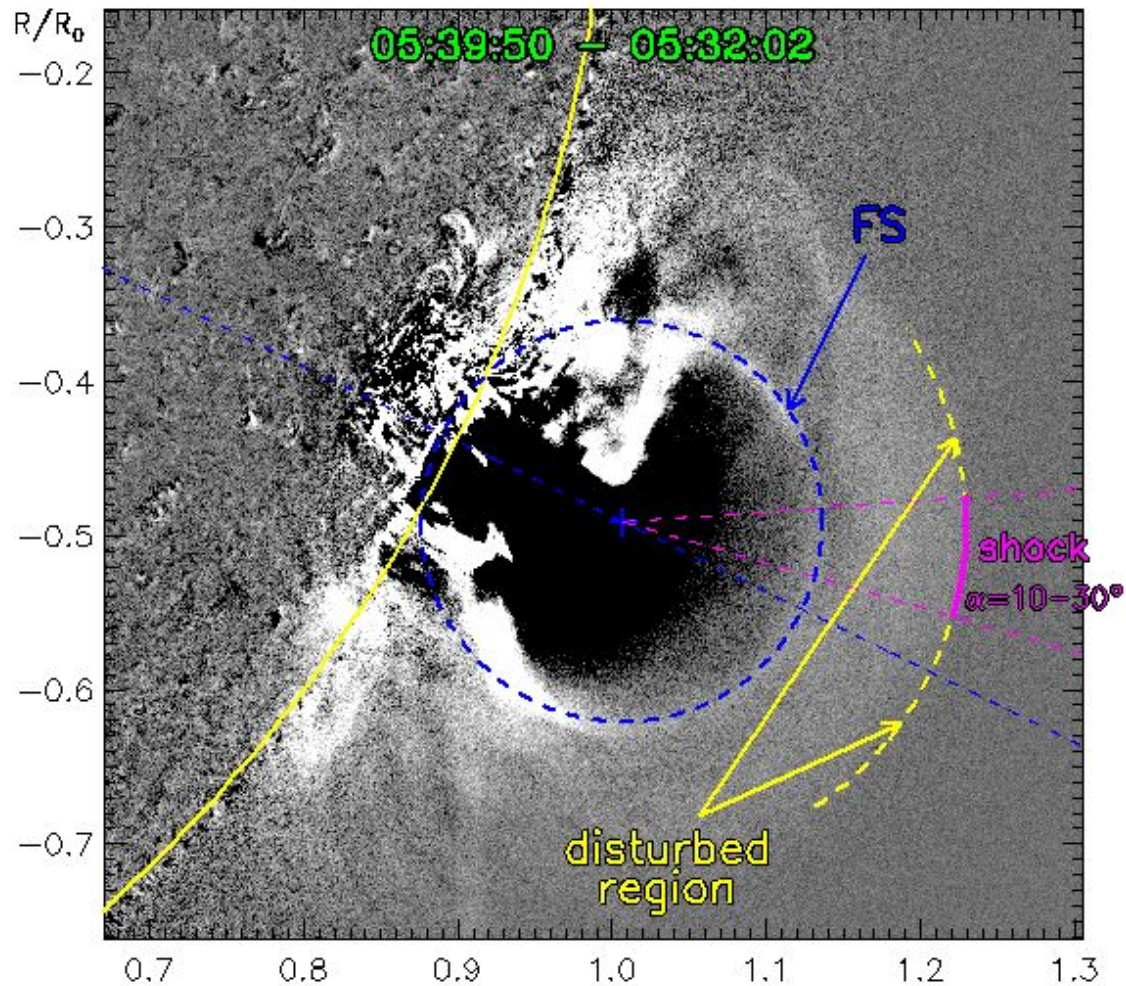
Распределения разностной яркости в пространстве



Распределения разностной яркости $\Delta P(r)$ в 05:39:50 для различных направлений $\alpha = 0^\circ - 40^\circ$ относительно линии $PA_C \approx 244^\circ$.



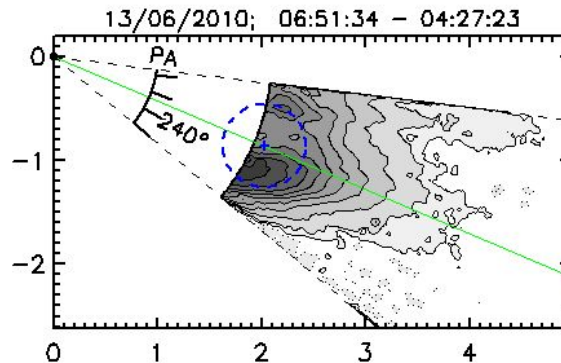
- Область направлений, в которых достаточно устойчиво существует разрыв, составляет $\alpha = 10^\circ - 30^\circ$ ($PA \approx 245^\circ - 250^\circ$);
- В направлениях $\alpha > 30^\circ$ и $\alpha < 10^\circ$, в основном, существует плавно спадающая с расстоянием возмущенная зона без разрыва;
- Наиболее устойчиво разрыв существует в направлении угла $\alpha = 25^\circ$.



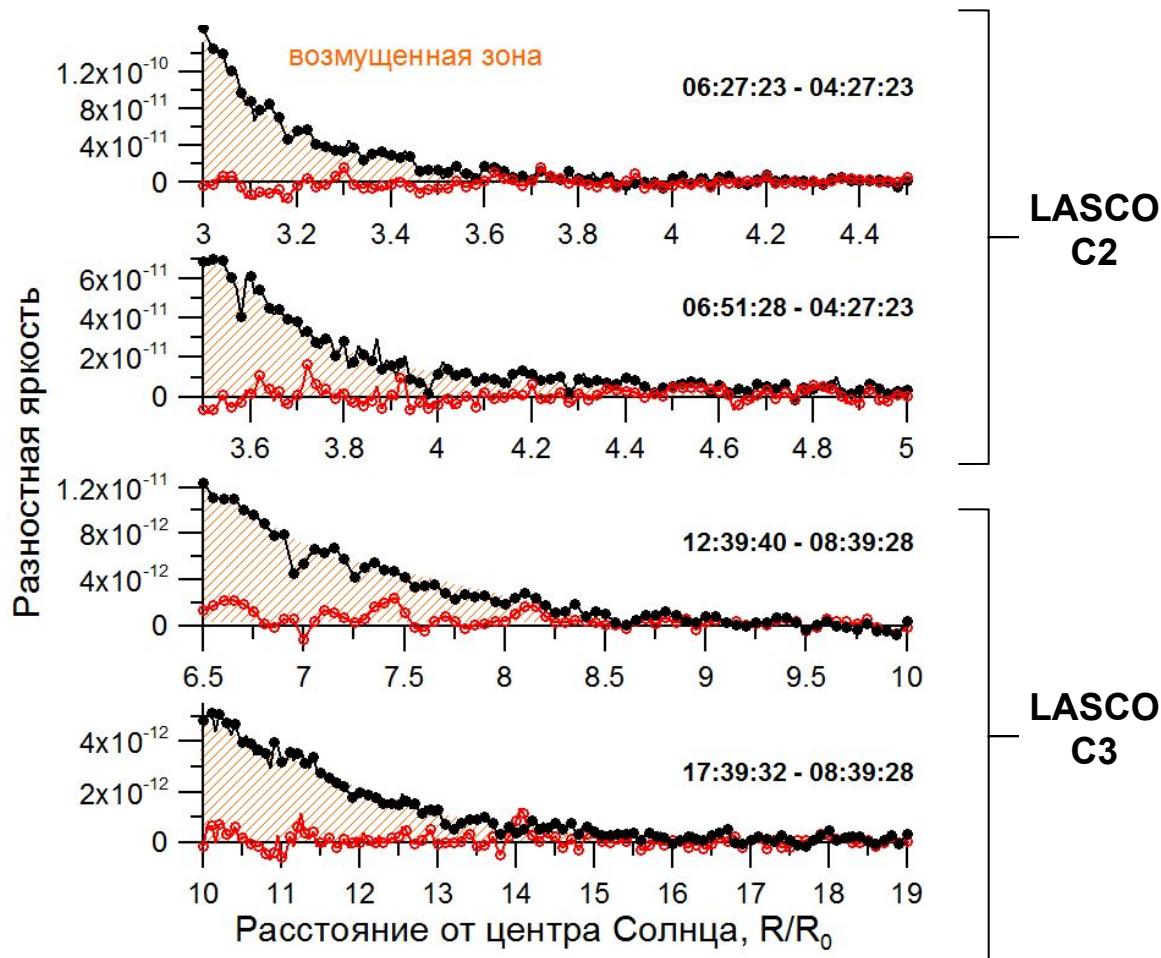
По изображениям разностной яркости, практически, невозможно отличить границу плавно спадающей разностной яркости возмущенной зоны от случаев с разрывом на границе. Показать разрыв можно только с использованием изложенной выше методики, которая связана с получением профилей $\Delta P(r)$ и сравнением их с профилем “шума” $\Delta P_N(r)$.

Профили разностной яркости белой короны для этого события на $PA = 247^\circ$ на больших расстояниях от Солнца по данным коронографов LASCO C2 и C3.

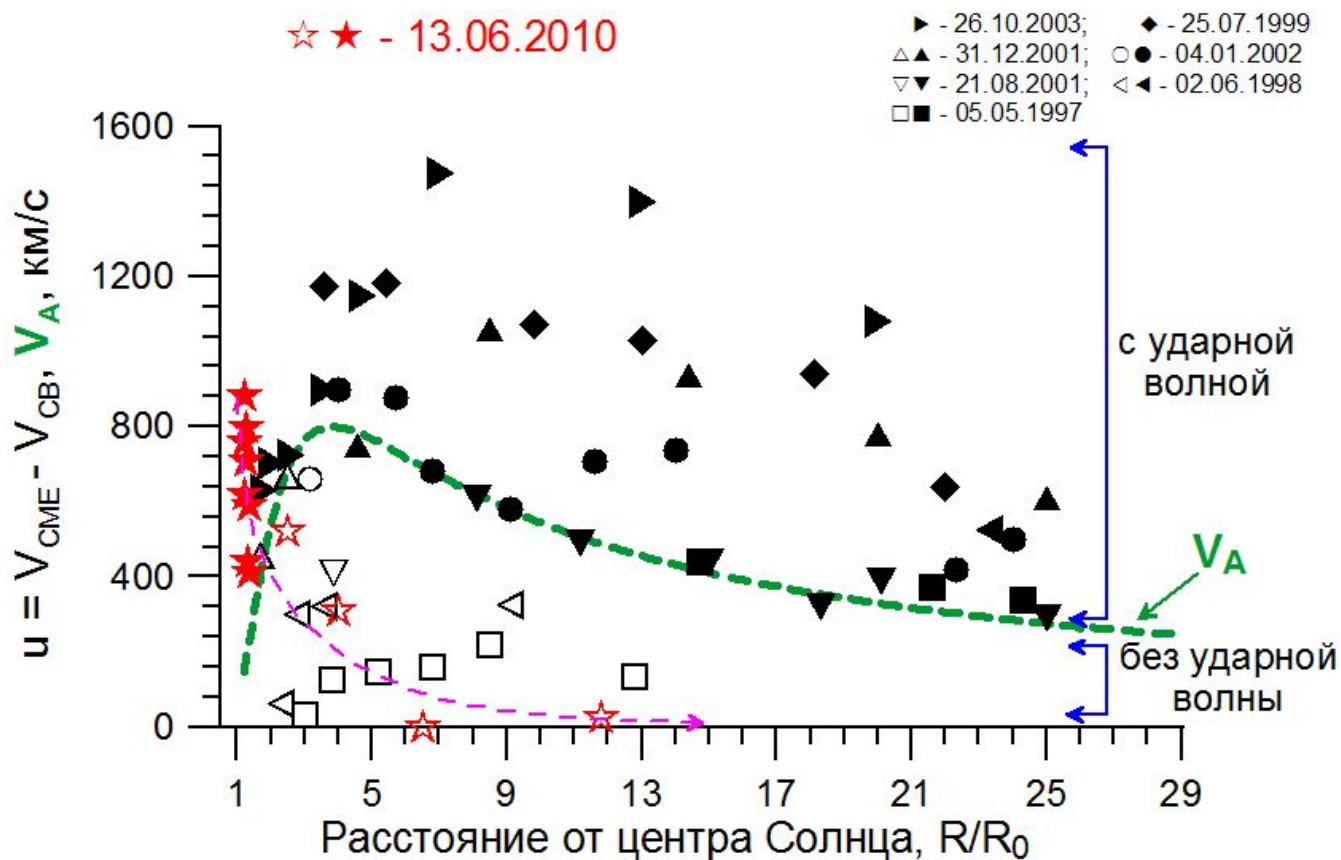
Скорость СМЕ постепенно падает, его возмущенная зона постепенно увеличивается, достигая на $R > 10R_0$ величины $\Delta R > 5R_0$. При этом фронт (ударная волна) отсутствует.



Данные коронографов SOHO/LASCO C2 и C3



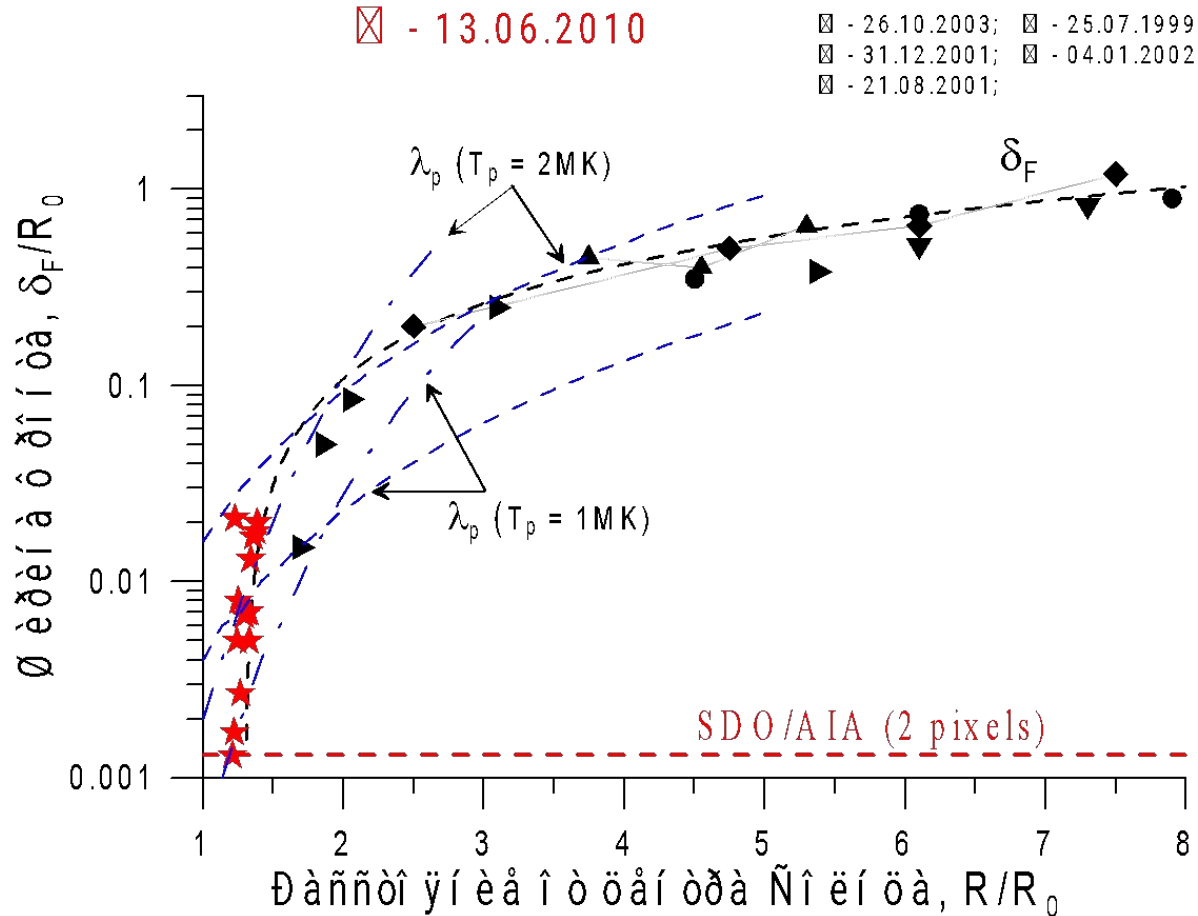
Скорость переднего края возмущенной зоны перед СМЕ относительно невозмущенного солнечного ветра



Зеленая пунктирная кривая – расчет альвеновской скорости $V_A(R)$, полученный в [Mann et al., 1999]

На $R \approx (1.2-1.3)R_0$ значения относительной скорости u разрыва показаны **красными звездочками**. На $R > 2R_0$ фронт отсутствовал. Измеренные на этих расстояниях значения относительной скорости u передней части возмущенной зоны представлены **светлыми красными звездочками**.

Изменение ширины ударного фронта с расстоянием



На расстояниях $R < 1.23R_0$ ширина фронта δ_F порядка пространственного разрешения инструмента AIA.

На $R > 1.23R_0$ величина $\delta_F \sim \lambda_p$ и, соответственно, растет с увеличением расстояния R .

Выводы

В событии 13 июня 2010 г., исследованного по данным AIA/SDO, показано, что впереди фронтальной структуры CME, постепенно возникает возмущенная зона, размер которой увеличивается по мере удаления CME от Солнца. Ударный разрыв формируется в передней части возмущенной зоны **только в очень узком диапазоне углов $PA \approx 245^\circ-250^\circ$** . Он по своим характеристикам удовлетворяет поршневой столкновительной ударной волне. В остальных направлениях относительно оси движения CME ($PA < 245^\circ$ и $PA > 250^\circ$) существует только возмущенная зона и устойчивый разрыв отсутствует.

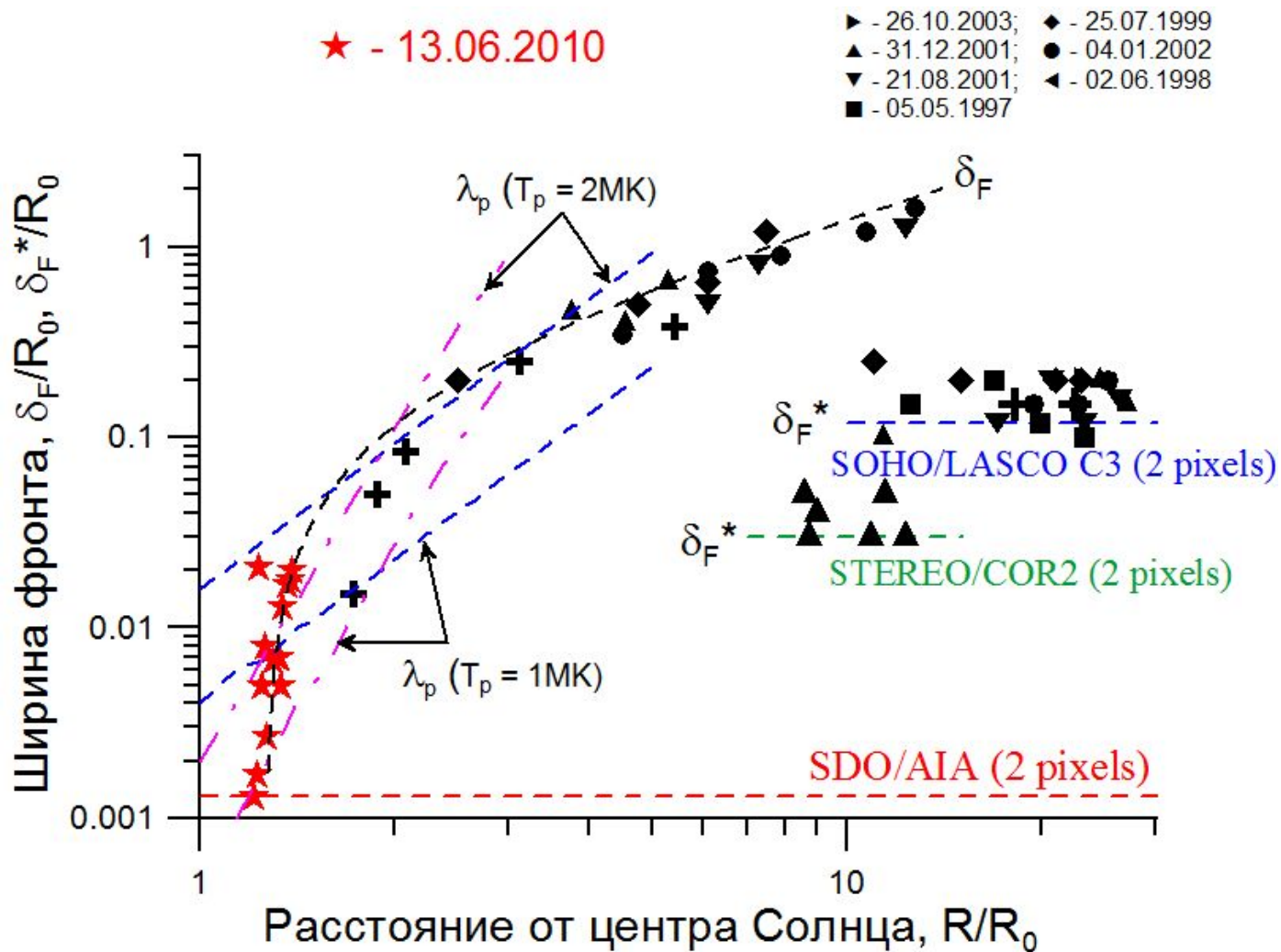
Анализ CME 13 июня 2010 г. подтвердил ранее установленные законы формирования поршневой ударной волны перед CME, которые сводятся к следующему:

а) Формирование ударной волны перед CME в некоторой окрестности вдоль оси его распространения определяется выполнением локального неравенства $u(R) > V_A(R)$ и может осуществляться на различных расстояниях от Солнца.

б) На расстояниях $R < (6-8)R_0$ ширина ударного фронта δ_F порядка длины свободного пробега протонов λ_p и механизм диссипации энергии во фронте столкновительный.

Спасибо за внимание!

Изменение ширины ударного фронта с расстоянием



Скорость переднего края возмущенной зоны перед СМЕ относительно невозмущенного солнечного ветра

