

Светлой памяти Евгения Александровича Пономарева...

О существовании двух различных механизмов формирования спорадического солнечного ветра

*В. Г. Еселевич, М. В. Еселевич,
ИСЗФ СО РАН*

*“Высокоширотные гелиогеофизические явления”
3-4 сентября 2009 г., Иркутск*

Краткая история доказательства существования солнечного ветра (СВ)

Исторически, одна из первых основных задач в солнечно-земной физике формулировалась так: **какими факторами Солнце воздействует на околоземное пространство и какова их природа?**

Если в отношении излучения, как одного из этих факторов сомнений не было, то в отношении потока частиц от Солнца существовали сомнения: считалось, что корона Солнца статическая и протяженная, как минимум, до Земли.

В 1957-ом Е.А. Пономарев, а затем в 1958-ом Е. Parker теоретически показали, опираясь на известные к тому времени экспериментальные данные по короне Солнца, что от Солнца должен существовать поток плазмы. Он был назван солнечным ветром (СВ).

Начатые с 1961 г. прямые измерения параметров СВ на космических аппаратах подтвердили теоретические выводы, а величина потока частиц в СВ, рассчитанная Пономаревым, неплохо совпала с измеренной.

Поскольку конференция посвящена памяти Е.А. Пономарева, то хотелось бы сказать несколько слов об этой его работе и попытаться ответить на вопрос: *Почему работа Е.А. Пономарева, осталась мало известной научной общественности, а работа E.N. Parker, которая была опубликована на год позднее, широко известна и даже стала классической?*

Этому есть, как минимум, три причины:

1) В 50-х годах в США точка зрения о статичности солнечной короны была доминирующей. И руководство, которое ставило задачу E.N. Parker, тогда еще молодому и неизвестному сотруднику, имело цель, чтобы он теоретически обосновал и поставил окончательную точку в доказательстве статичности короны. А Parker сделал все с точностью наоборот. Это вызвало определенный резонанс. Спустя 3-4 года советские и затем американские спутниковые измерения подтвердили правоту Parker. И это сразу сделало его имя известным.

В случае с Е.А. Пономаревым ситуация была обратной. Его шеф С.К. Всехсвятский с сотрудниками были убеждены в существовании СВ, и работа Е.А. Пономарева теоретически обосновывала эту точку зрения.

2) Parker опубликовал свою работу англоязычном *Astrophysical Journal*, имеющем широкую международную аудиторию читателей, а Пономарев в советском *Астрономическом Журнале*, круг читателей которого существенно меньше.

3) Parker до сих пор продолжает работать в области Солнца и СВ, а Пономарев полностью сменил тематику, перейдя в область ионосферы и магнитосферы.

Пионерские работы Е.А. Пономарева и E.N. Parker, предсказав существование СВ, как результат теплового расширения корональной плазмы с температурой $T \approx 10^6$ °К, не ответили на другой, не менее важный вопрос: *Каков механизм возникновения СВ на поверхности Солнца?* Дело в том, что наблюдаемые вблизи фотосферы на высотах менее 1000 км. потоки плазмы, направленные от Солнца, почти на два порядка превосходят потоки, которые должны были бы быть при обычном тепловом расширении фотосферной плазмы с температурой $T \approx 6 \cdot 10^3$ °К.

Другими словами: наблюдаемый поток плазмы от фотосферы в корону настолько велик, что для его возникновения необходимо действия механизма, более эффективного, чем обычное тепловое расширение.

За прошедшие с того времени 50 лет исследования по этой проблеме велись во многих научных коллективах, в том числе, и в нашем институте (ИСЗФ).

Попытаемся взглянуть на историю этих исследований и оценить их современное состояние.

Общие свойства СВ в гелиосфере, установленные к настоящему времени

1. СВ состоит из потоков различного типа
2. Долговременную основу СВ составляют **квазистационарный СВ**, источники которого на Солнце существуют более суток, недели и даже месяцы.
3. **Квазистационарный СВ** – это совокупность сравнительно слабо взаимодействующих между собой потоков плазмы двух типов: **медленного СВ**, берущего начало в поясе стримеров, и **быстрого СВ**, истекающего из корональных дыр.
Механизм возникновения **обоих типов квазистационарного СВ** остается до сих пор не известным, хотя и существует несколько различных теоретических моделей их формирования.

4. По квазистационарному СВ, время от времени, распространяется **спорадический СВ**, источники которого на Солнце существуют менее суток.

В короне Солнца **спорадическому СВ** соответствуют **корональные выбросы массы** или **СМЕ** (английская аббревиатура).

Возможно, что **квазистационарный СВ** и **СМЕ** имеют общую природу, а различаются они лишь по каким-то количественным характеристикам. Поэтому прогресс в исследовании одного типа СВ, может способствовать в понимании природы других типов СВ.

В последние годы наиболее интересные результаты были получены в области изучения **СМЕ**.

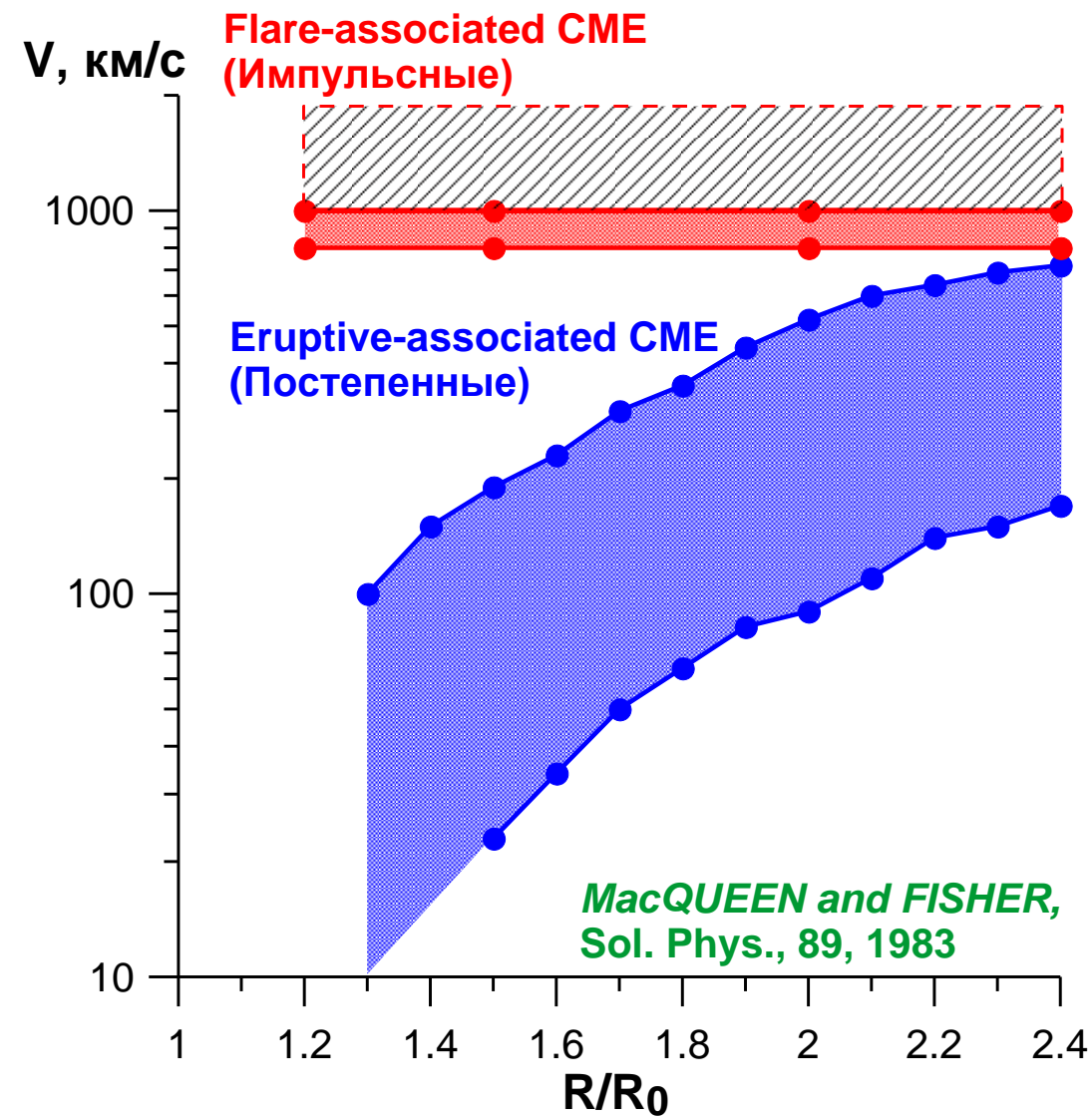
Основу данного доклада составят новые, еще не опубликованные результаты, полученные в нашем институте в течение последнего года.

Краткий обзор исследований СМЕ

Вплоть до конца 80-х годов XX-го столетия у исследователей существовала **абсолютная** убежденность в том, что источником спорадических потоков СВ (а значит, и СМЕ), вызывающих наиболее мощные магнитосферные бури, являются **вспышки** на Солнце.

Первая серьезная попытка выяснения возможного механизма возникновения СМЕ и роли вспышек в нем была предпринята в работе *MacQueen and Fisher, 1983*. Они исследовали зависимость скорости СМЕ V от расстояния R от центра Солнца (на $R > 1.2R_0$) для СМЕ со скоростями ≈ 60 -900 км/с (R_0 – радиус Солнца).

Авторы сделали два важных вывода, которые, во многом, определили направленность последующих исследований СМЕ.



Вывод 1. Существуют два типа CME:

Тип 1: CME, связанные со вспышками или “импульсные” CME.

На расстояниях $R > 1.2R_0$ они имеют большие скорости $V > 800$ км/с и очень маленькое ускорение (с расстоянием скорость почти не меняется).

Тип 2: CME связанные с эруптивными протуберанцами или “постепенные” CME с меньшими скоростями ($V < 800$ км/с) и большими ускорениями (более 50 м/с²).

Вывод 2. Авторы предположили, что существует два различных механизма формирования СМЕ:

Импульсные СМЕ возникают в результате взрыва в короне на высотах $h = R - R_0 < 0.2R_0$ относительно фотосферы.

Постепенные СМЕ ускоряются под непрерывным действием силы на длине пути в несколько R_0 .

Около 20 лет назад (т.е. примерно в 1989 г.) в ИСЗФ состоялся семинар, на котором обсуждался доклад на тему: “Вспышки не могут быть источником быстрых СМЕ, а значит, не могут быть источником мощных магнитосферных бурь”.

Обоснование этого утверждения было очень простым: была оценена кинетическая энергия самых быстрых СМЕ, которая оказалась в несколько раз больше энергии самых мощных вспышек. Отсюда следовал очевидный вывод: менее энергичный процесс не может породить более энергичный.

Очевидно, также, что этот вывод, вообще говоря, противоречил гипотезе из работы *MacQueen and Fisher, 1983*, согласно которой в качестве источника наиболее быстрых “импульсных” СМЕ рассматривался взрыв в короне на высотах $h < 0.2R_0$, под которой предполагалась вспышка.

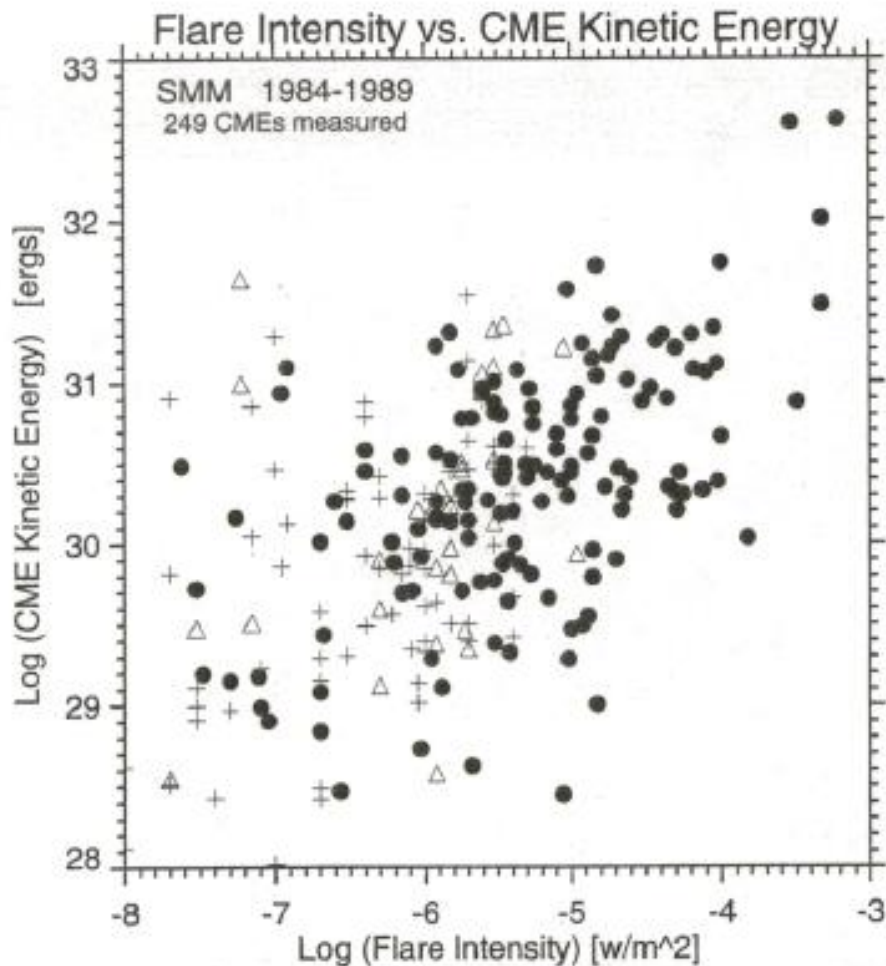
Исследования CME в последующие годы с 1989 по 2009 г. проводились по двум направлениям:

1. Вспышка, как возможный источник мощных CME.
2. Механизм возникновения CME.

Проводились исследования кинематики и динамики CME вблизи фотосферы на минимальных высотах. С этой целью анализировались одновременно с данными коронографов Mark 3 и 4, данные Digital Prominence Monitor (обсерватория MLSO), данные с космических аппаратов SOHO (LASCO, UVCS), TRACE, STEREO (COR1, EUVI). Развивались различные теоретические модели.

Какова же ситуация в настоящее время по этим двум направлениям исследований?

Вспышка, как возможный источник быстрых СМЕ



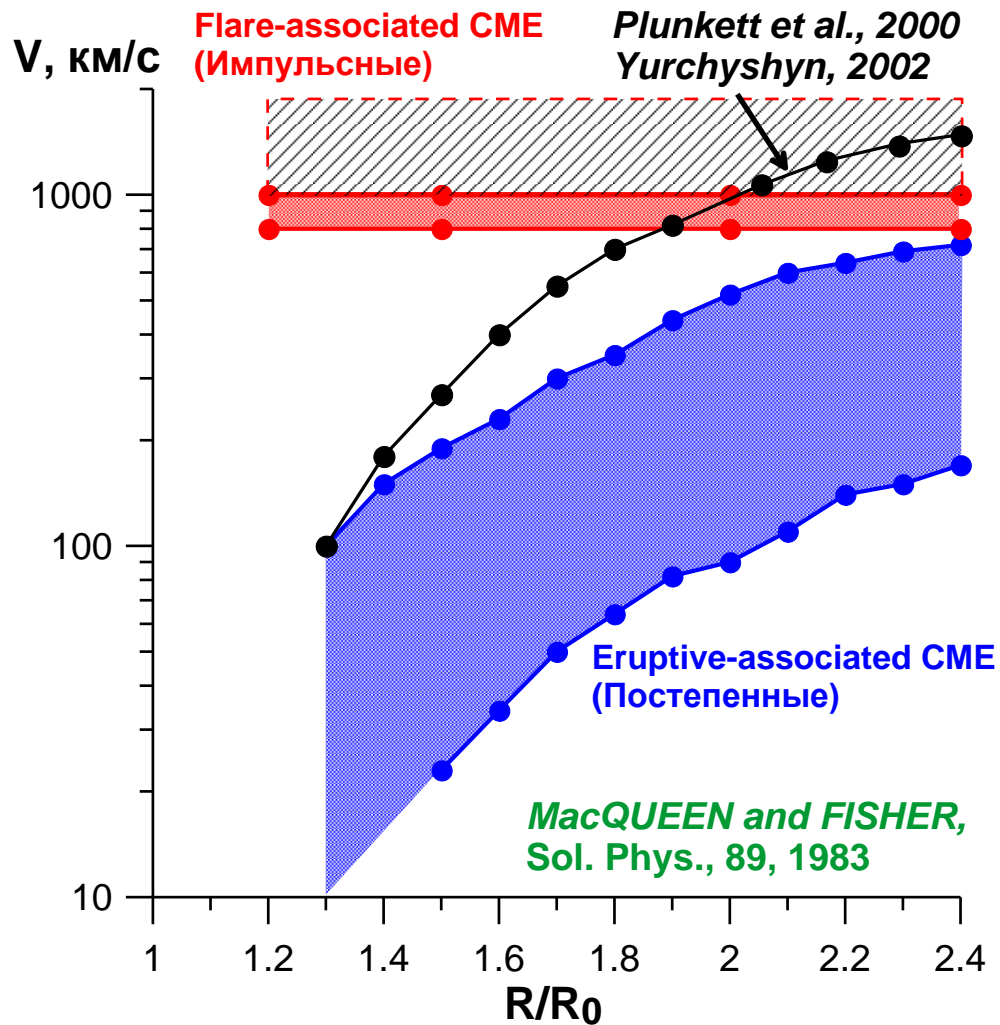
Зависимость, взятая из работы *Hundhausen, 1997*, для кинетической энергии СМЕ (E_K) от максимальной интенсивности мягкого рентгеновского излучения ($I_{\text{макс}}$) связанной с ним вспышки (т.е. рентгеновского балла вспышки)

Максимальная величина $E_K \approx 6 \times 10^{32}$ эрг почти в два раза превышает энергию самой мощной вспышки ($\approx 3 \times 10^{32}$ эрг).

А если учесть, что полная энергия СМЕ ($E_{\text{полн}}$) включает, кроме кинетической, еще потенциальную, магнитную энергии и энергию ударной волны, то различие может оказаться еще больше.

Два существенных добавления

Добавление 1. До сих пор не найдено примеров СМЕ, источником которых однозначно была бы вспышка. А то, что источником многих СМЕ не является вспышка – установлено надежно.



Добавление 2. Разделение на импульсные и постепенные CME, по прежнему существует.

Однако, *Plunkett et al., 2000; Yurchyshyn, 2002* было показано, что быстрые CME могут иметь заметное ускорение, при этом конечная скорость набирается на отрезке пути до нескольких солнечных радиусов.

Это означает, что величина скорости не является определяющим параметром для разделения CME на импульсные и постепенные.

Что может быть признаком такого разделения?

Ответив на этот вопрос, можно продвинуться в понимании **механизма формирования СМЕ**.

Последним результатам исследований по этому вопросу посвящено это сообщение.

Для анализа были отобраны события, в которых:

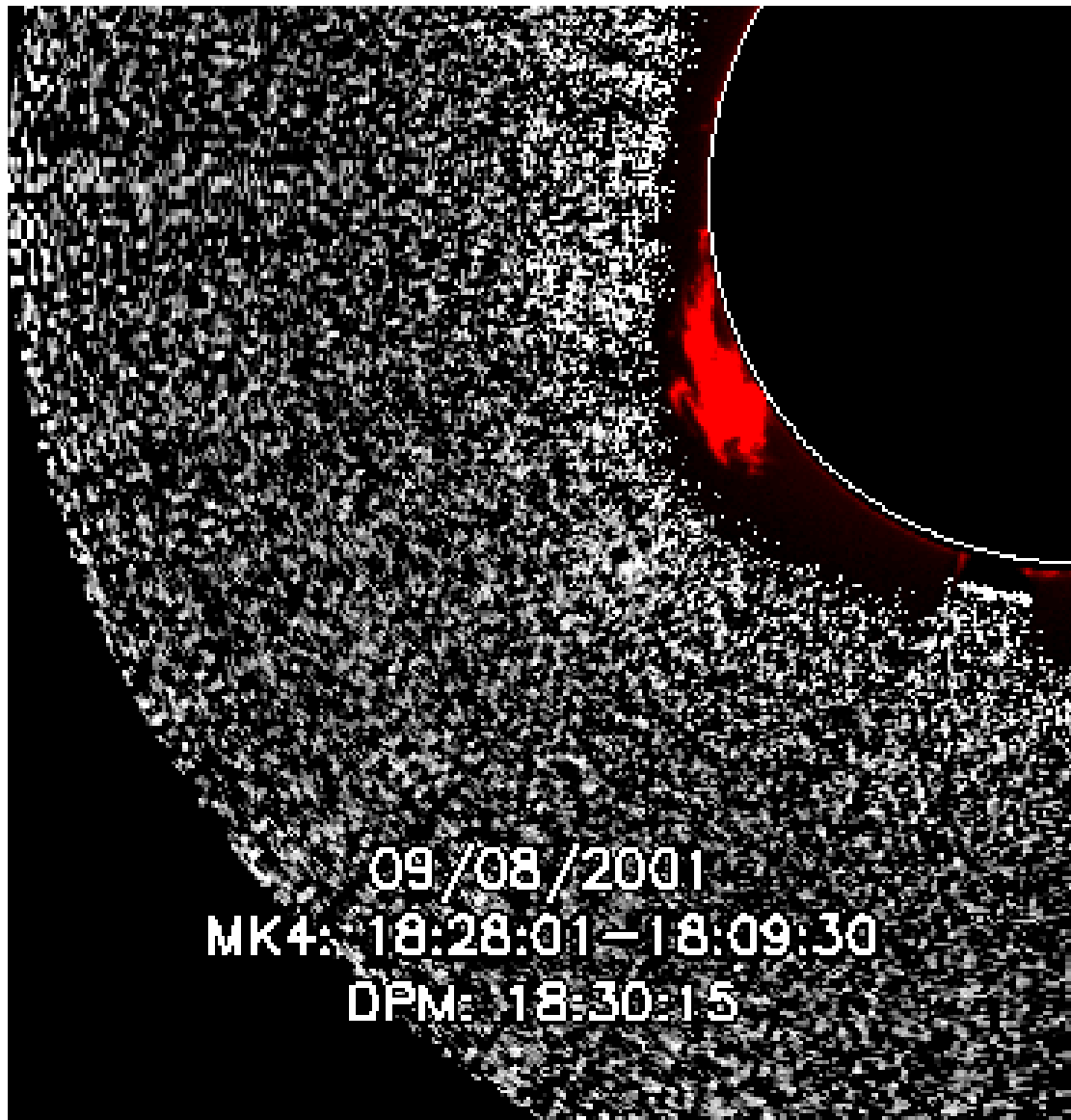
- 1. Распространение СМЕ происходит в картинной плоскости.*
- 2. Имелись необходимые данные для СМЕ, как минимум, на инструментах Mark 3 и 4, и Digital Prominence Monitor (обсерватория MLSO, наблюдения осуществляются каждый день с 17:00 и до 24:00 UT).*

Начиная с 1980 года, было отобрано **18** таких событий.

Для того, чтобы обнаружить и исследовать разницу между **импульсными** и **постепенными** СМЕ был использован следующий прием: совмещались изображения короны в белом свете и в свете линии $H\alpha$. Исследовалась динамика таких совмещенных изображений во времени. Такой подход позволил не только качественно, но количественно исследовать различия между этими двумя типами СМЕ, поскольку:

- ✓ Свечение белой короны отражает концентрацию высокотемпературной ($T \sim 10^6$ К) плазмы (данные Mark 4, на совмещенных изображениях показано в градациях серого).
- ✓ Свечение в линии $H\alpha$ - концентрацию атомов водорода относительно холодной плазмы с температурой $T \sim 10^4$ °К (данные DPM, , на совмещенных изображениях показано **красным цветом**).

Рассмотрим сначала **постепенные**, а затем **импульсные** СМЕ. Напомним, что **постепенные** СМЕ, обычно, сопровождаются эрупцией протуберанца и не связаны со вспышкой.



Постепенный СМЕ

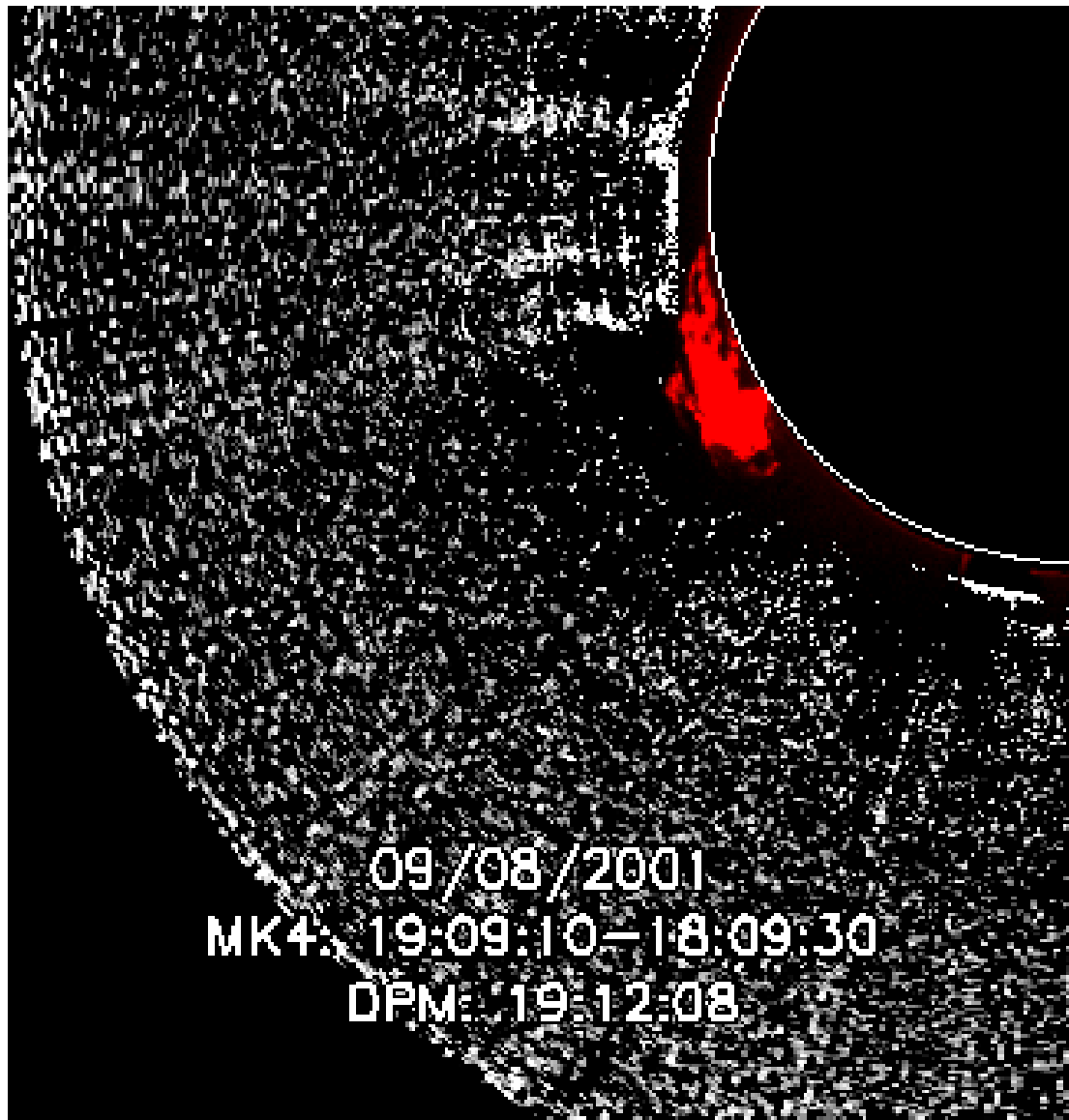
с эрупцией протуберанца

9 августа 2001 г.

$V \approx 910$ км/с

Протуберанец виден до начала СМЕ (максимум яркости $H\alpha$ на $h \approx 0.125R_0$)

Впереди него постепенно “прорисовывается” и усиливается кольцо плазмы, которое замыкается на протуберанце и составляет основу фронтальной структуры СМЕ.



Постепенный СМЕ

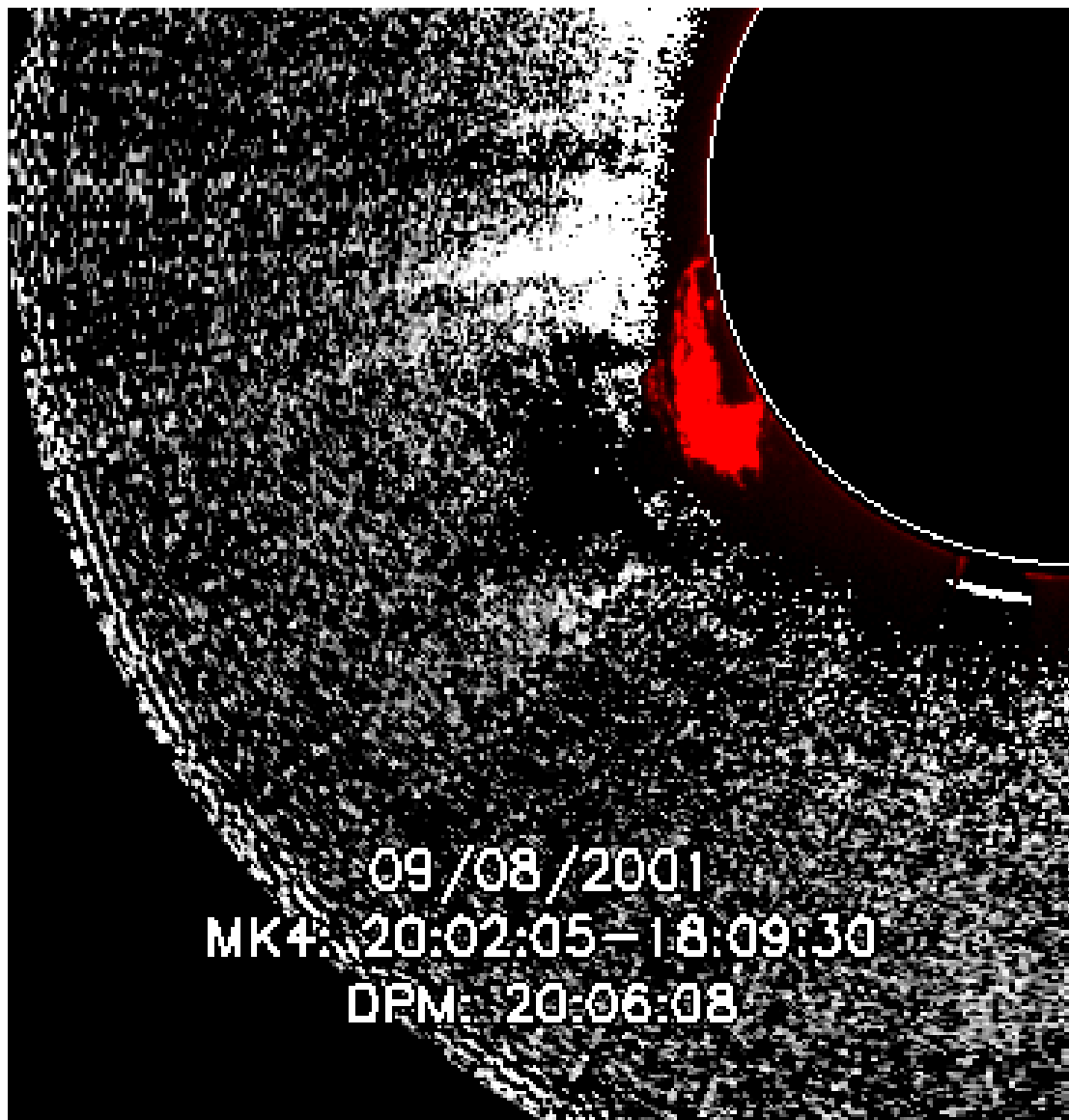
с эрупцией протуберанца

9 августа 2001 г.

$V \approx 910$ км/с

Протуберанец виден до начала СМЕ (максимум яркости $H\alpha$ на $h \approx 0.125R_0$)

Впереди него постепенно “прорисовывается” и усиливается кольцо плазмы, которое замыкается на протуберанце и составляет основу фронтальной структуры СМЕ.



Постепенный СМЕ

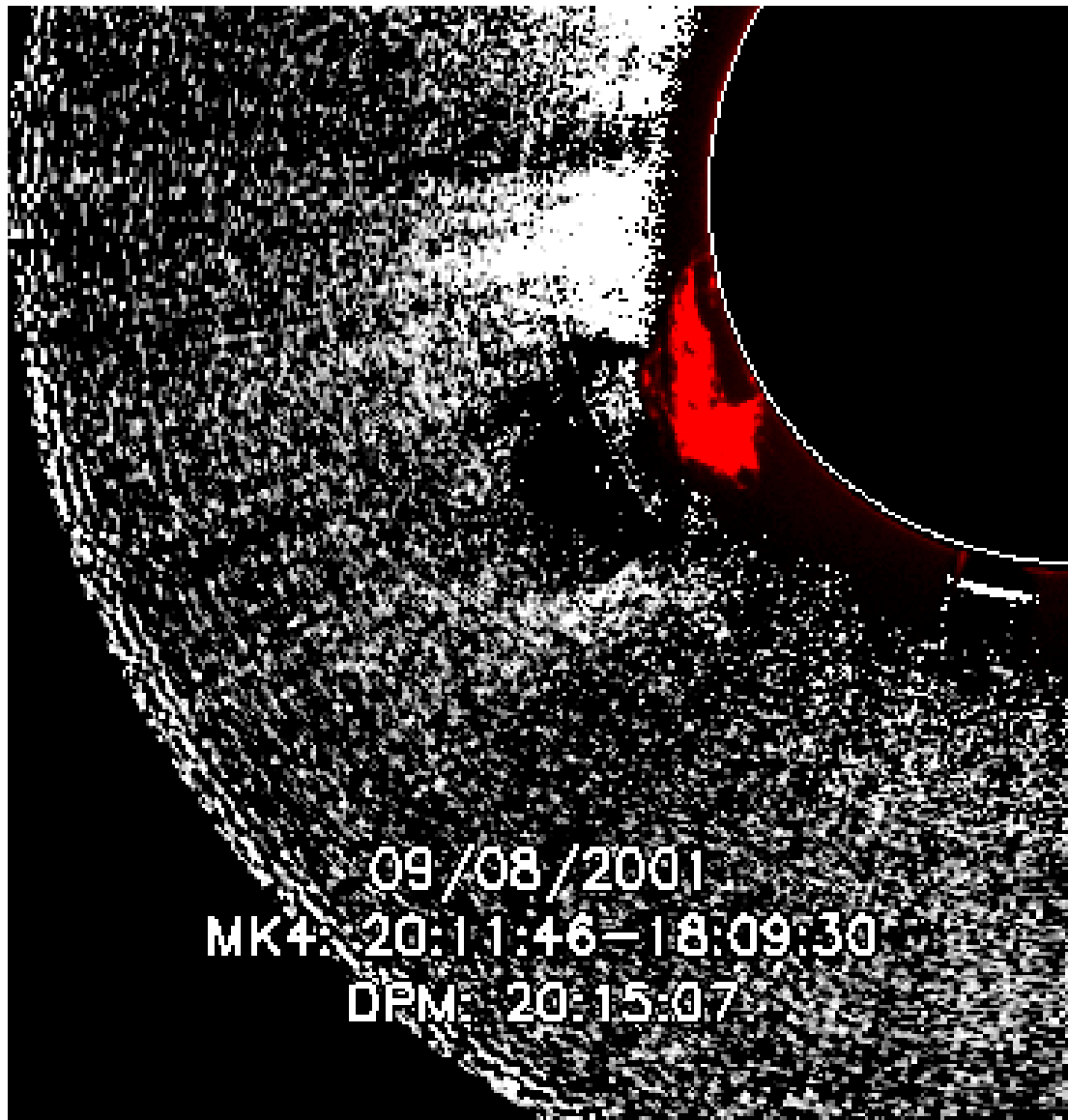
с эрупцией протуберанца

9 августа 2001 г.

$V \approx 910$ км/с

Протуберанец виден до начала СМЕ (максимум яркости $H\alpha$ на $h \approx 0.125R_0$)

Впереди него постепенно “прорисовывается” и усиливается кольцо плазмы, которое замыкается на протуберанце и составляет основу фронтальной структуры СМЕ.



Постепенный СМЕ

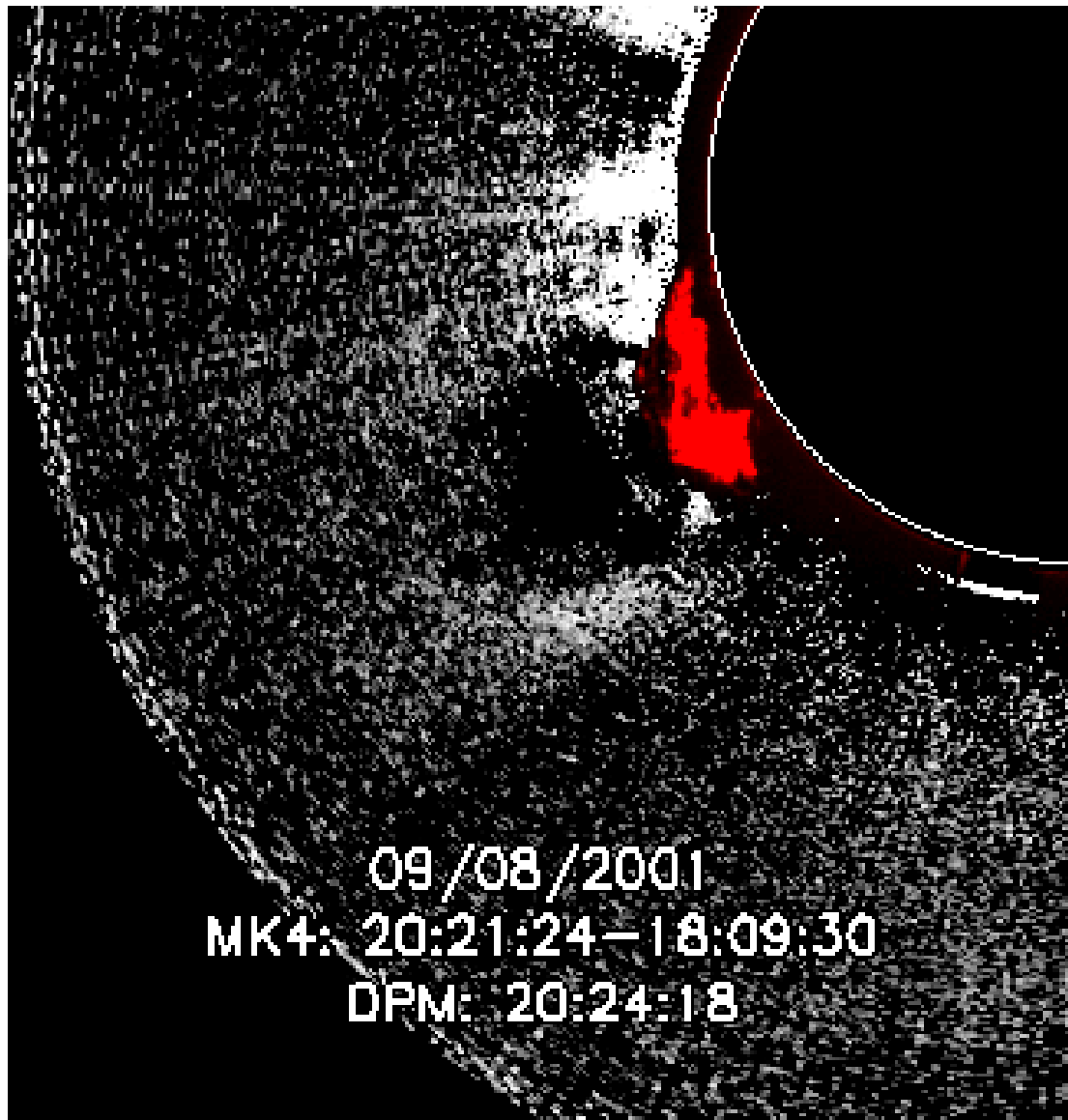
с эрупцией протуберанца

9 августа 2001 г.

$V \approx 910$ км/с

Протуберанец виден до начала СМЕ (максимум яркости $H\alpha$ на $h \approx 0.125R_0$)

Впереди него постепенно “прорисовывается” и усиливается кольцо плазмы, которое замыкается на протуберанце и составляет основу фронтальной структуры СМЕ.



Постепенный СМЕ

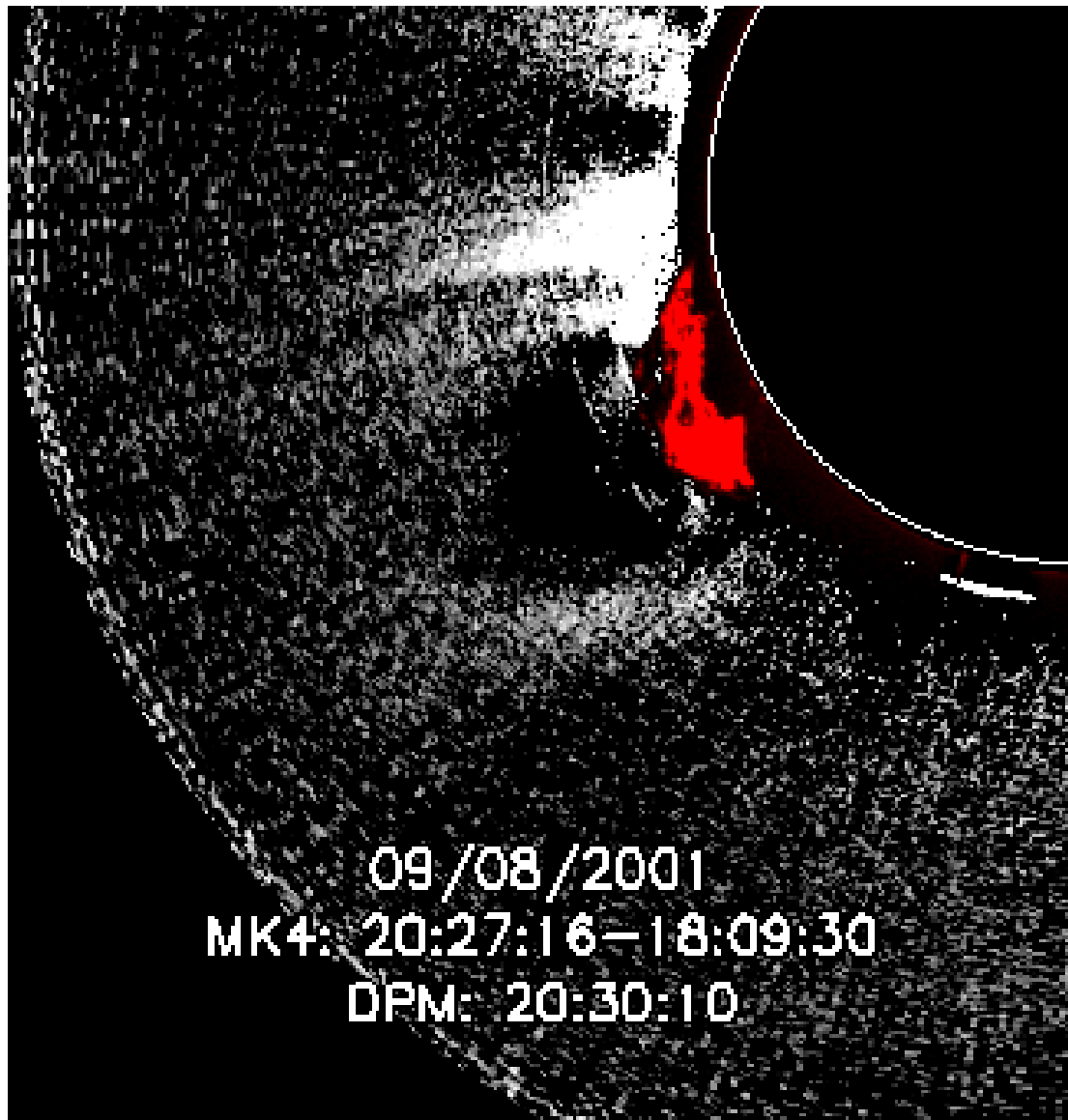
с эрупцией протуберанца

9 августа 2001 г.

$V \approx 910$ км/с

Протуберанец виден до начала СМЕ (максимум яркости $H\alpha$ на $h \approx 0.125R_0$)

Впереди него постепенно “прорисовывается” и усиливается кольцо плазмы, которое замыкается на протуберанце и составляет основу фронтальной структуры СМЕ.



Постепенный СМЕ

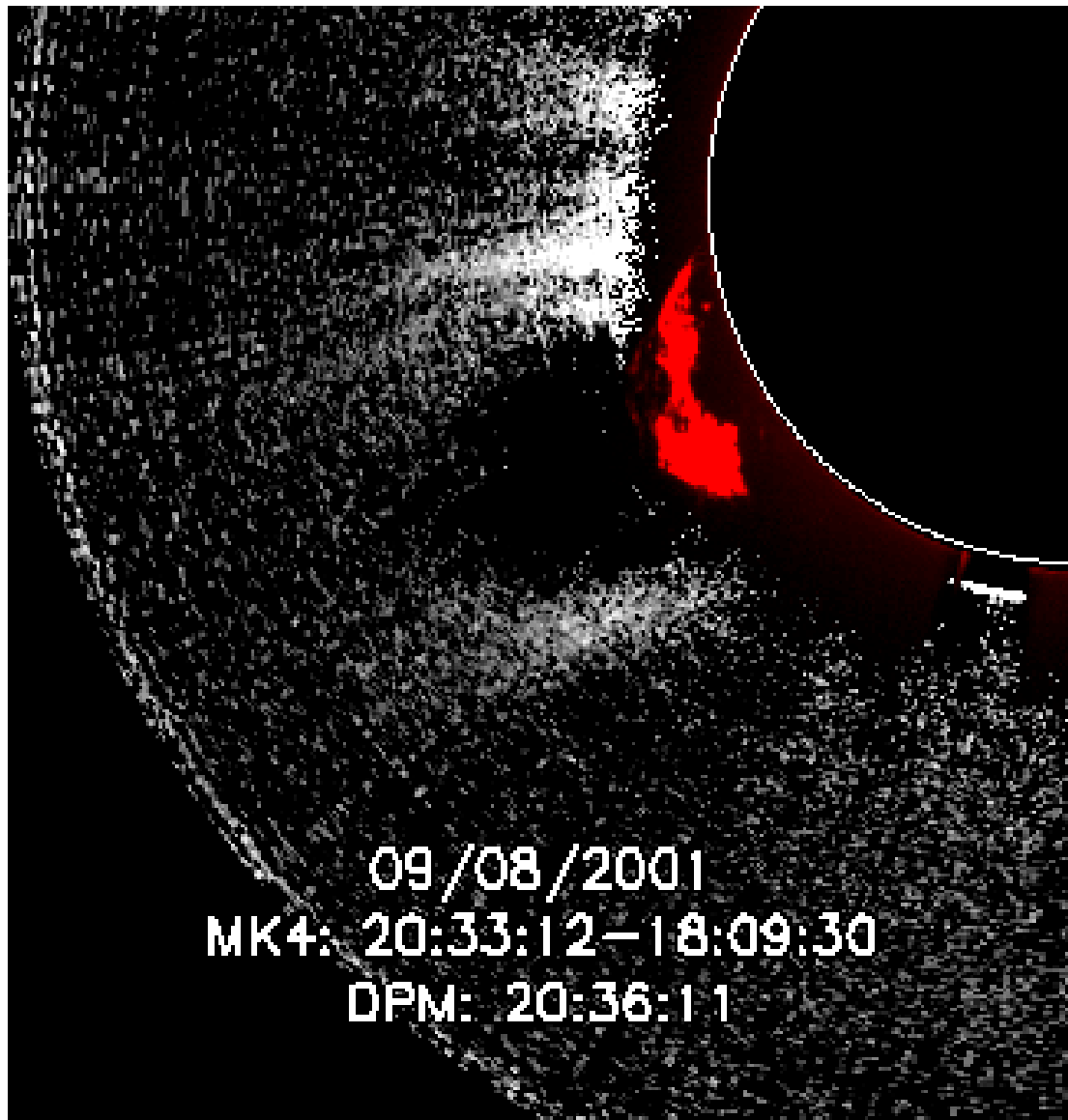
с эрупцией протуберанца

9 августа 2001 г.

$V \approx 910$ км/с

Протуберанец виден до начала СМЕ (максимум яркости $H\alpha$ на $h \approx 0.125R_0$)

Впереди него постепенно “прорисовывается” и усиливается кольцо плазмы, которое замыкается на протуберанце и составляет основу фронтальной структуры СМЕ.



Постепенный СМЕ

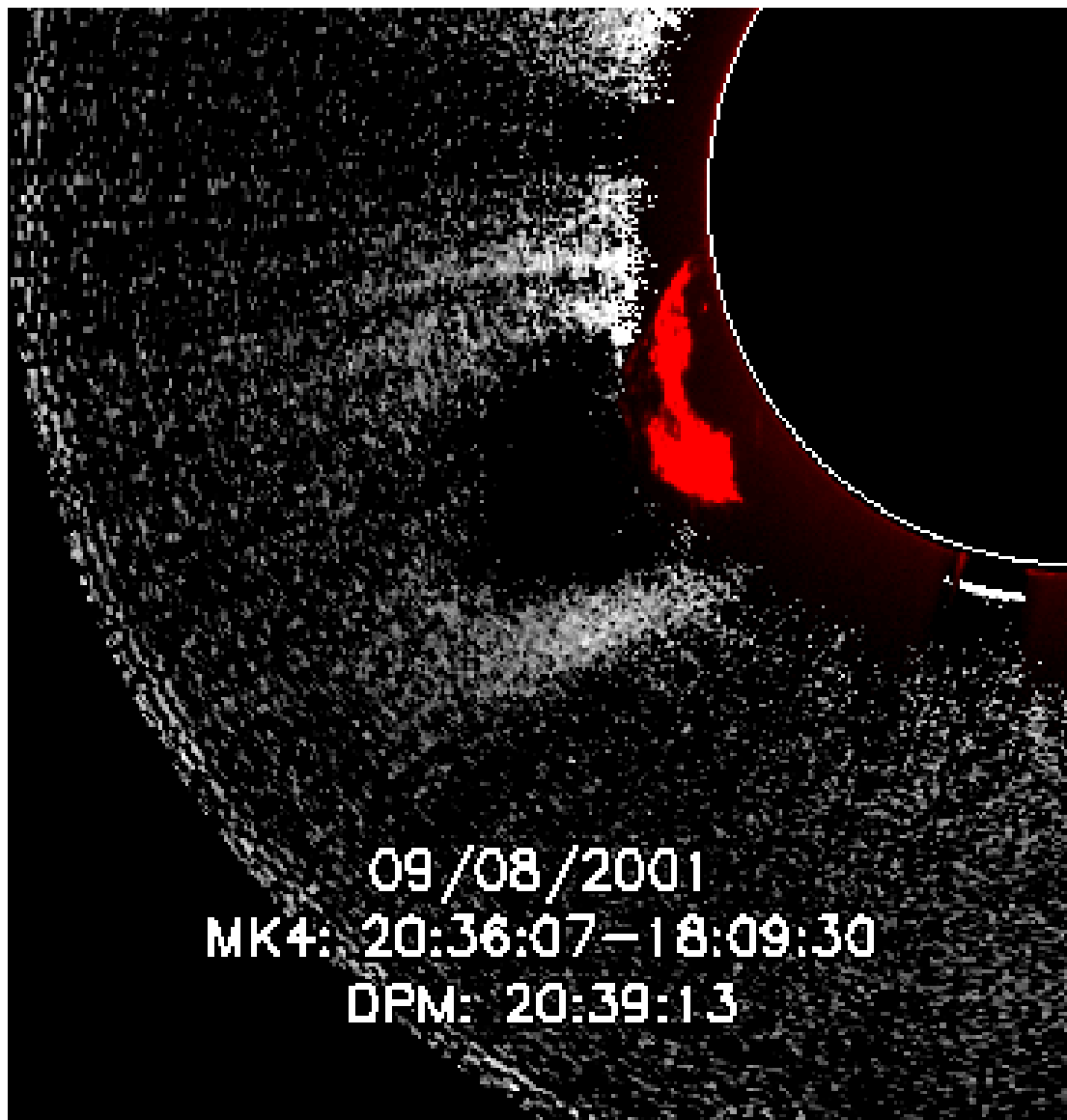
с эрупцией протуберанца

9 августа 2001 г.

$V \approx 910$ км/с

Протуберанец виден до начала СМЕ (максимум яркости $H\alpha$ на $h \approx 0.125R_0$)

Впереди него постепенно “прорисовывается” и усиливается кольцо плазмы, которое замыкается на протуберанце и составляет основу фронтальной структуры СМЕ.



Постепенный СМЕ

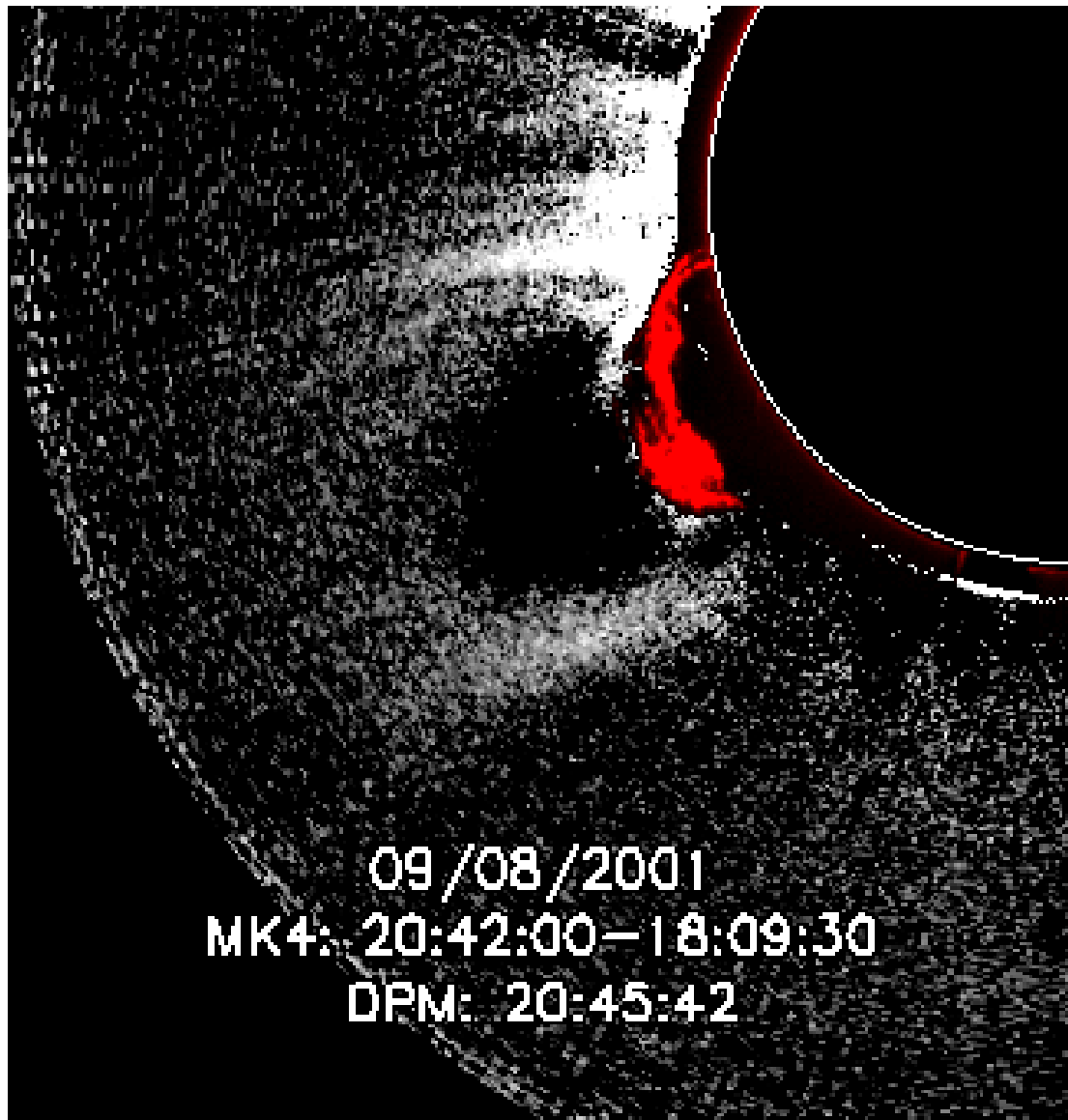
с эрупцией протуберанца

9 августа 2001 г.

$V \approx 910$ км/с

Протуберанец виден до начала СМЕ (максимум яркости $H\alpha$ на $h \approx 0.125R_0$)

Впереди него постепенно “прорисовывается” и усиливается кольцо плазмы, которое замыкается на протуберанце и составляет основу фронтальной структуры СМЕ.



09/08/2001

MK4: 20:42:00–18:09:30

DPM: 20:45:42

Постепенный CME

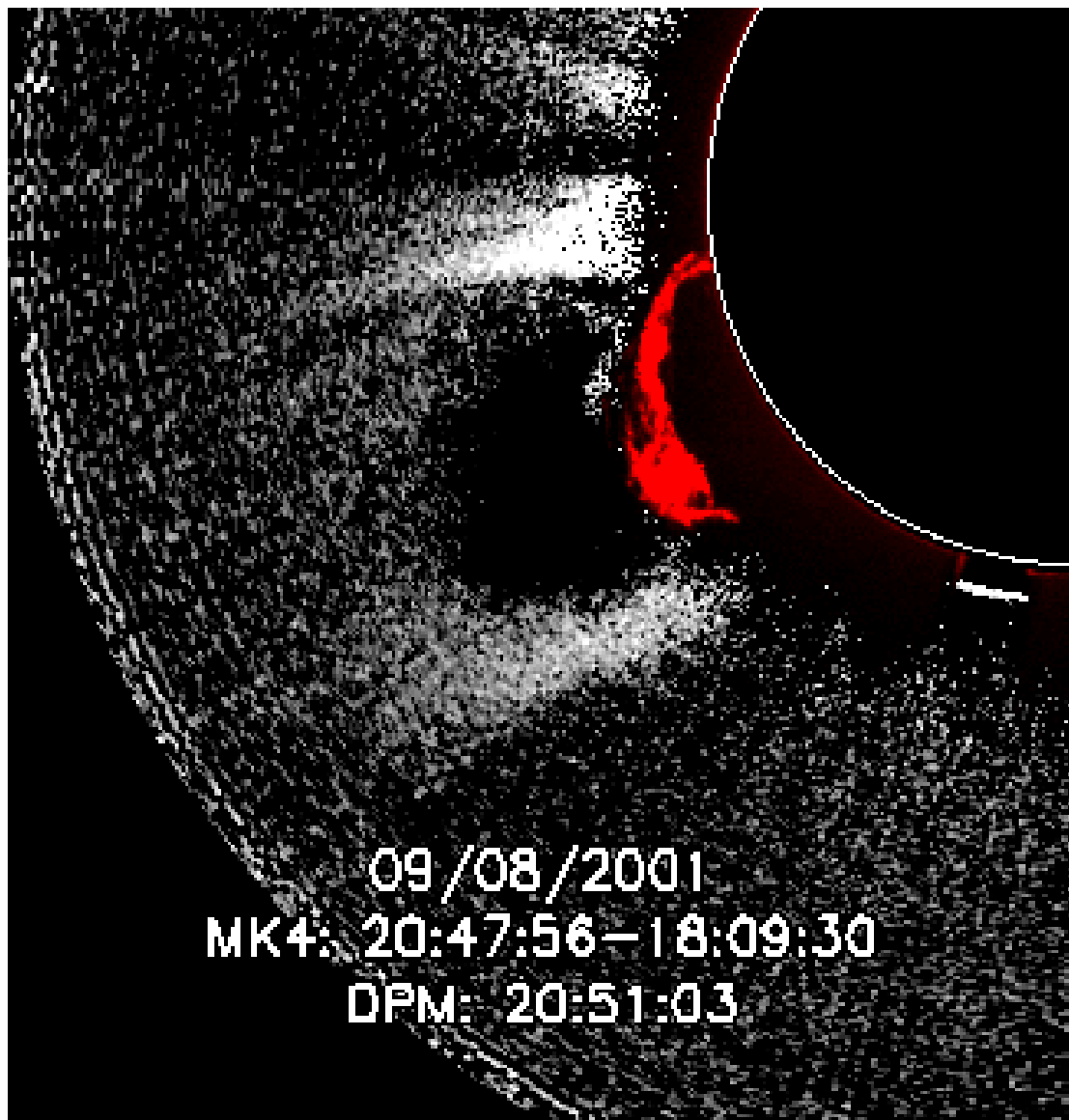
с эрупцией протуберанца

9 августа 2001 г.

$V \approx 910$ км/с

Протуберанец виден до начала CME (максимум яркости H α на $h \approx 0.125R_0$)

Впереди него постепенно “прорисовывается” и усиливается кольцо плазмы, которое замыкается на протуберанце и составляет основу фронтальной структуры CME.



Постепенный СМЕ

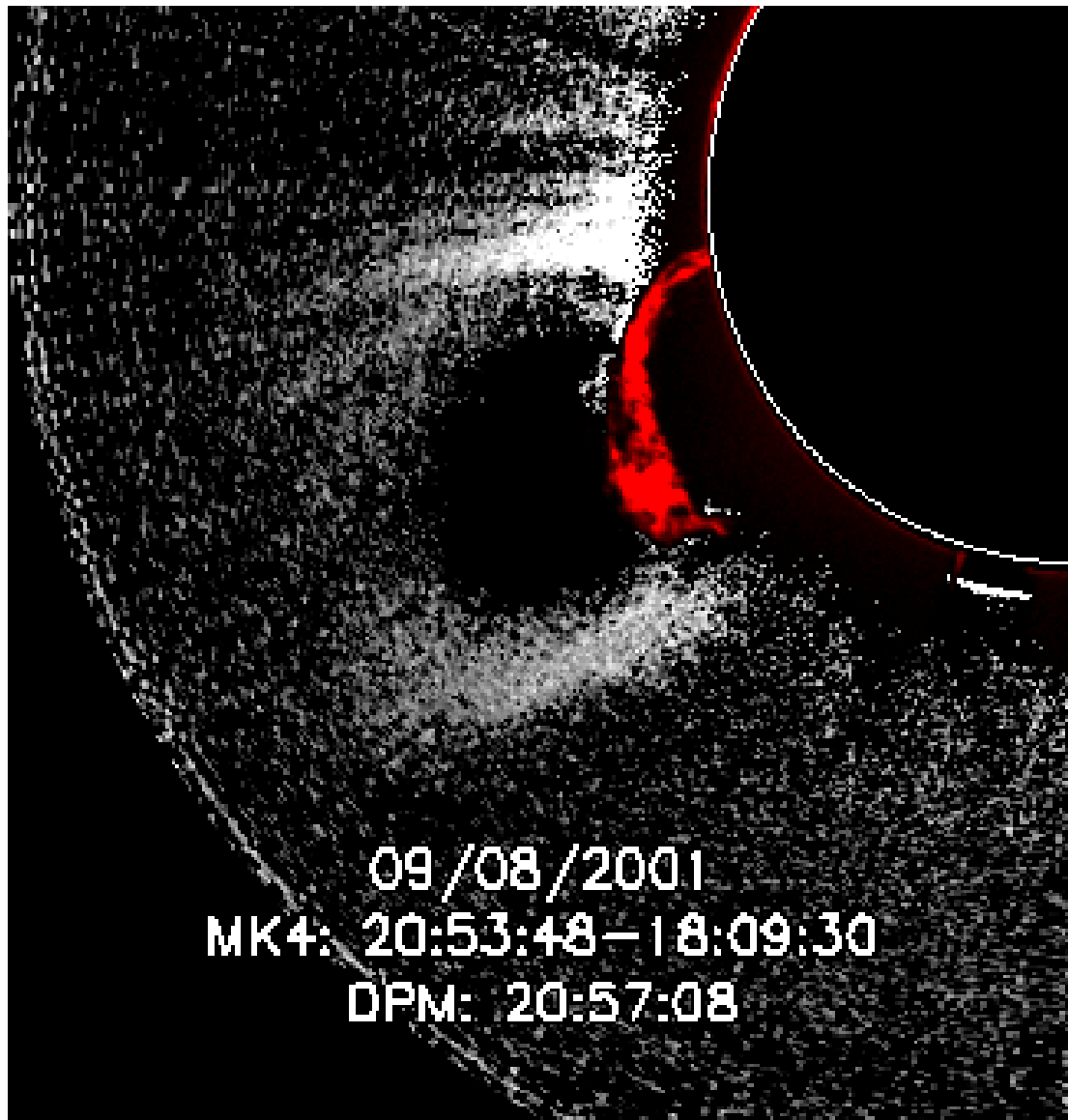
с эрупцией протуберанца

9 августа 2001 г.

$V \approx 910$ км/с

Протуберанец виден до начала СМЕ (максимум яркости $\text{H}\alpha$ на $h \approx 0.125R_0$)

Впереди него постепенно “прорисовывается” и усиливается кольцо плазмы, которое замыкается на протуберанце и составляет основу фронтальной структуры СМЕ.



Постепенный СМЕ

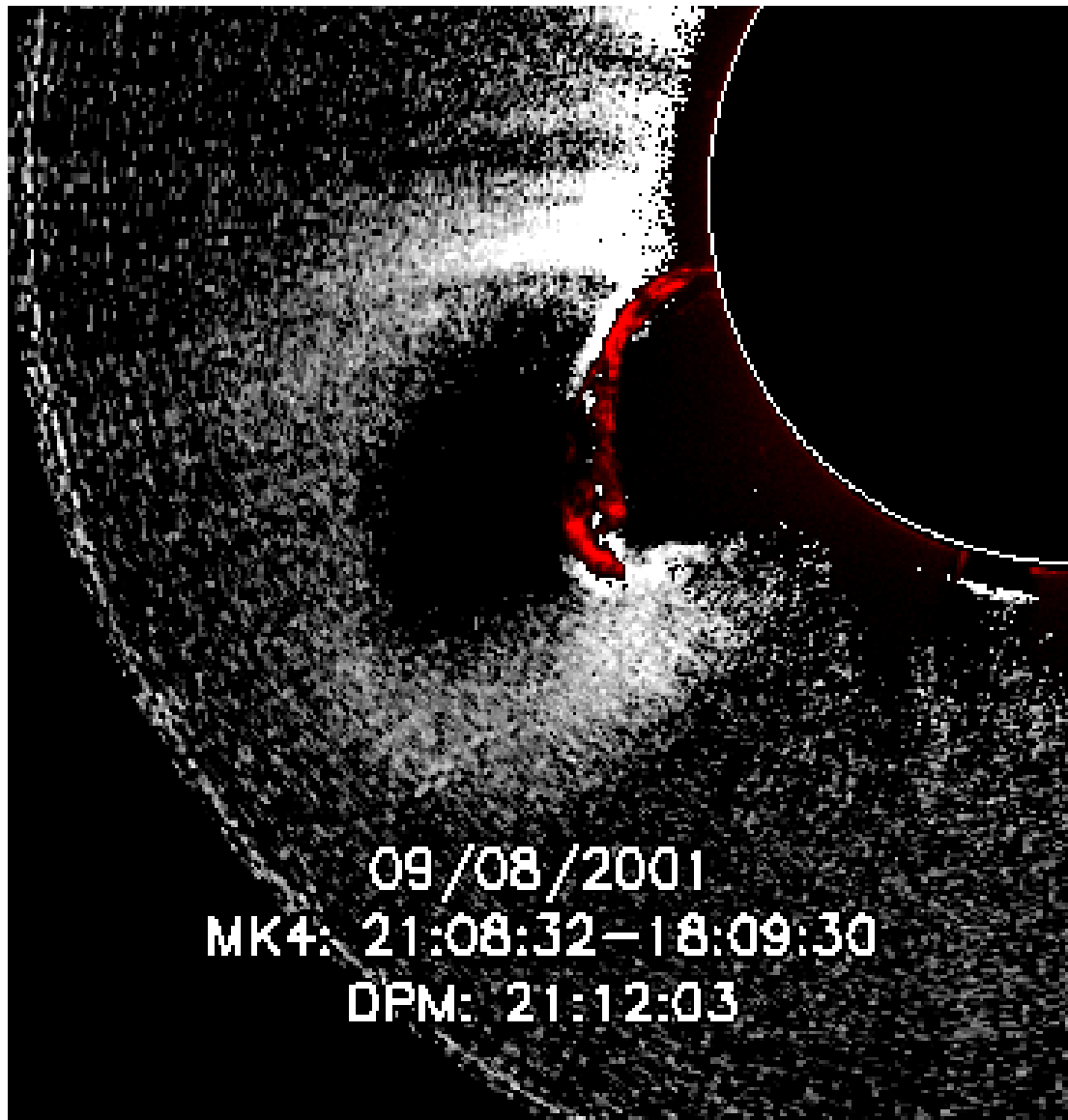
с эрупцией протуберанца

9 августа 2001 г.

$V \approx 910$ км/с

Протуберанец виден до начала СМЕ (максимум яркости $\text{H}\alpha$ на $h \approx 0.125R_0$)

Впереди него постепенно “прорисовывается” и усиливается кольцо плазмы, которое замыкается на протуберанце и составляет основу фронтальной структуры СМЕ.



Постепенный СМЕ

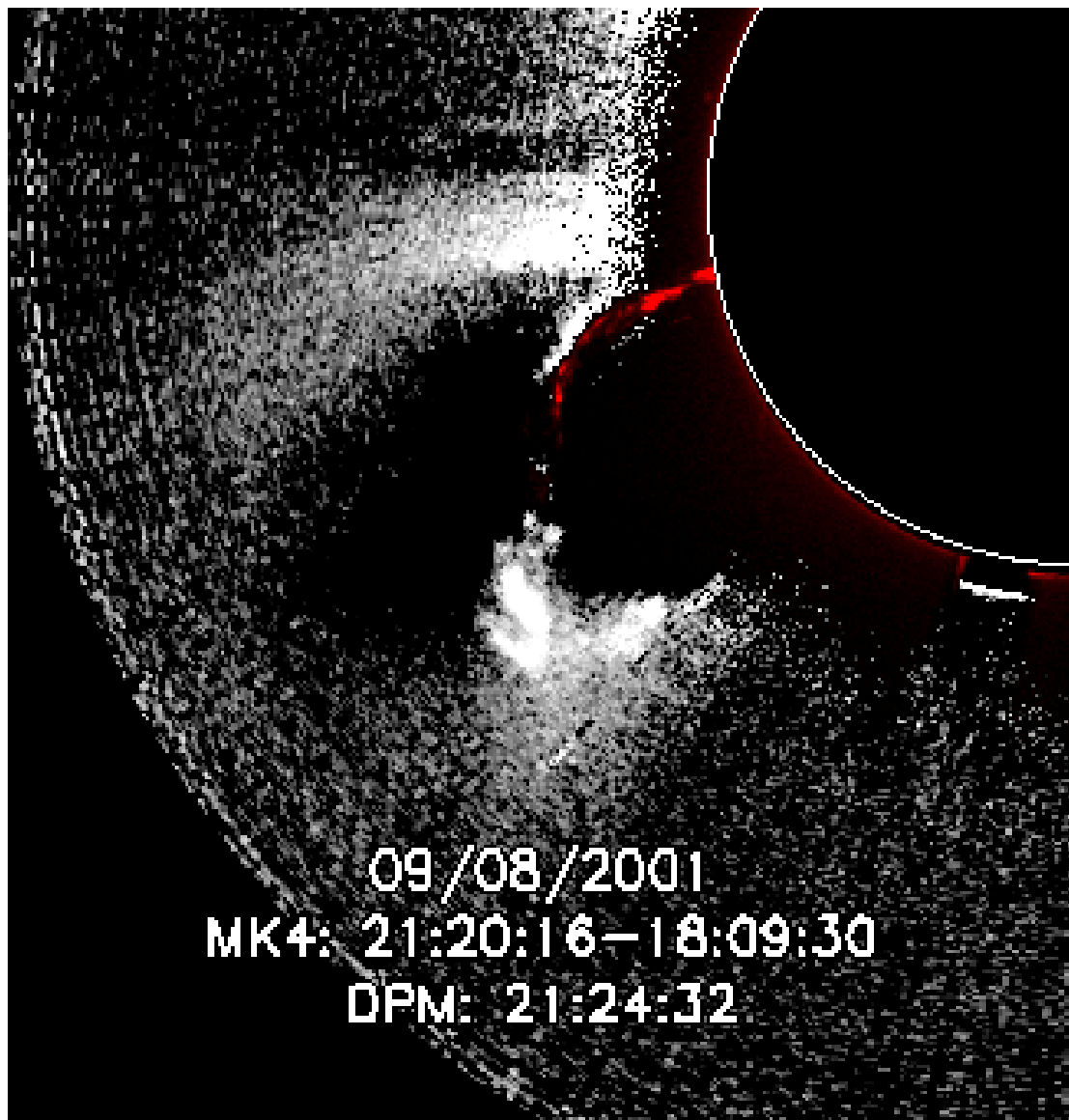
с эрупцией протуберанца

9 августа 2001 г.

$V \approx 910$ км/с

Протуберанец виден до начала СМЕ (максимум яркости $\text{H}\alpha$ на $h \approx 0.125R_0$)

Впереди него постепенно “прорисовывается” и усиливается кольцо плазмы, которое замыкается на протуберанце и составляет основу фронтальной структуры СМЕ.



Постепенный СМЕ

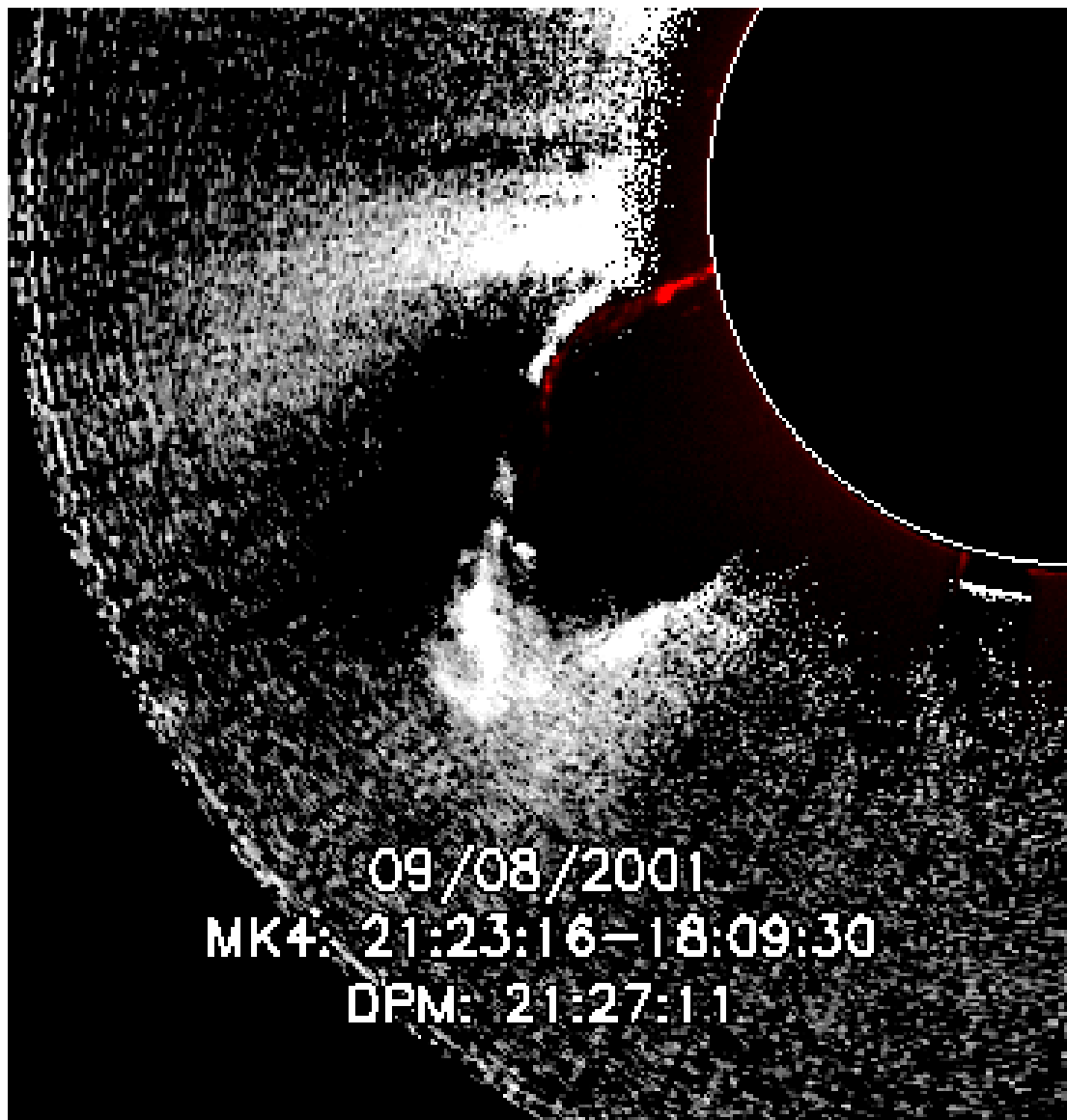
с эрупцией протуберанца

9 августа 2001 г.

$V \approx 910$ км/с

Протуберанец виден до начала СМЕ (максимум яркости $H\alpha$ на $h \approx 0.125R_0$)

Впереди него постепенно “прорисовывается” и усиливается кольцо плазмы, которое замыкается на протуберанце и составляет основу фронтальной структуры СМЕ.



Постепенный СМЕ

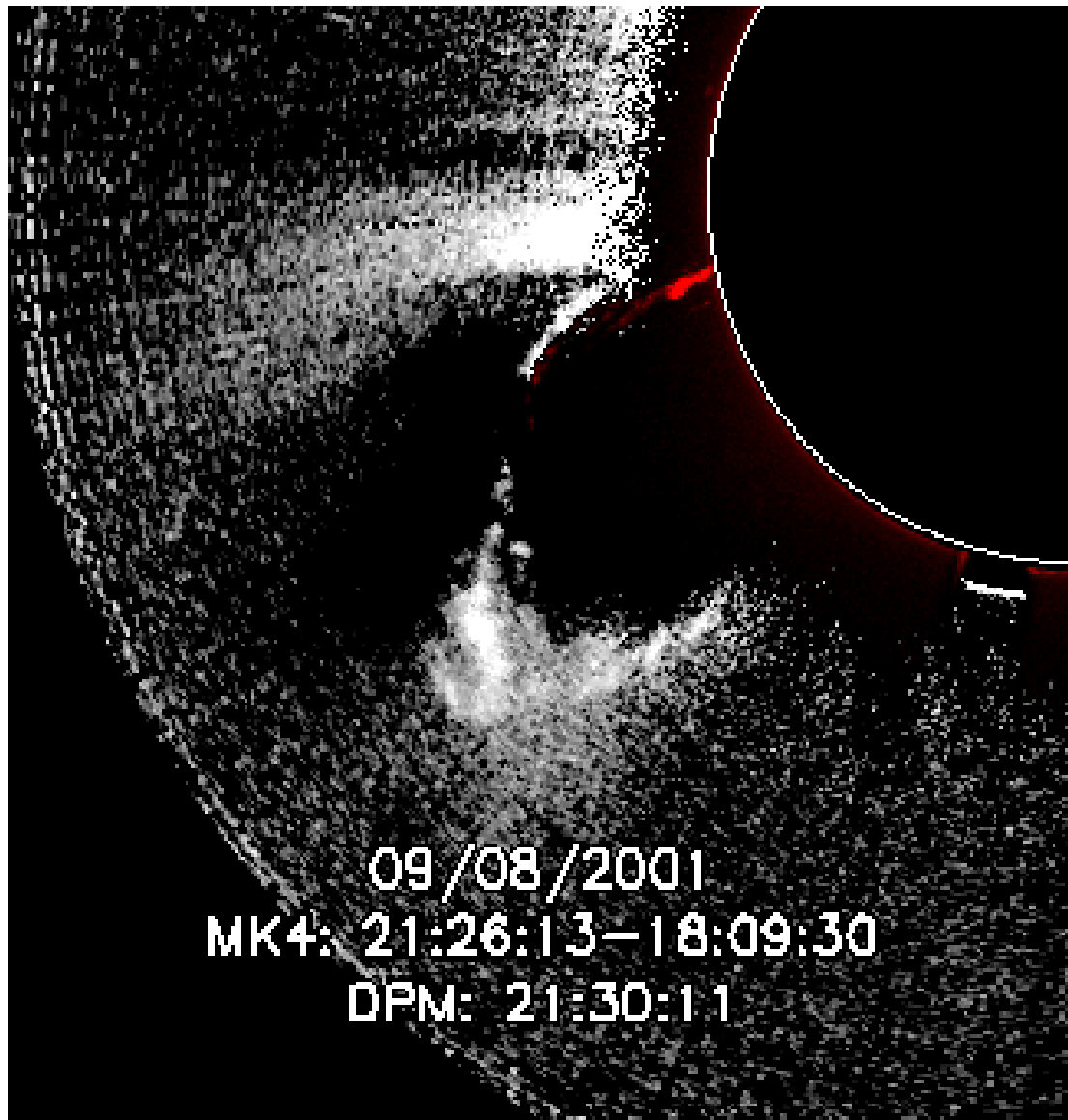
с эрупцией протуберанца

9 августа 2001 г.

$V \approx 910$ км/с

Протуберанец виден до начала СМЕ (максимум яркости $\text{H}\alpha$ на $h \approx 0.125R_0$)

Впереди него постепенно “прорисовывается” и усиливается кольцо плазмы, которое замыкается на протуберанце и составляет основу фронтальной структуры СМЕ.



Постепенный СМЕ

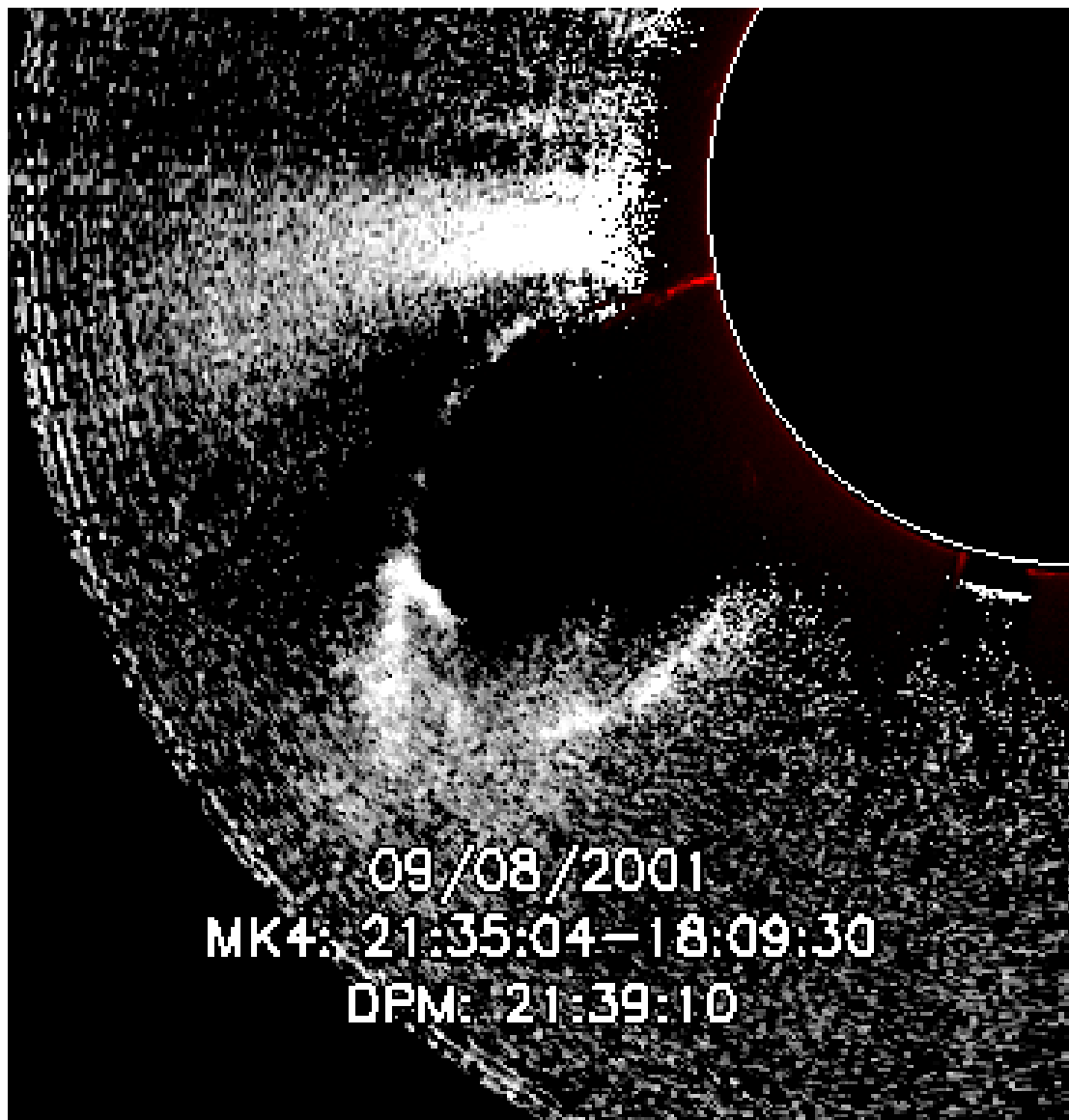
с эрупцией протуберанца

9 августа 2001 г.

$V \approx 910$ км/с

Протуберанец виден до начала СМЕ (максимум яркости $H\alpha$ на $h \approx 0.125R_0$)

Впереди него постепенно “прорисовывается” и усиливается кольцо плазмы, которое замыкается на протуберанце и составляет основу фронтальной структуры СМЕ.



Постепенный СМЕ

с эрупцией протуберанца

9 августа 2001 г.

$V \approx 910$ км/с

Протуберанец виден до начала СМЕ (максимум яркости $H\alpha$ на $h \approx 0.125R_0$)

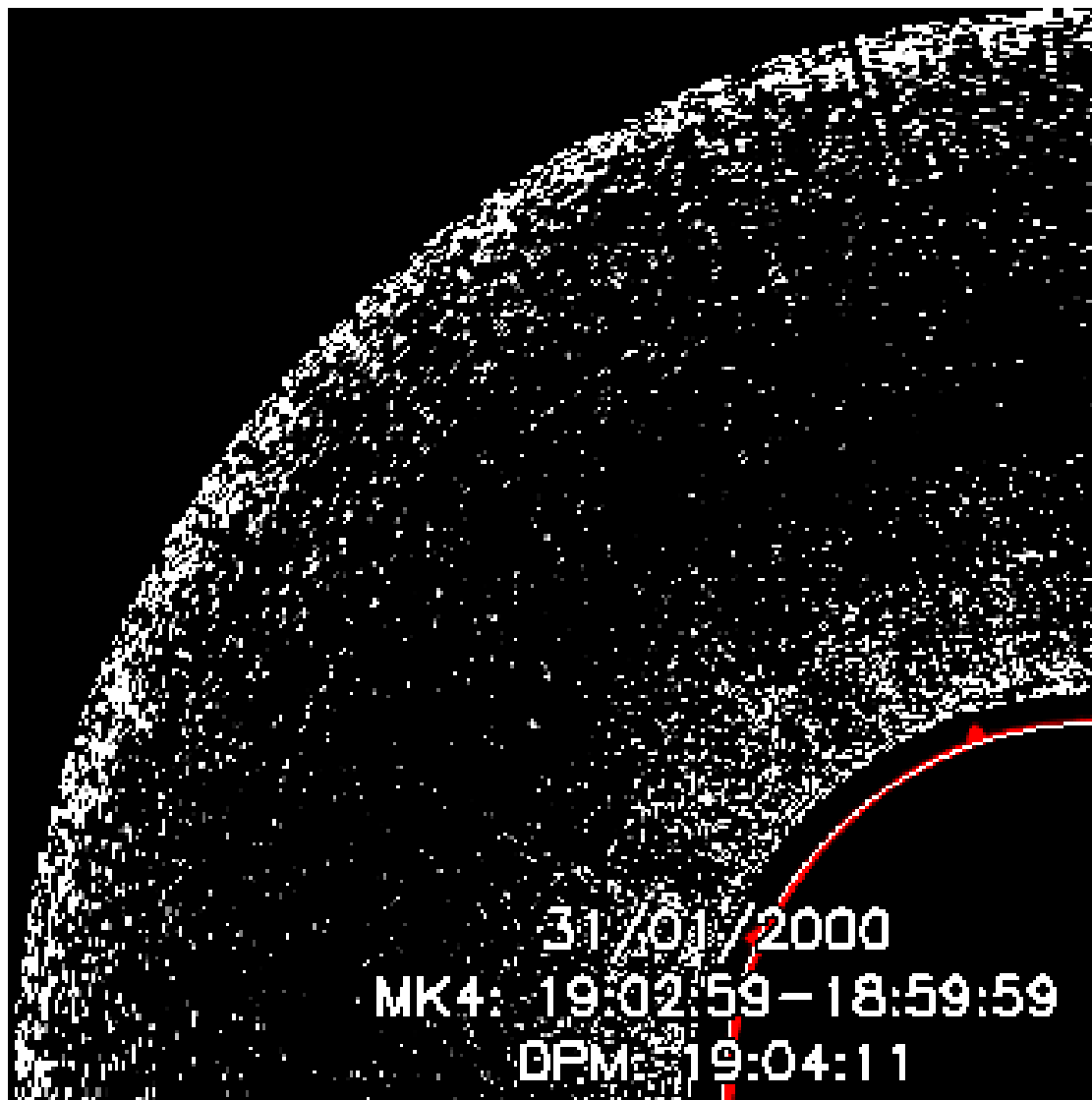
Впереди него постепенно “прорисовывается” и усиливается кольцо плазмы, которое замыкается на протуберанце и составляет основу фронтальной структуры СМЕ.

Что является причиной начала движения: протуберанец или плазменное кольцо впереди него (фронтальная структура CME)?

Является ли протуберанец причиной начала движения CME?

Оценки показывают, что величина кинетической энергии CME в несколько раз превышает кинетическую энергию эруптивного протуберанца. То есть он не может быть причиной возникновения CME.

Чтобы подтвердить этот вывод, рассмотрим еще один пример **постепенного** CME, который возникает в отсутствие эруптивного или активного протуберанца.

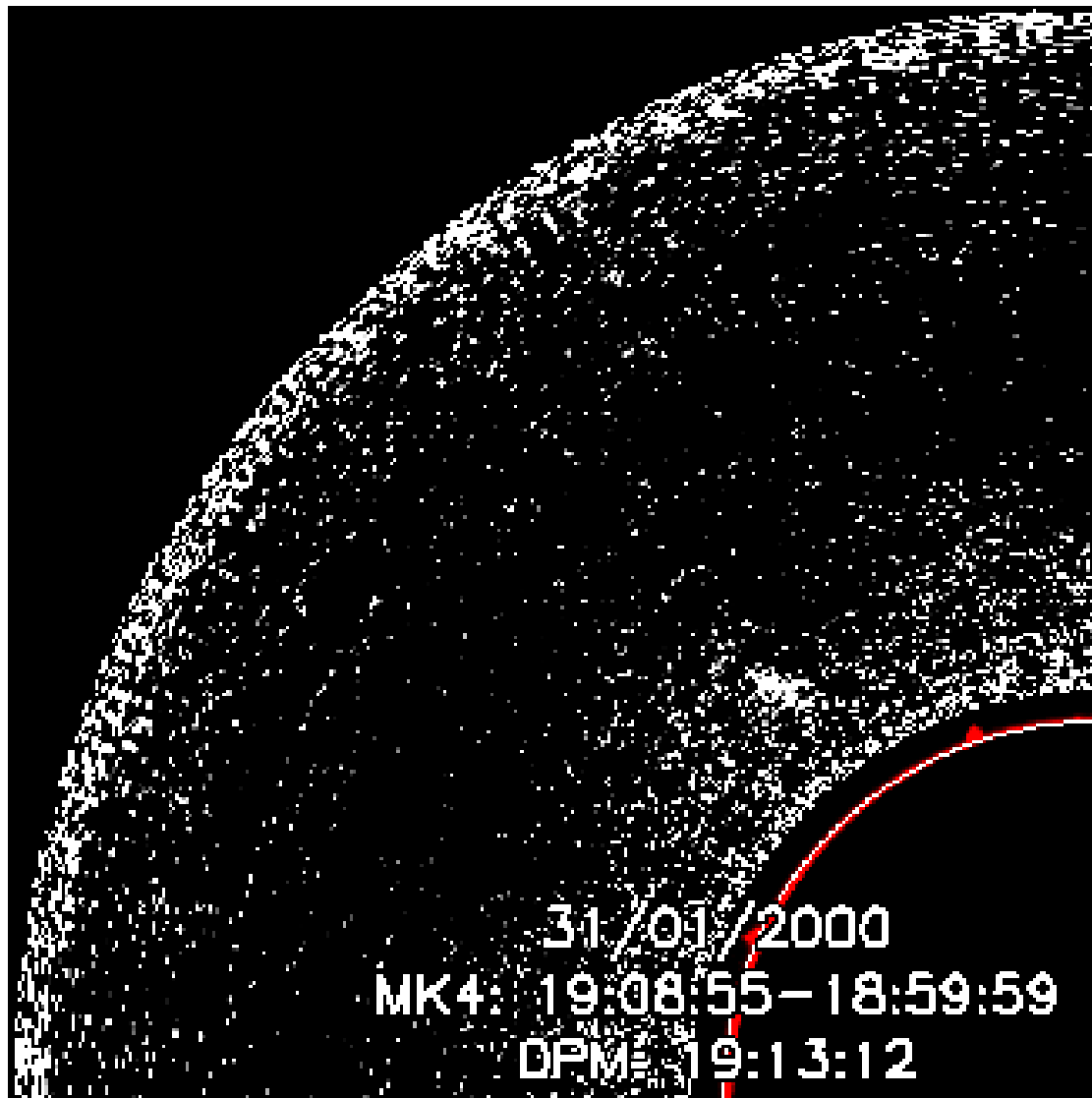


Постепенный СМЕ

активность отсутствует

31 декабря 2000 г.

$V \approx 510$ км/с

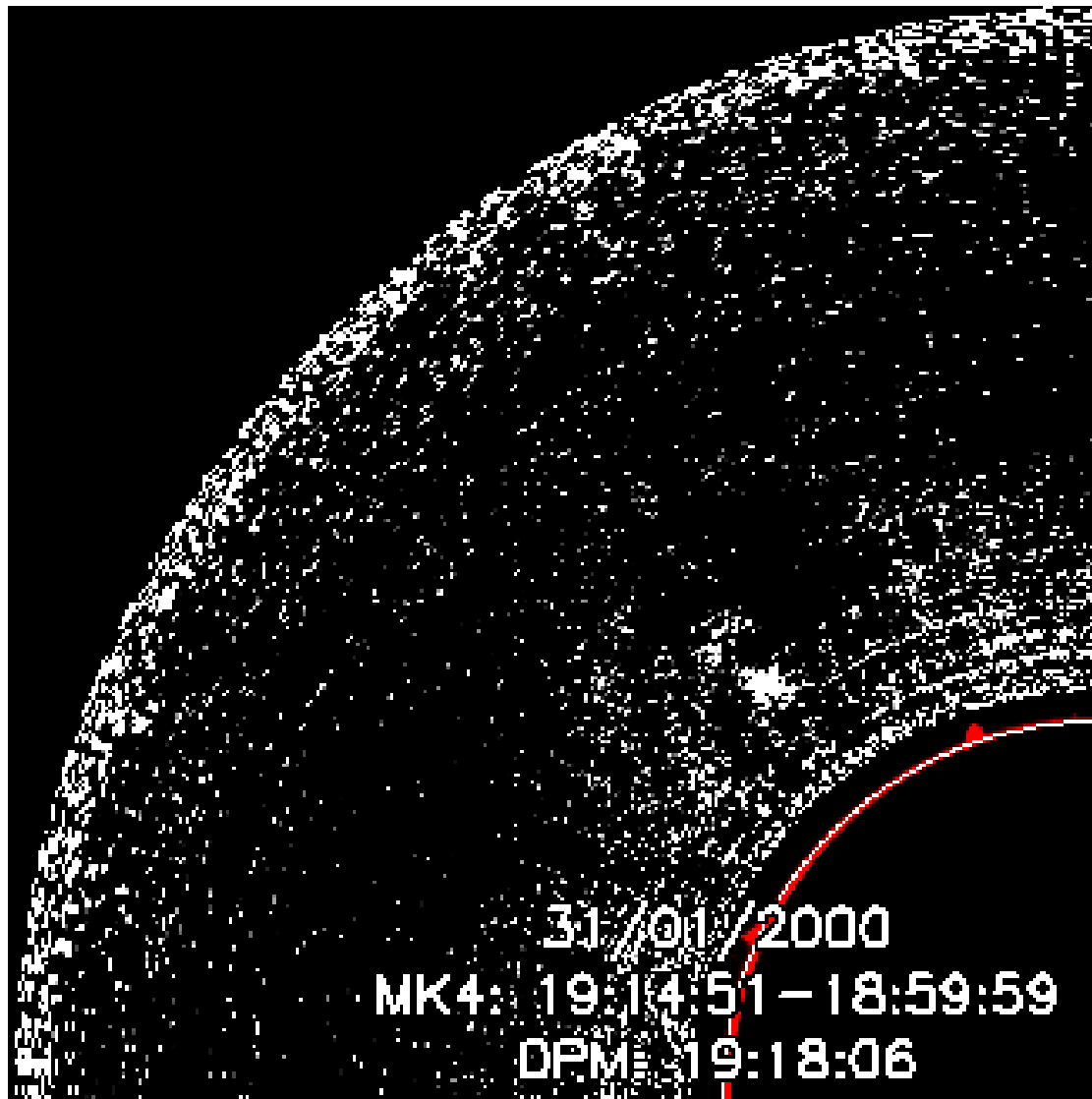


Постепенный СМЕ

активность отсутствует

31 декабря 2000 г.

$V \approx 510$ км/с

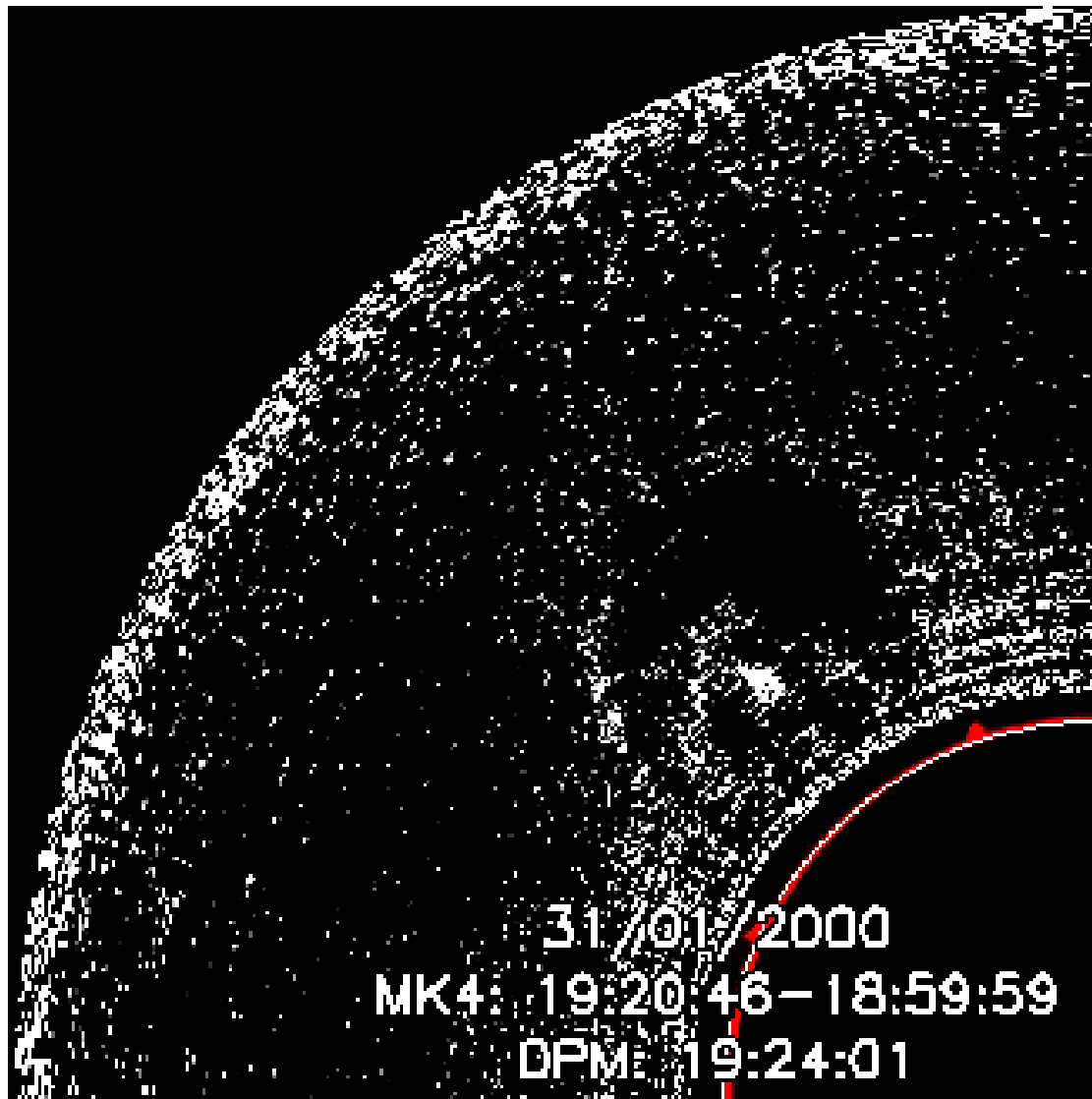


Постепенный СМЕ

активность отсутствует

31 декабря 2000 г.

$V \approx 510$ км/с

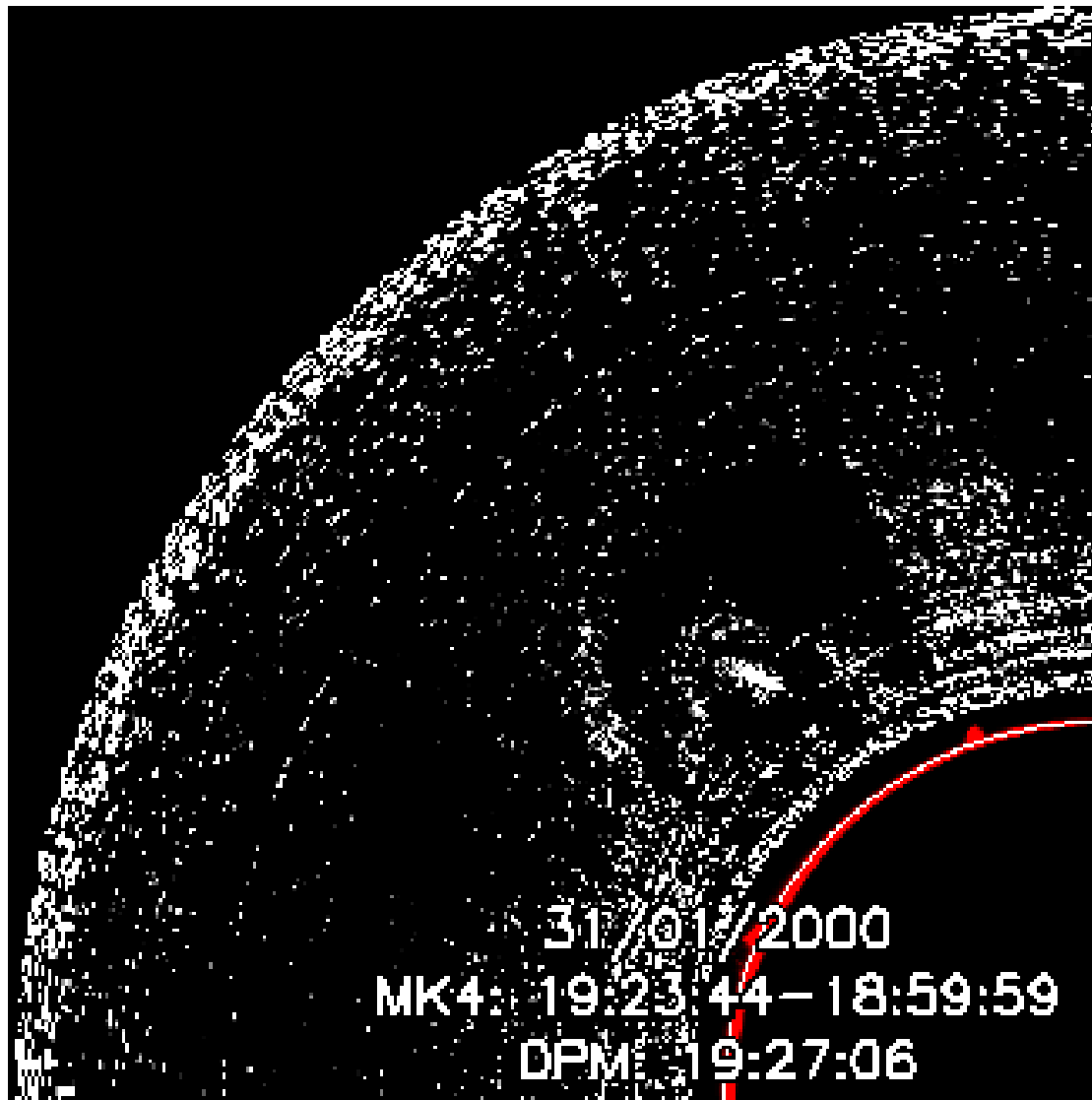


Постепенный СМЕ

активность отсутствует

31 декабря 2000 г.

$V \approx 510$ км/с

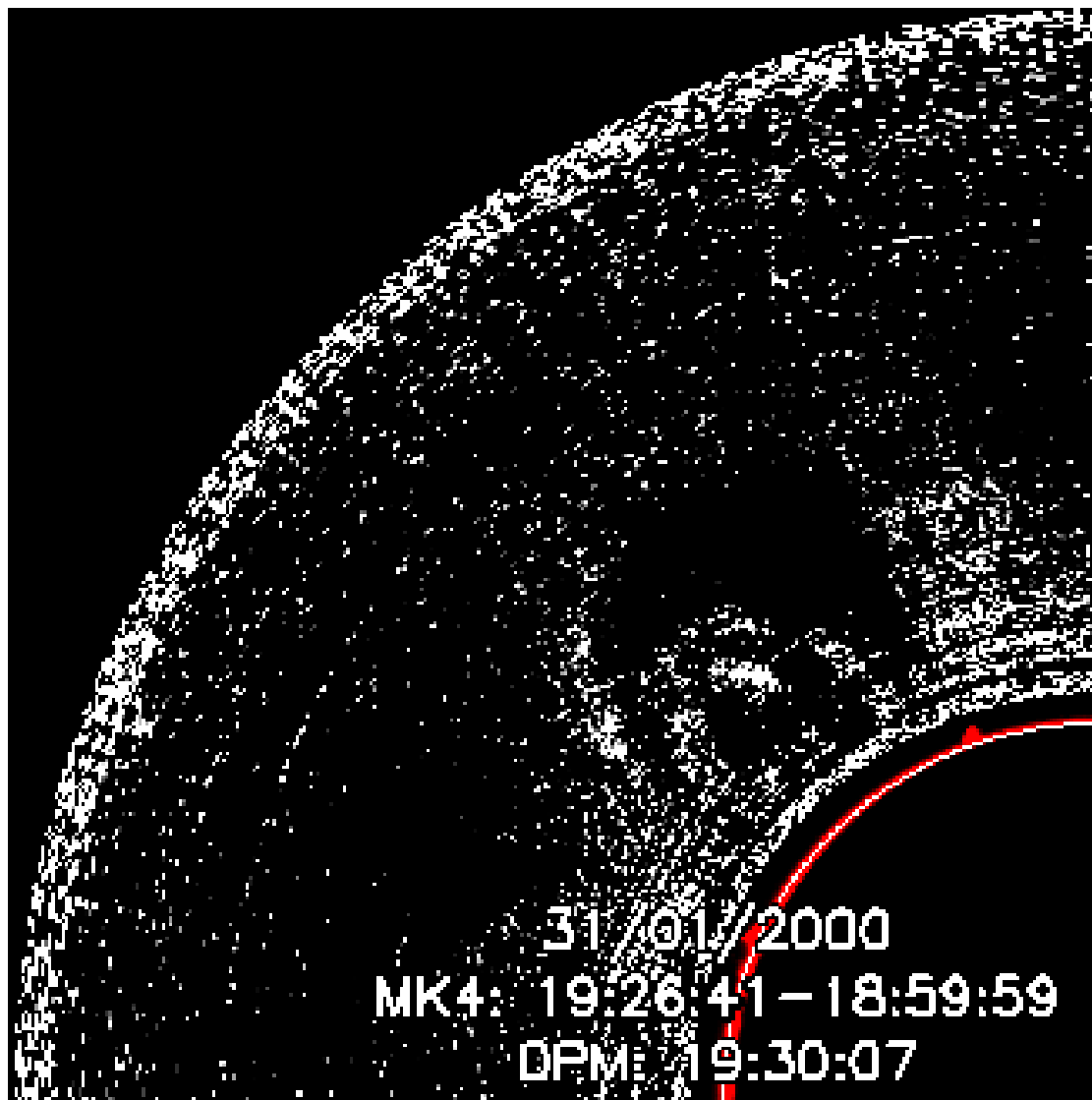


Постепенный СМЕ

активность отсутствует

31 декабря 2000 г.

$V \approx 510$ км/с

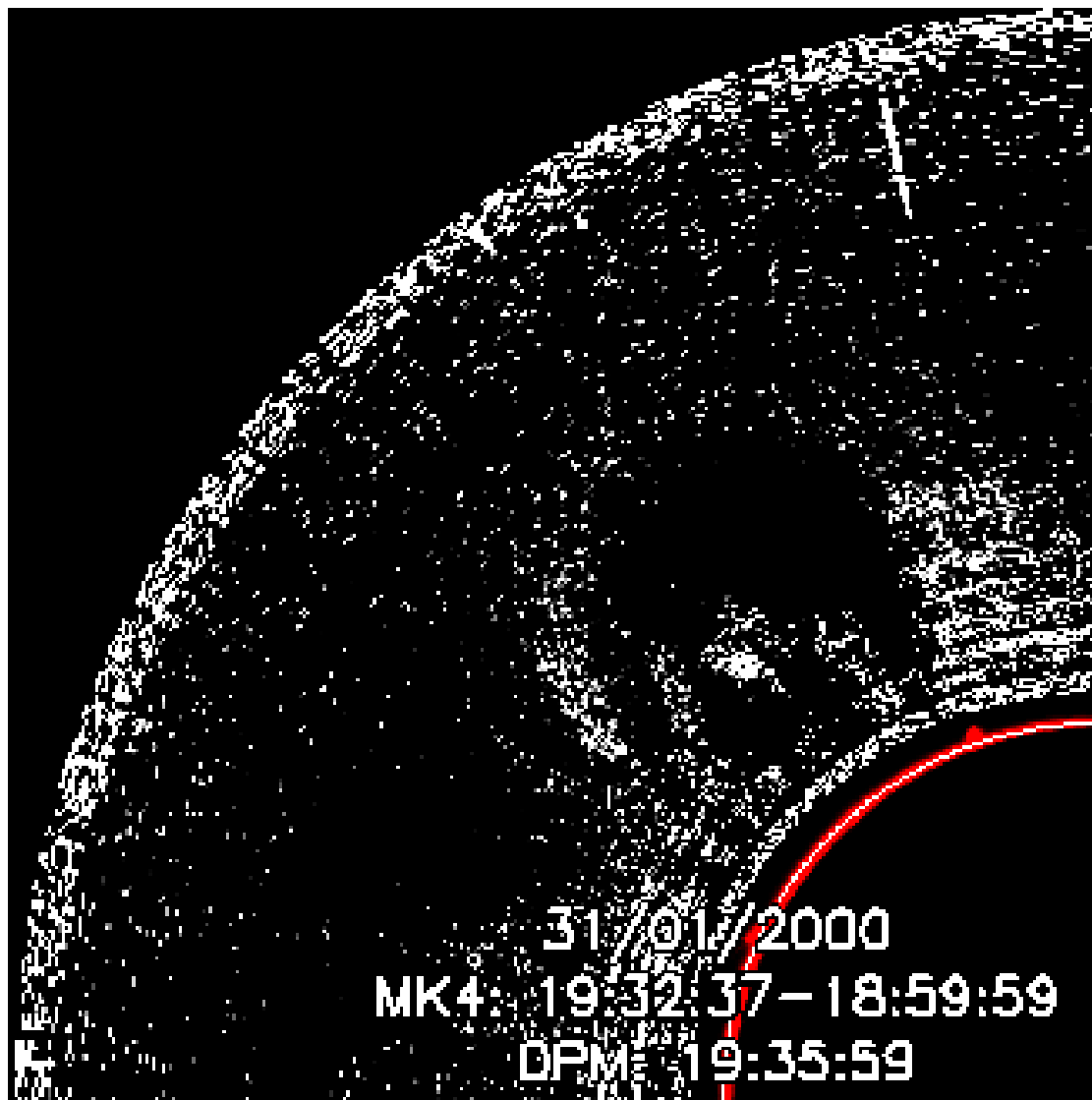


Постепенный СМЕ

активность отсутствует

31 декабря 2000 г.

$V \approx 510$ км/с

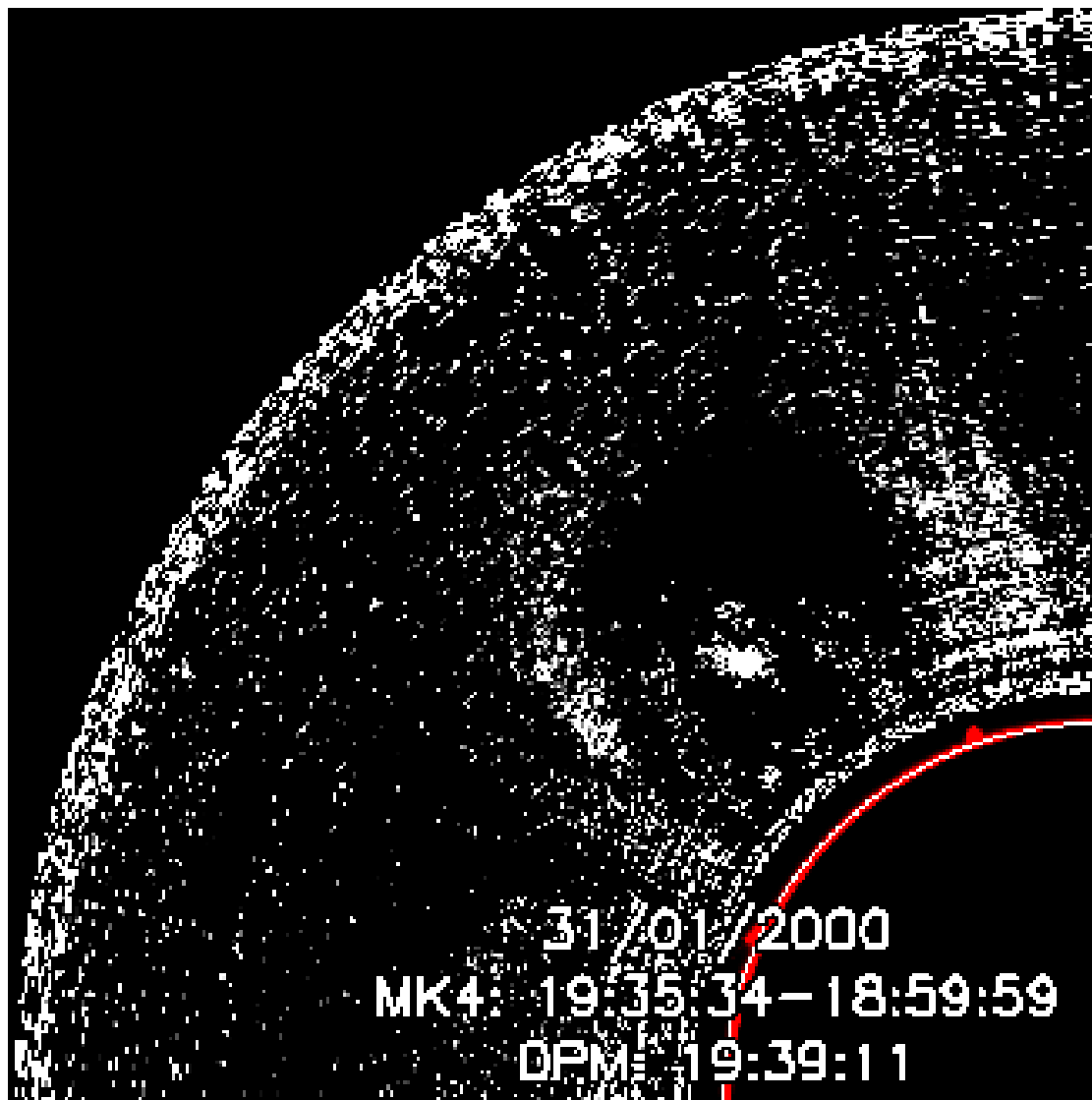


Постепенный СМЕ

активность отсутствует

31 декабря 2000 г.

$V \approx 510$ км/с

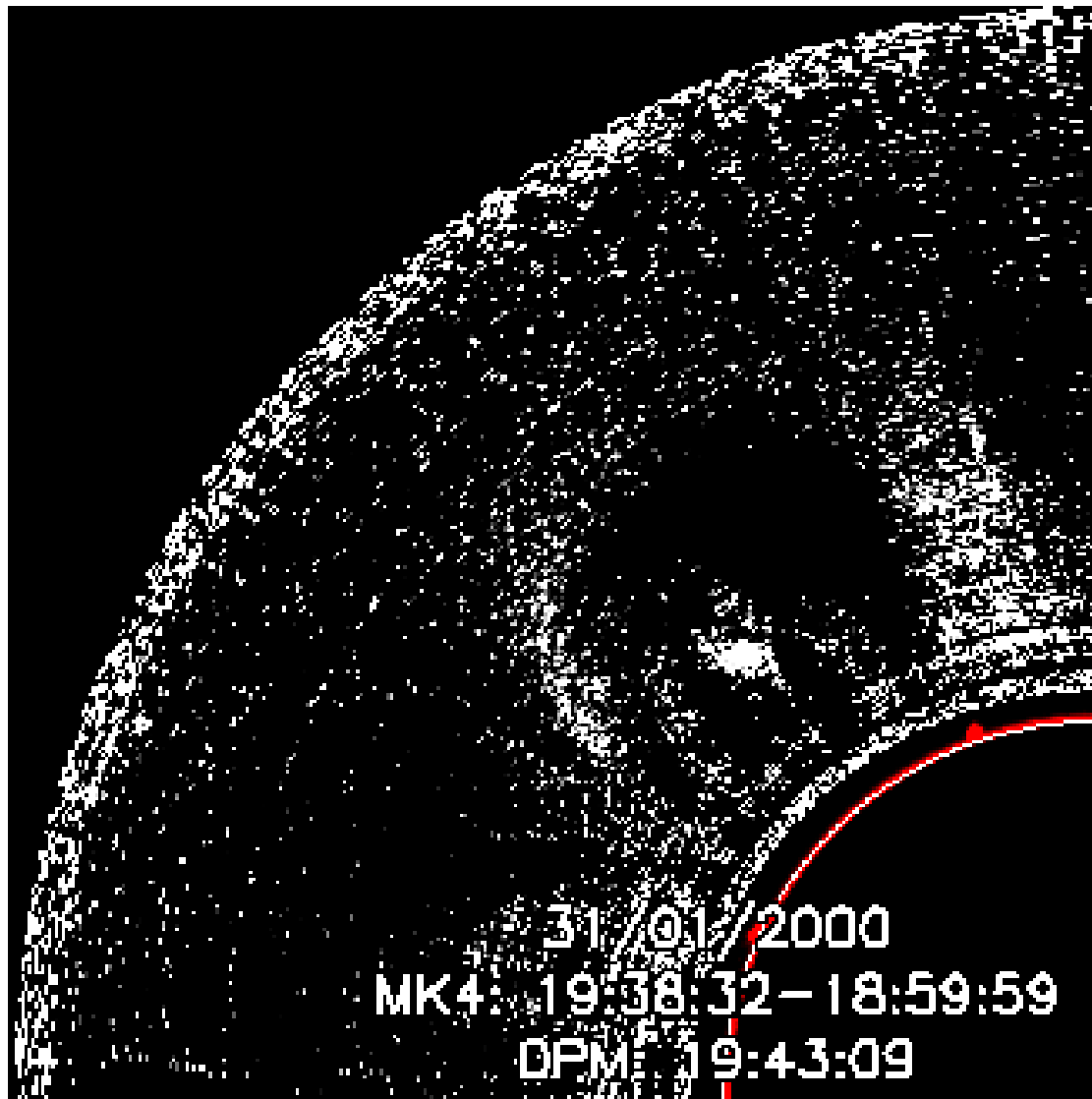


Постепенный СМЕ

активность отсутствует

31 декабря 2000 г.

$V \approx 510$ км/с

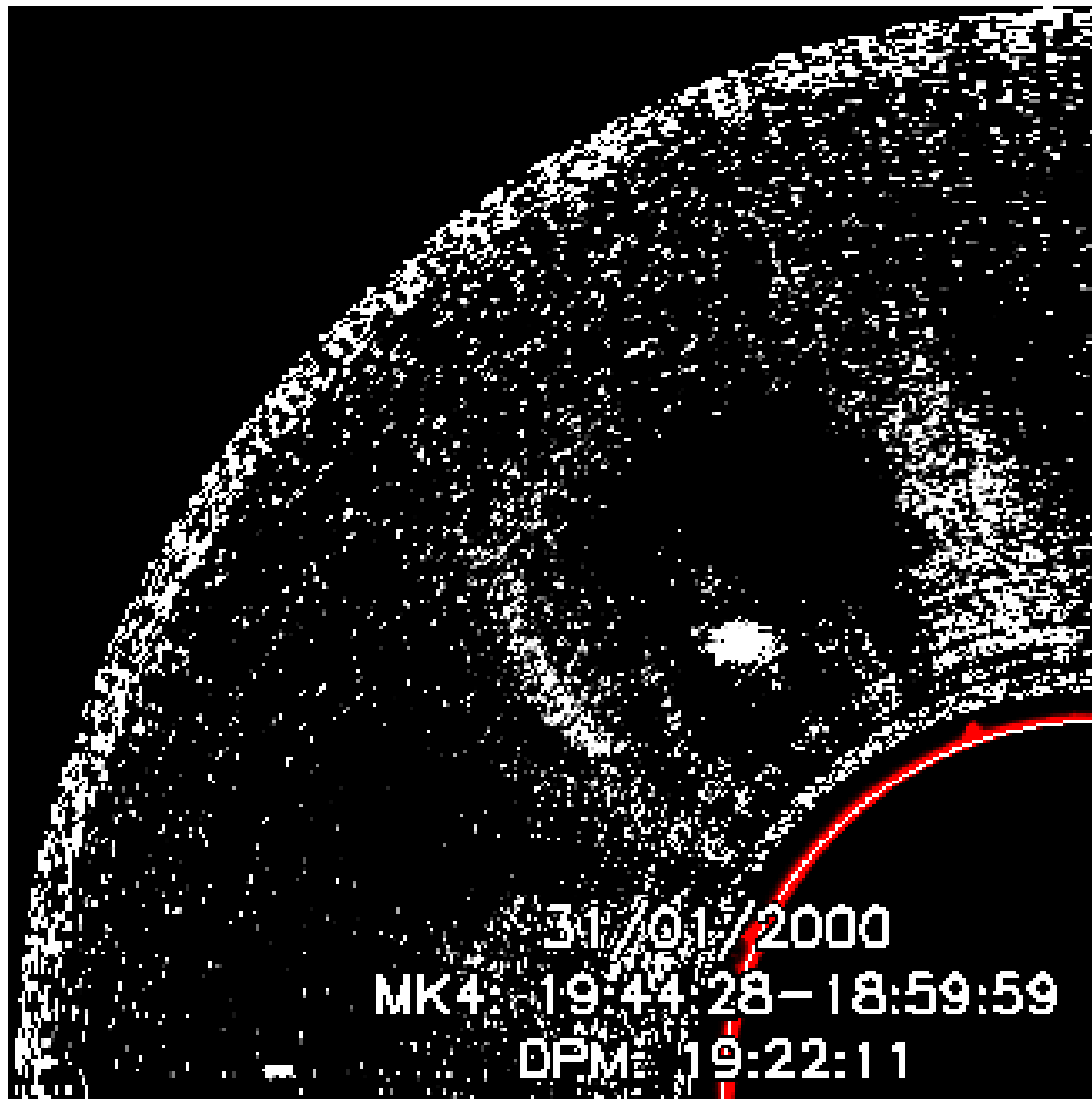


Постепенный СМЕ

активность отсутствует

31 декабря 2000 г.

$V \approx 510$ км/с

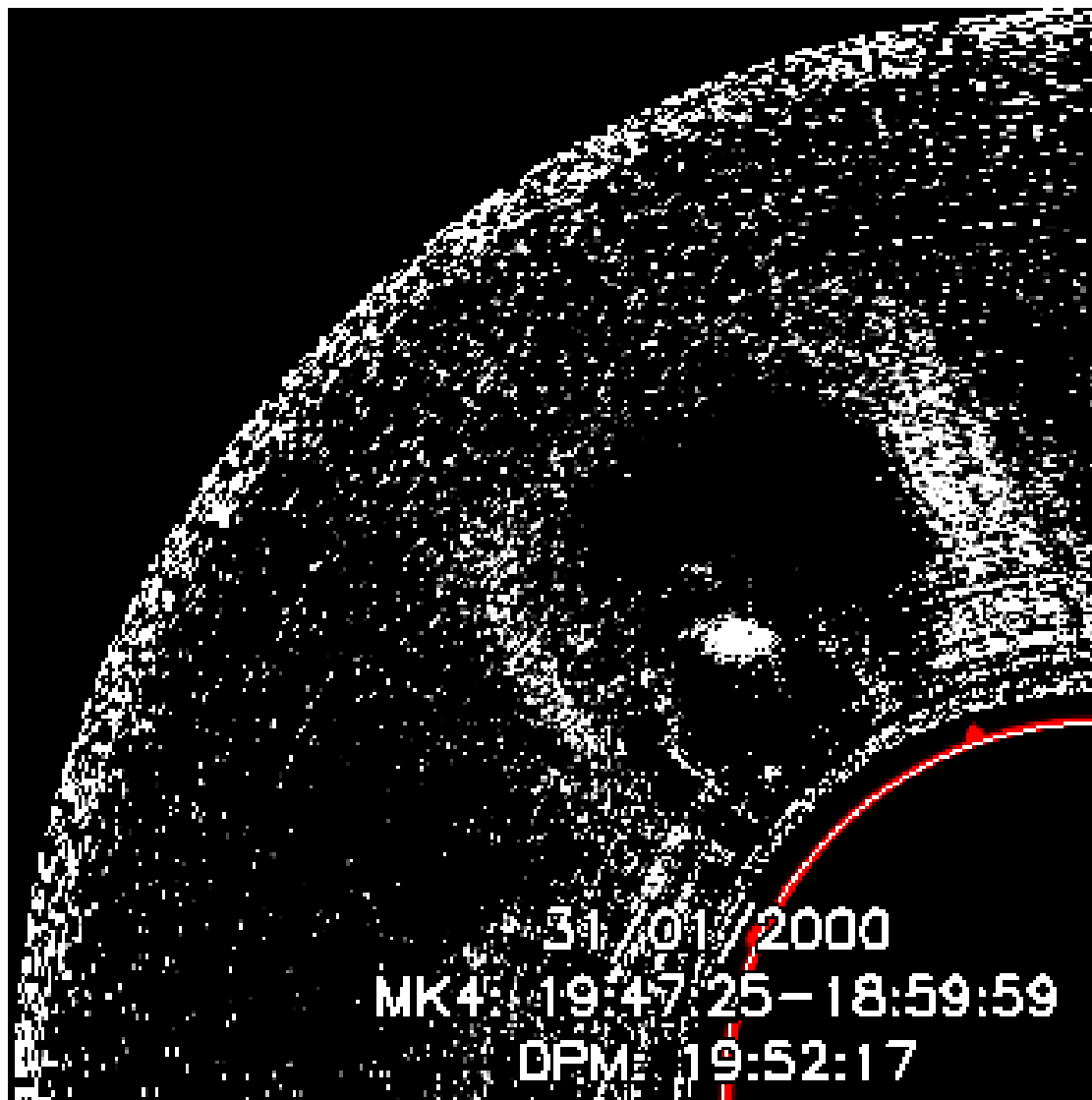


Постепенный СМЕ

активность отсутствует

31 декабря 2000 г.

$V \approx 510$ км/с

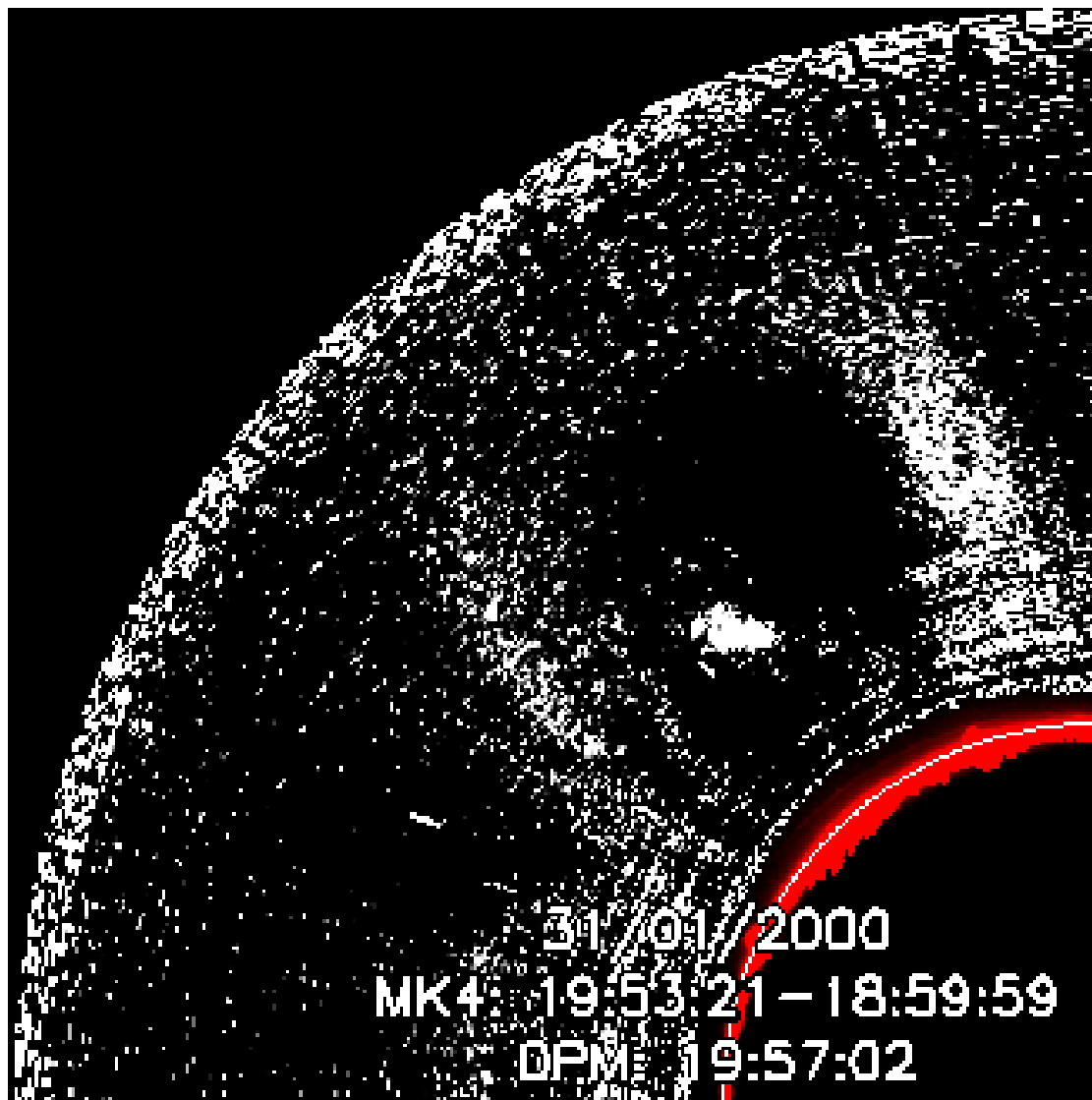


Постепенный СМЕ

активность отсутствует

31 декабря 2000 г.

$V \approx 510$ км/с

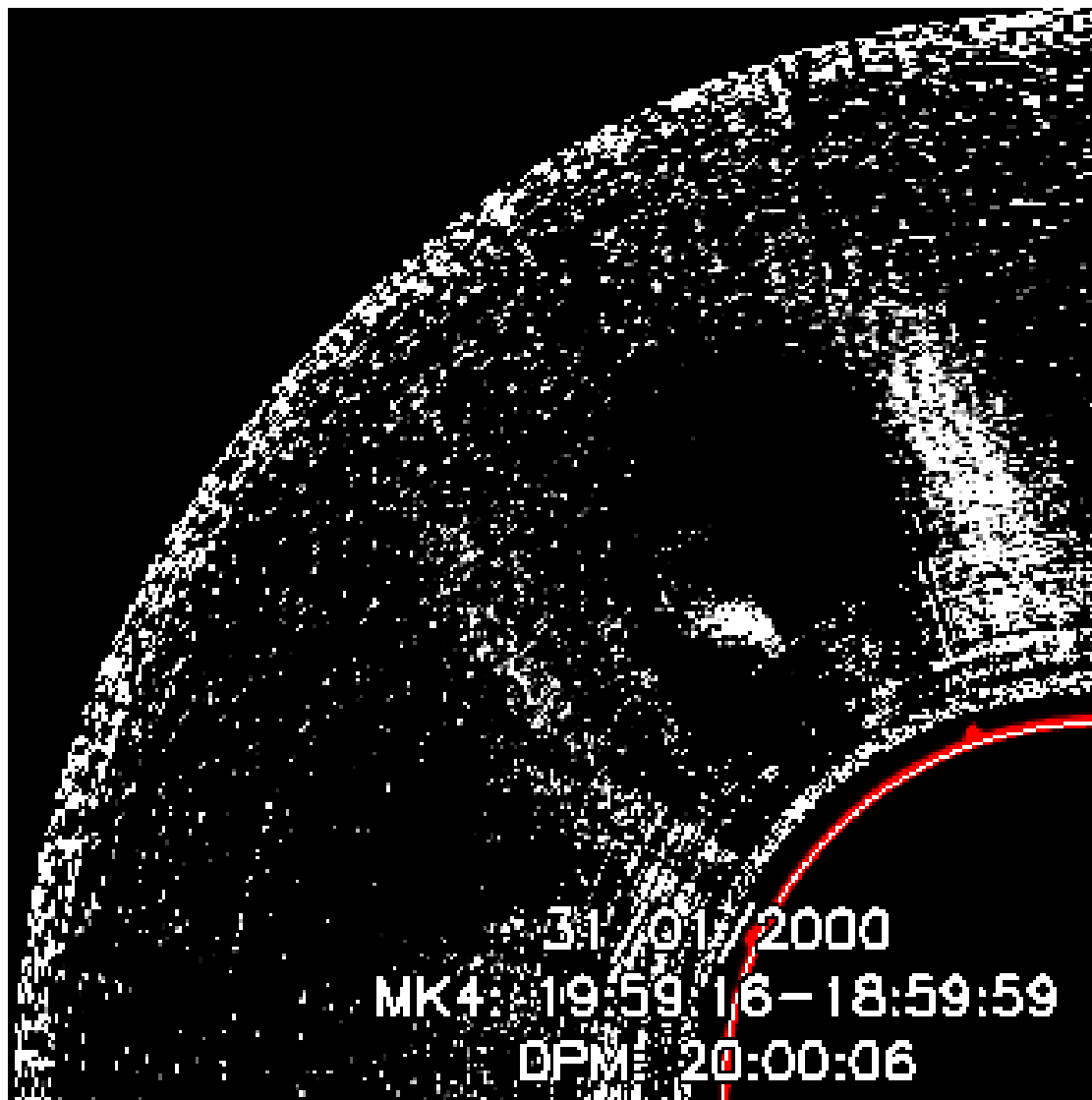


Постепенный СМЕ

активность отсутствует

31 декабря 2000 г.

$V \approx 510$ км/с

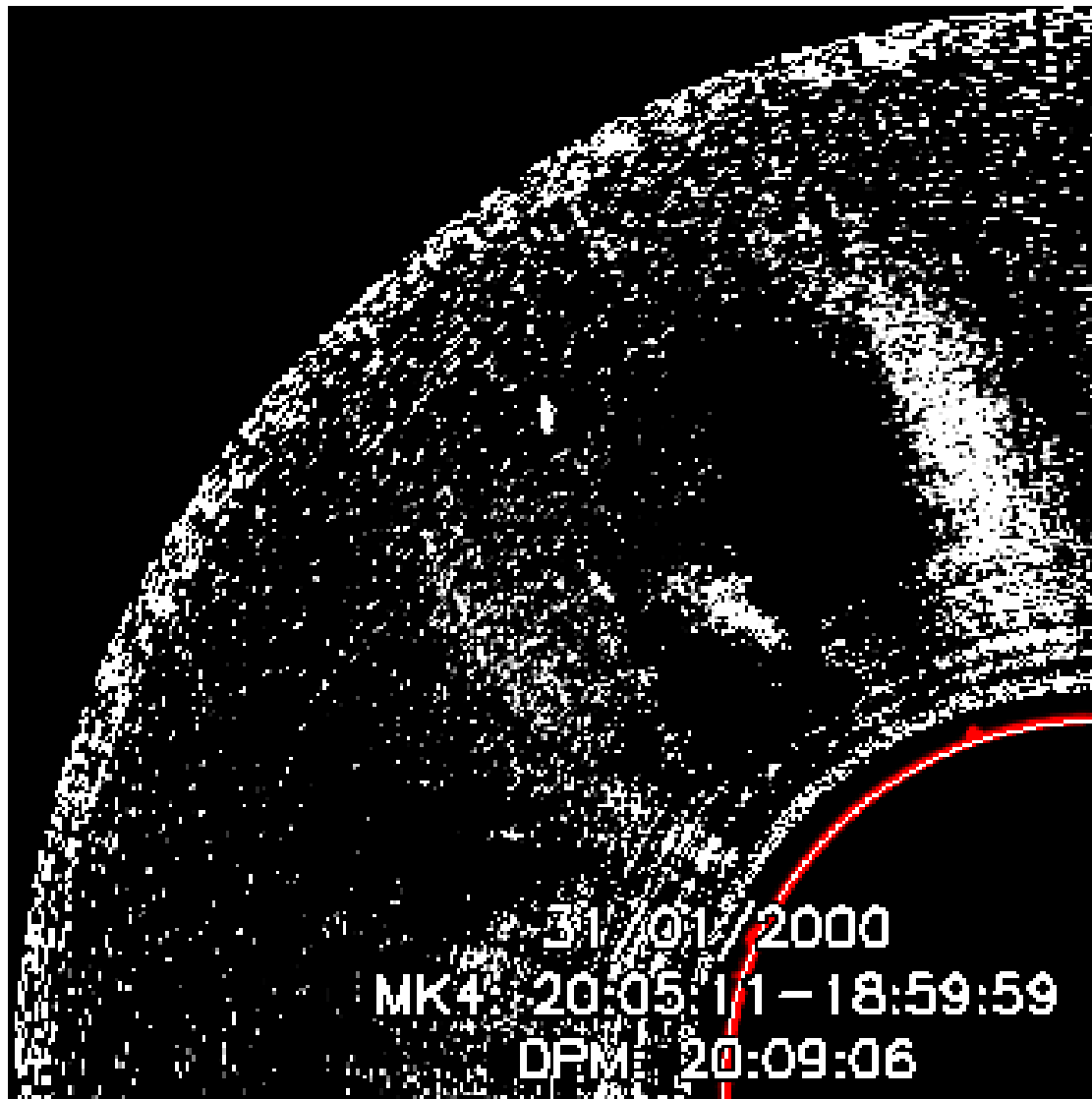


Постепенный СМЕ

активность отсутствует

31 декабря 2000 г.

$V \approx 510$ км/с

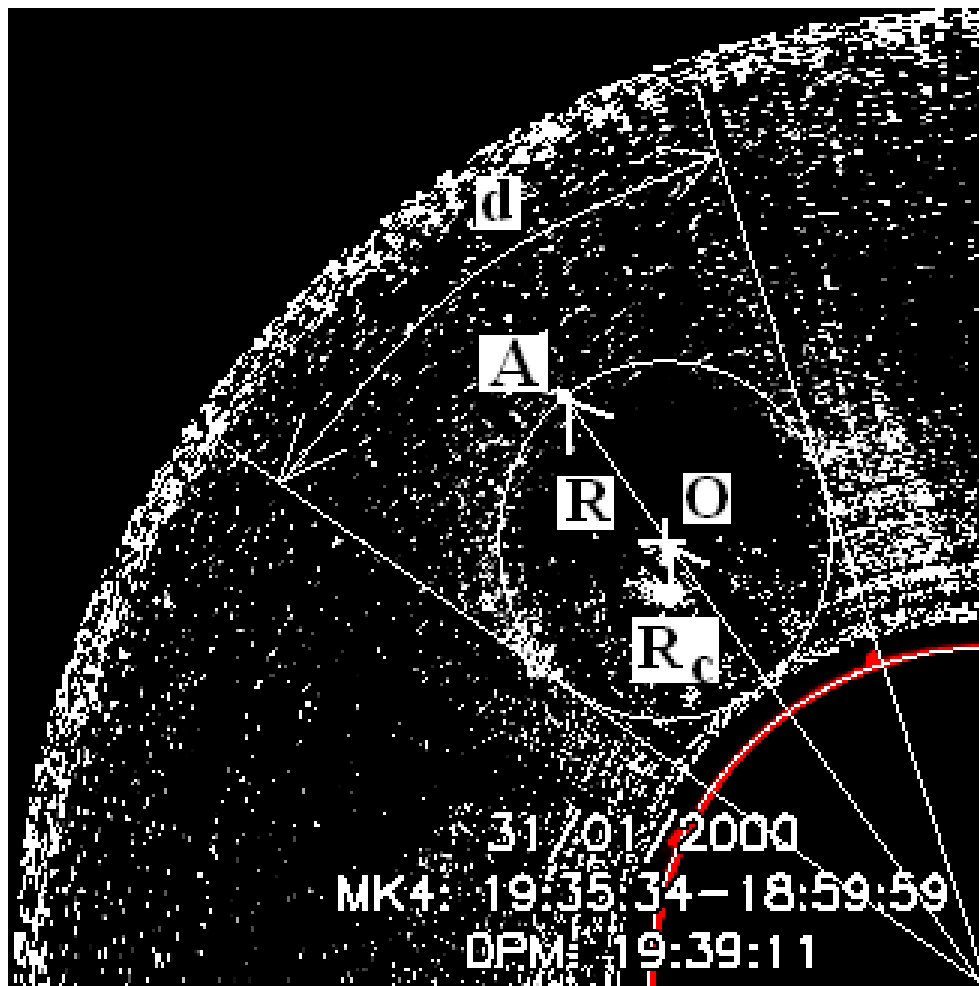


Постепенный СМЕ

активность отсутствует

31 декабря 2000 г.

$V \approx 510$ км/с

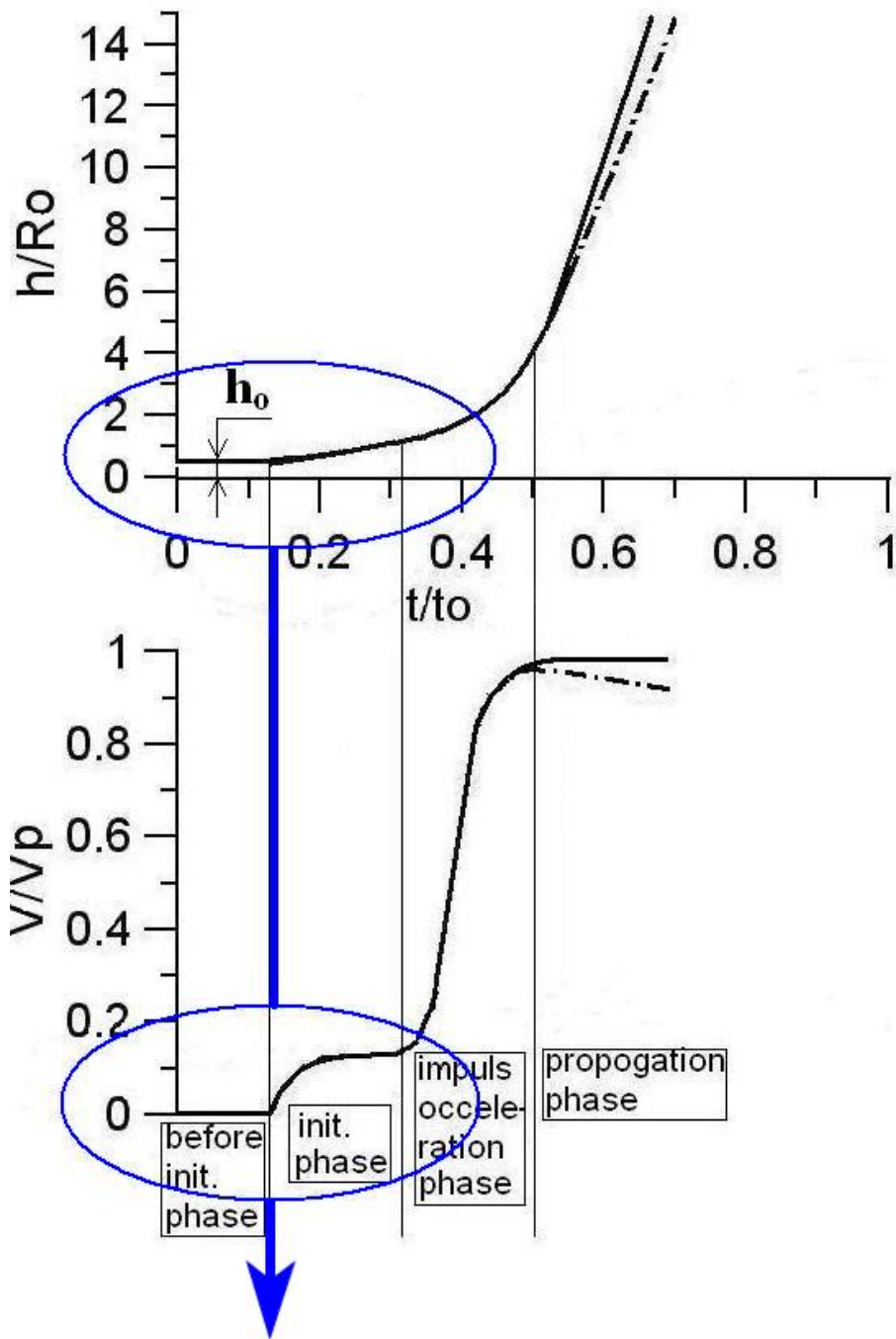


Фронтальная структура, охватывающая полость, близка по форме к окружности с центром в точке O , отстоящая на расстояние R_C от центра Солнца.

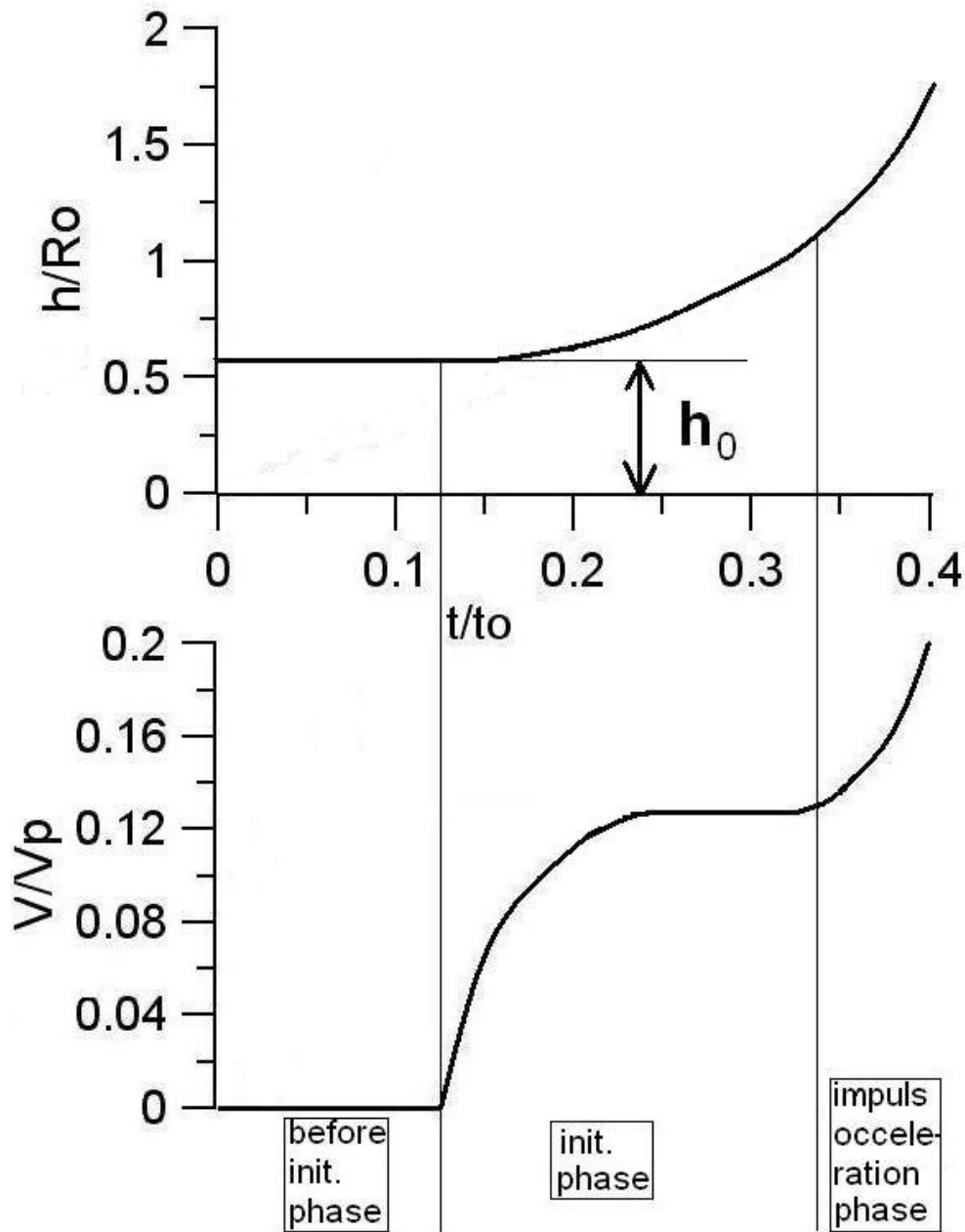
Угловой размер окружности, в гелиоцентрической системе координат, равен d .

h - высота над поверхностью Солнца переднего участка фронтальной структуры (точка A).

Исследуется кинематика CME: зависимость от времени высоты $h(t)$ и ее первой производной по времени - скорости CME $V(t)$ - вдоль направления распространения CME (или оси CME).



Согласно *Zhang et al., 2001*, траекторию $h(t)$ можно разбить на три фазы: **initiation phase**, **impulsive phase** и **propagation phase**. При этом на **propagation phase** скорость может быть либо постоянна во времени (сплошная кривая), либо медленно уменьшаться (штрих-пунктир), вследствие торможения СМЕ.



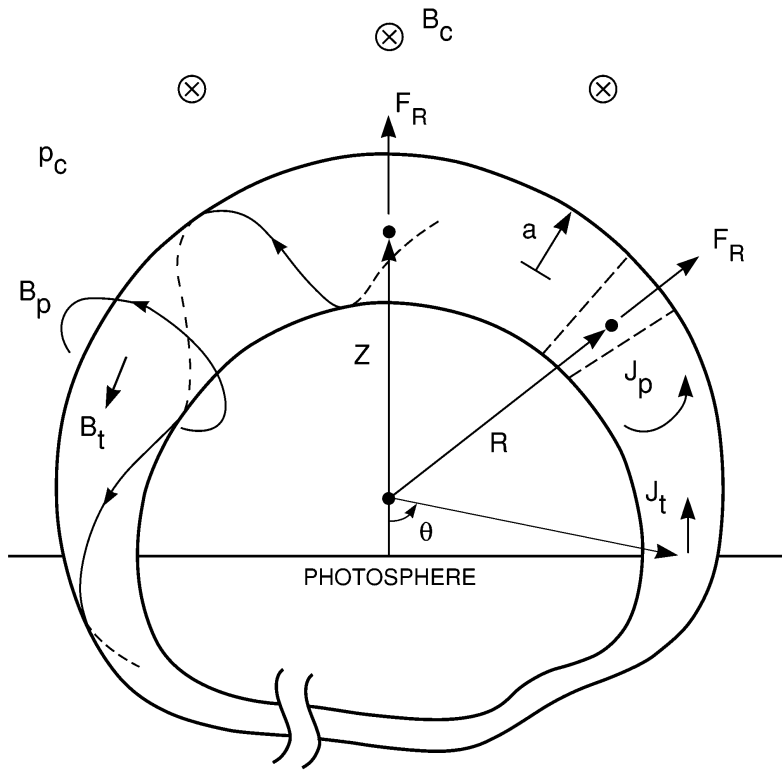
Важная особенность зависимостей $h(t)$ и $V(t)$ для **постепенных СМЕ**: перед **initiation phase** есть еще **before initiation phase**, когда СМЕ с начальным угловым размером d_0 еще находится в состоянии покоя, т.е. его начальная скорость $V_0 \approx 0$.

Все 11 **постепенных** СМЕ (исследованные нами и другими авторами) имели примерно одинаковые профили $h(t)$ и $V(t)$, характеризующиеся следующими общими особенностями:

1. Место возникновения центров этих СМЕ располагается в короне на расстоянии $0.1R_0 < h \leq 0.7 R_0$ от центра Солнца.
2. Их движение начинается из состояния покоя, т.е. начальная скорость $V_0 = 0$.
3. Начальный угловой размер в состоянии покоя $d_0 \approx 15^\circ - 65^\circ$.

Максимальные значения скорости V_p на “propagation phase” составляют от ≈ 280 км/с до ≈ 1500 км/с.

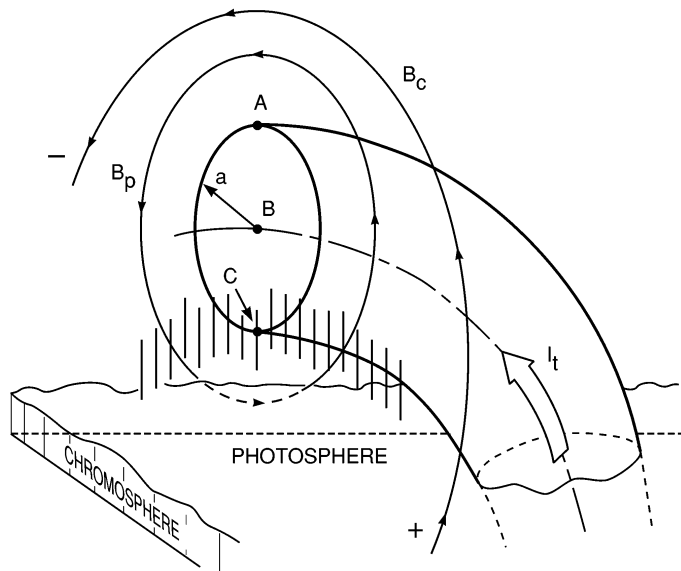
Как показали многочисленные исследования (*Krall and Chen, 2000; Foley et al., 2003; Vrsnak, B. et al, 2004*), наблюдаемое в белом свете плазменное кольцо (фронтальная структура) для **постепенных** СМЕ является поперечным сечением квазистационарного жгута магнитного потока с плазмой.



В стационарном состоянии жгут представляет собой заполненную плазмой арочную структуру винтовых силовых линий магнитного поля, два основания которой укоренены в фотосфере Солнца. Вдоль жгута может располагаться вещество протуберанца.

Наиболее вероятной причиной эрупции, согласно *Krall and Chen, 2000*, может быть быстрое возрастание полоидальной компоненты магнитного потока в жгуте. Хотя, возможны и другие причины (*Kuznetsov and Hood, 2000*).

Оценки показывают (*Krall and Chen, 2000*), что энергии такого жгута достаточно для возбуждения **постепенных СМЕ**.



Перейдем к рассмотрению импульсных СМЕ.

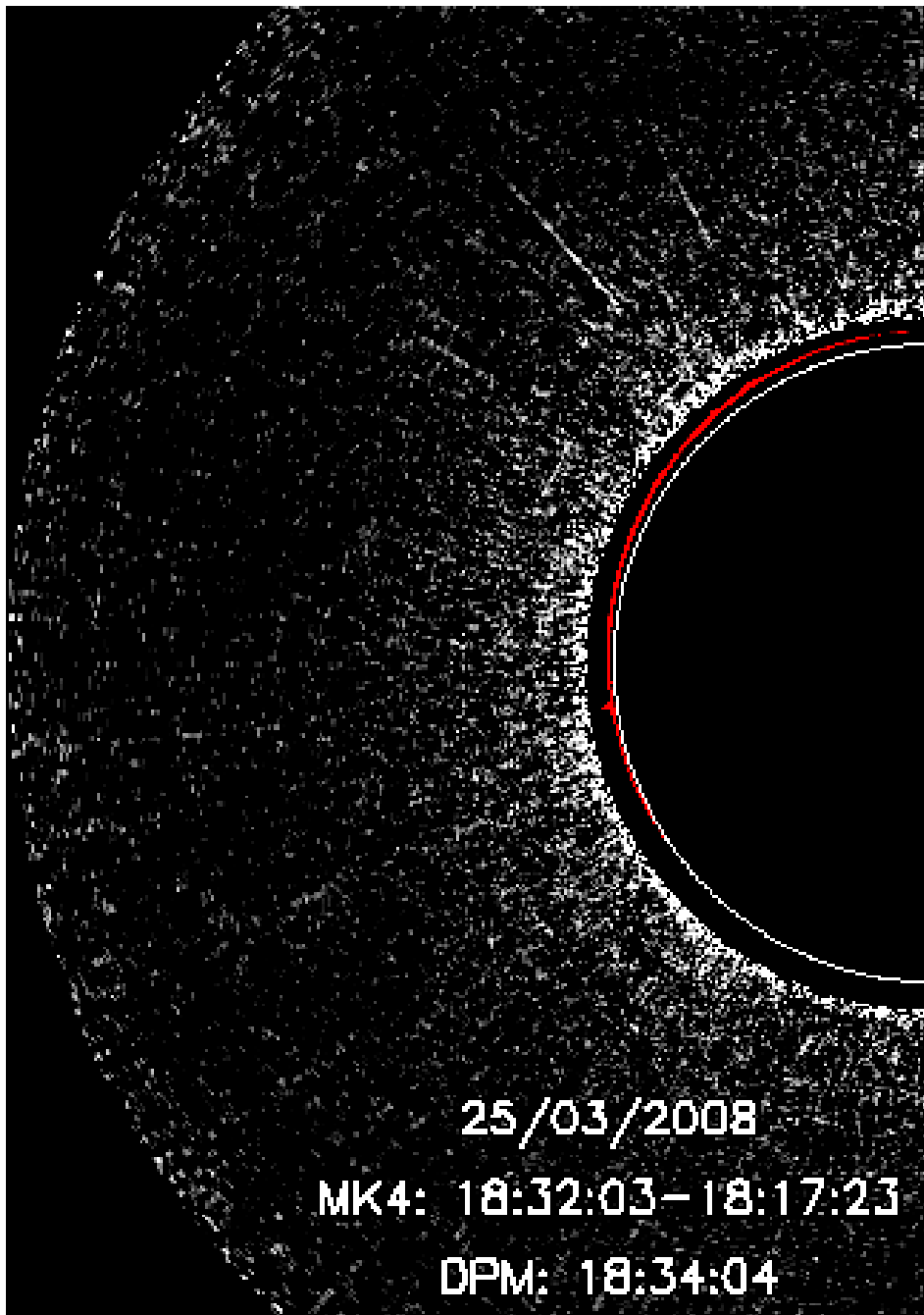
Первый пример – СМЕ 25 марта 2008 г. связанный с активным протуберанцем.

Импульсный СМЕ

25 марта 2008 г.

$V \approx 1100$ км/с

связан с активным
протуберанцем

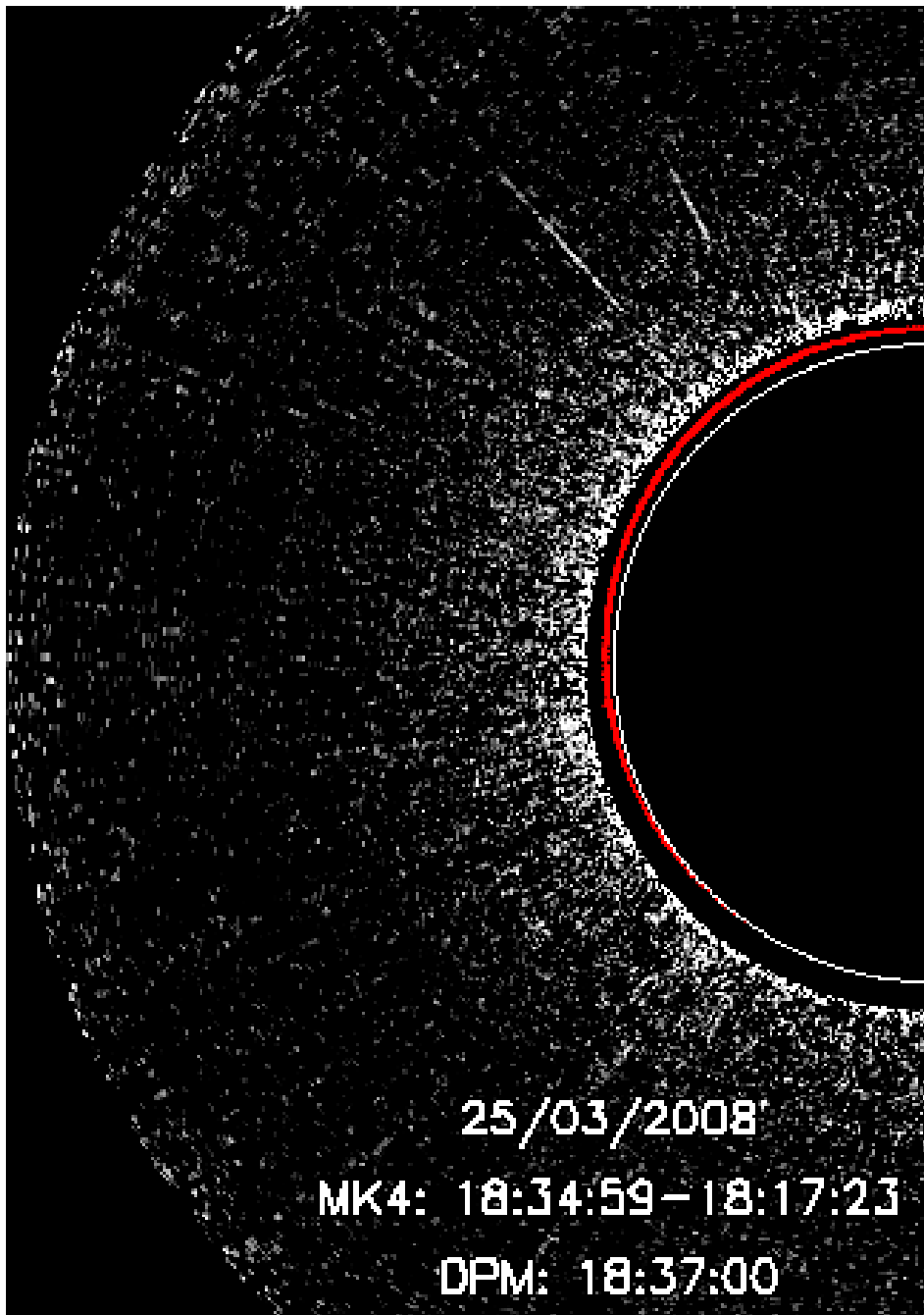


Импульсный СМЕ

25 марта 2008 г.

$V \approx 1100$ км/с

связан с активным
протуберанцем

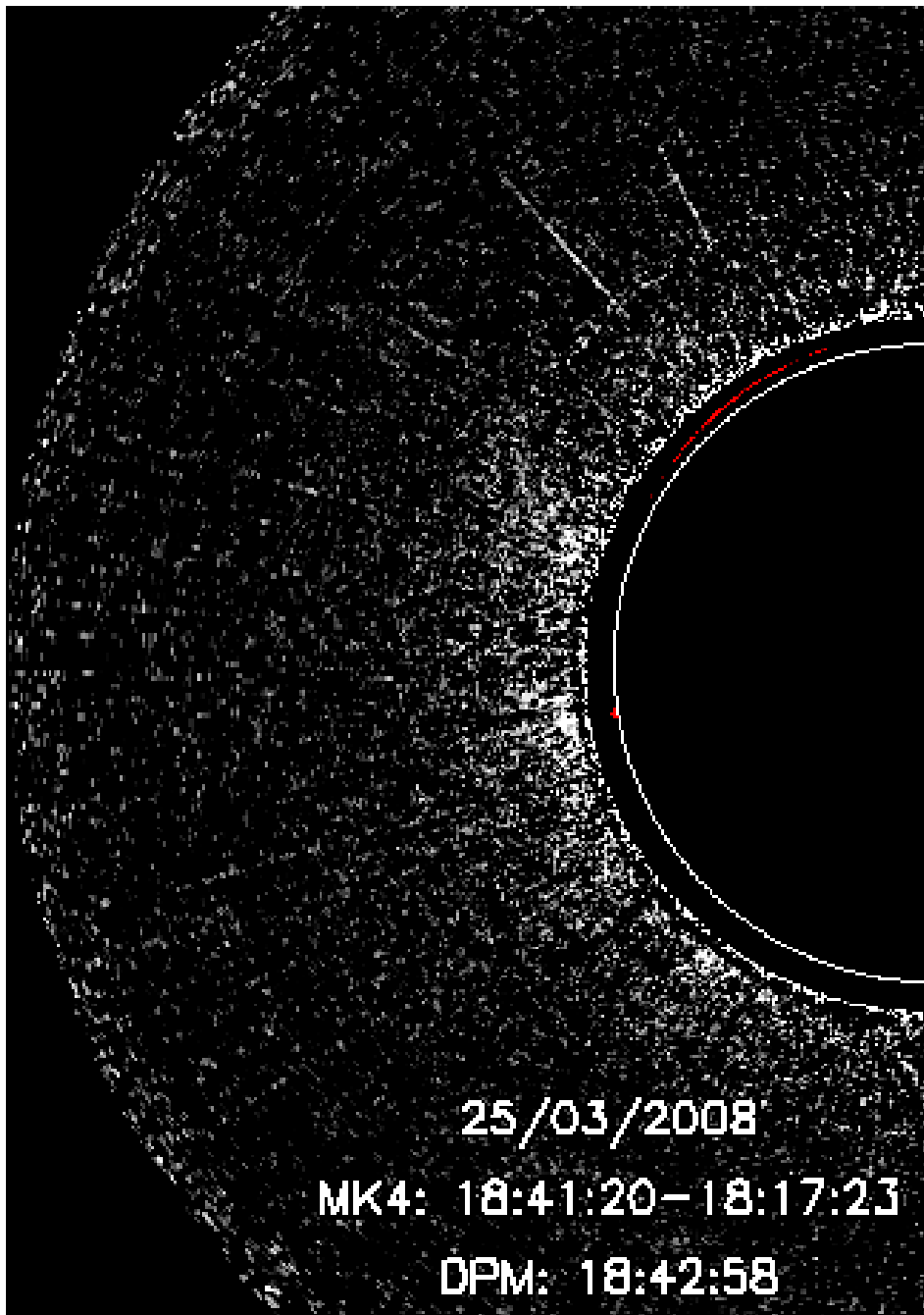


Импульсный СМЕ

25 марта 2008 г.

$V \approx 1100$ км/с

связан с активным
протуберанцем

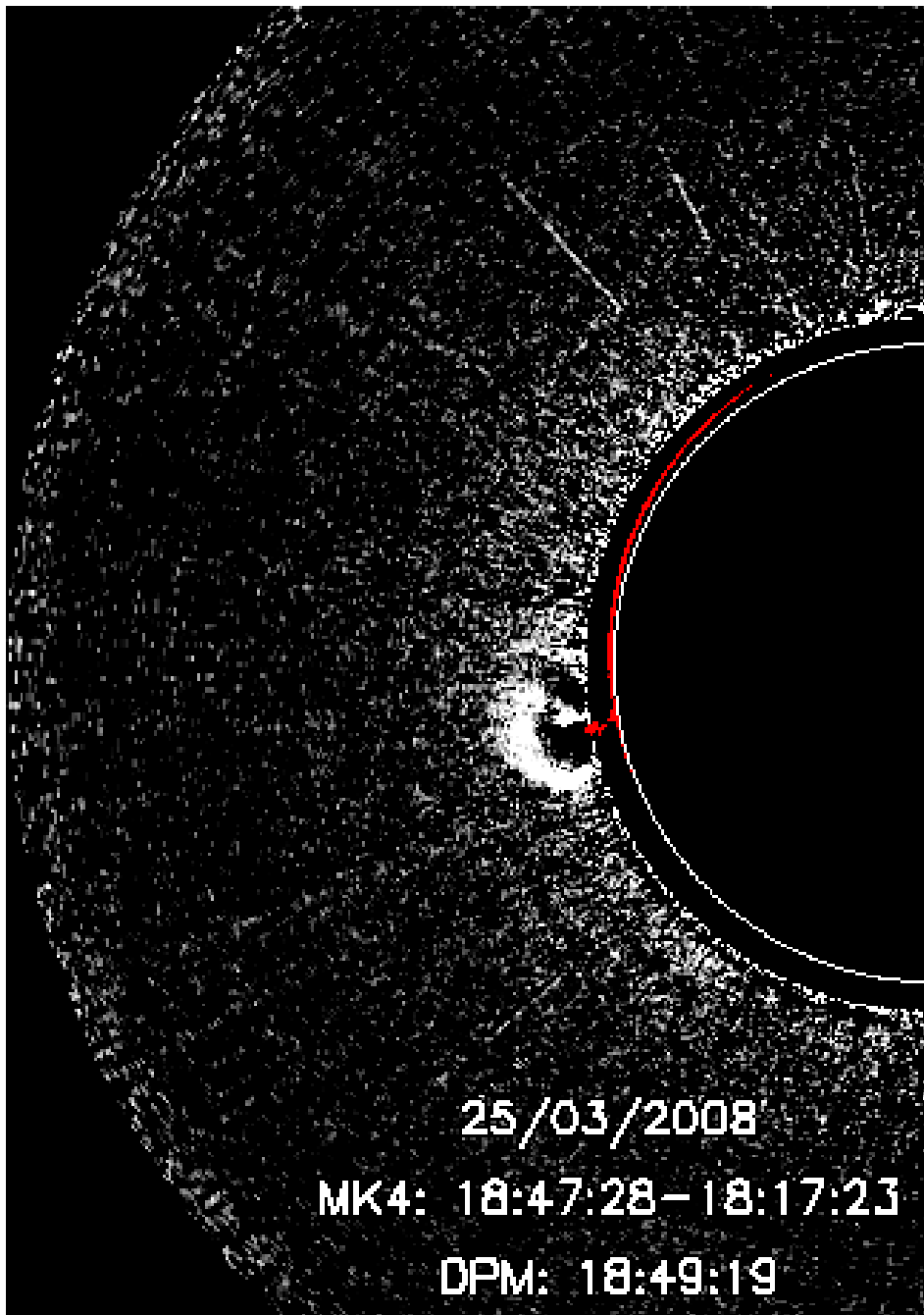


Импульсный СМЕ

25 марта 2008 г.

$V \approx 1100$ км/с

связан с активным
протуберанцем

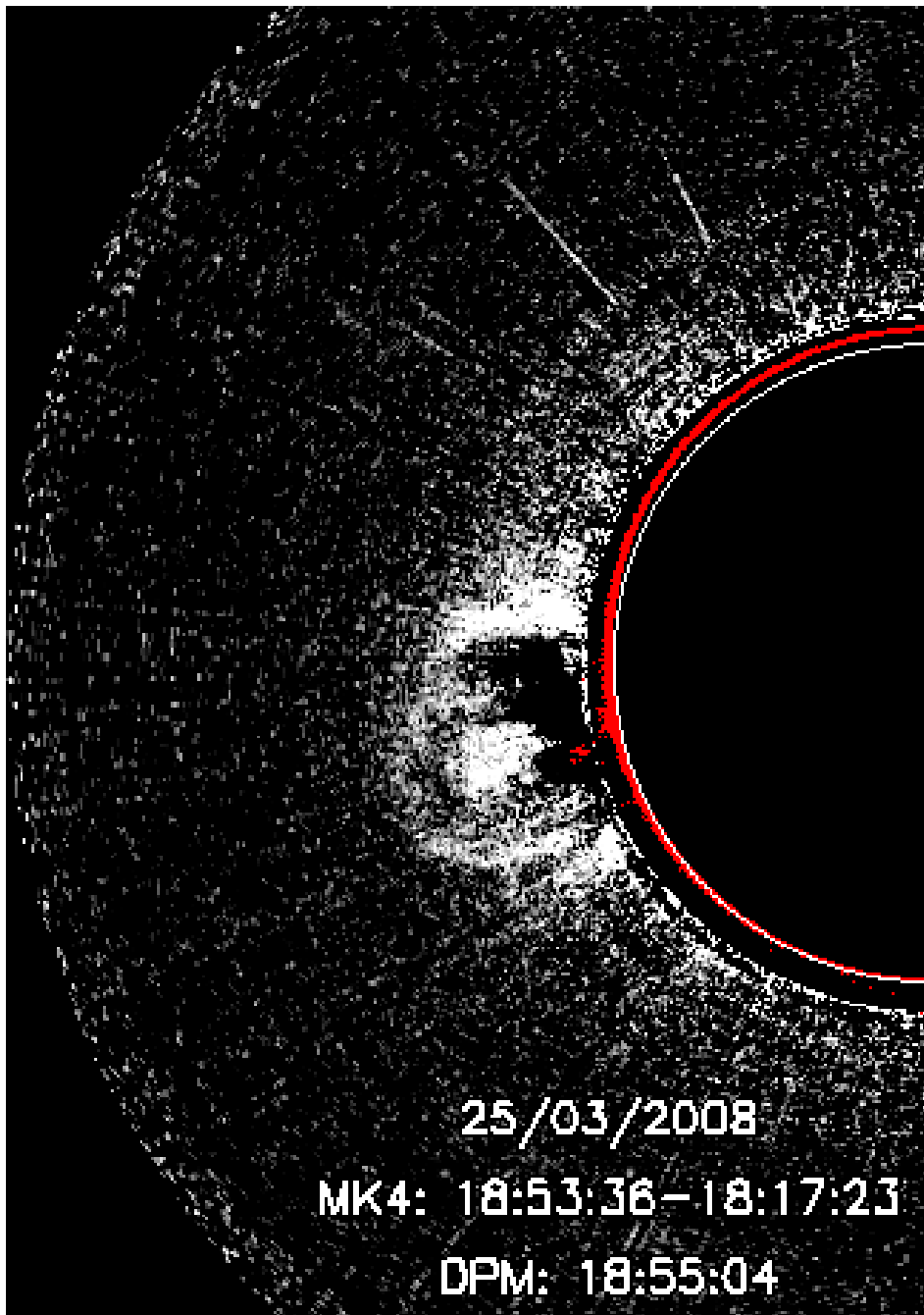


Импульсный СМЕ

25 марта 2008 г.

$V \approx 1100$ км/с

связан с активным
протуберанцем

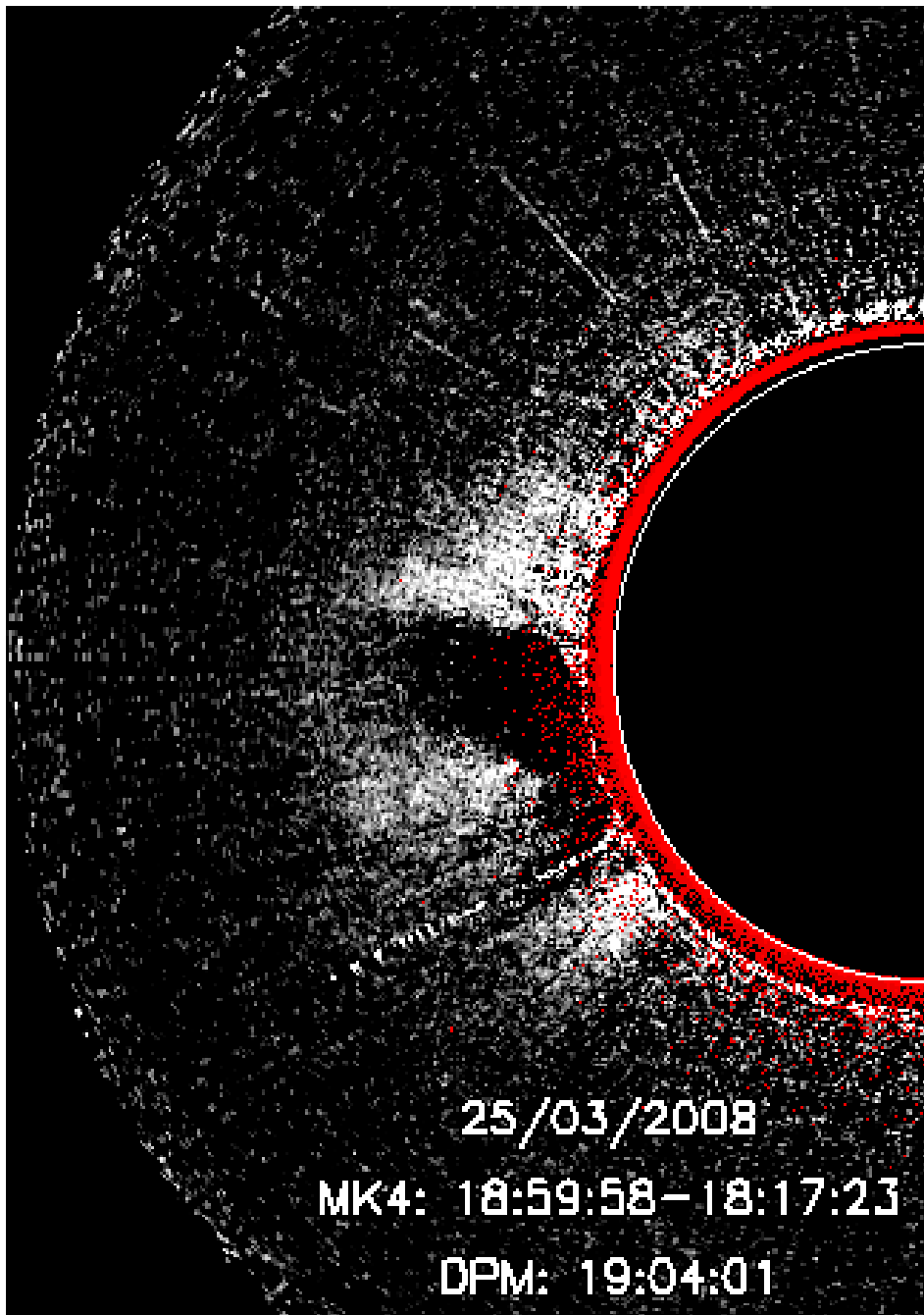


Импульсный СМЕ

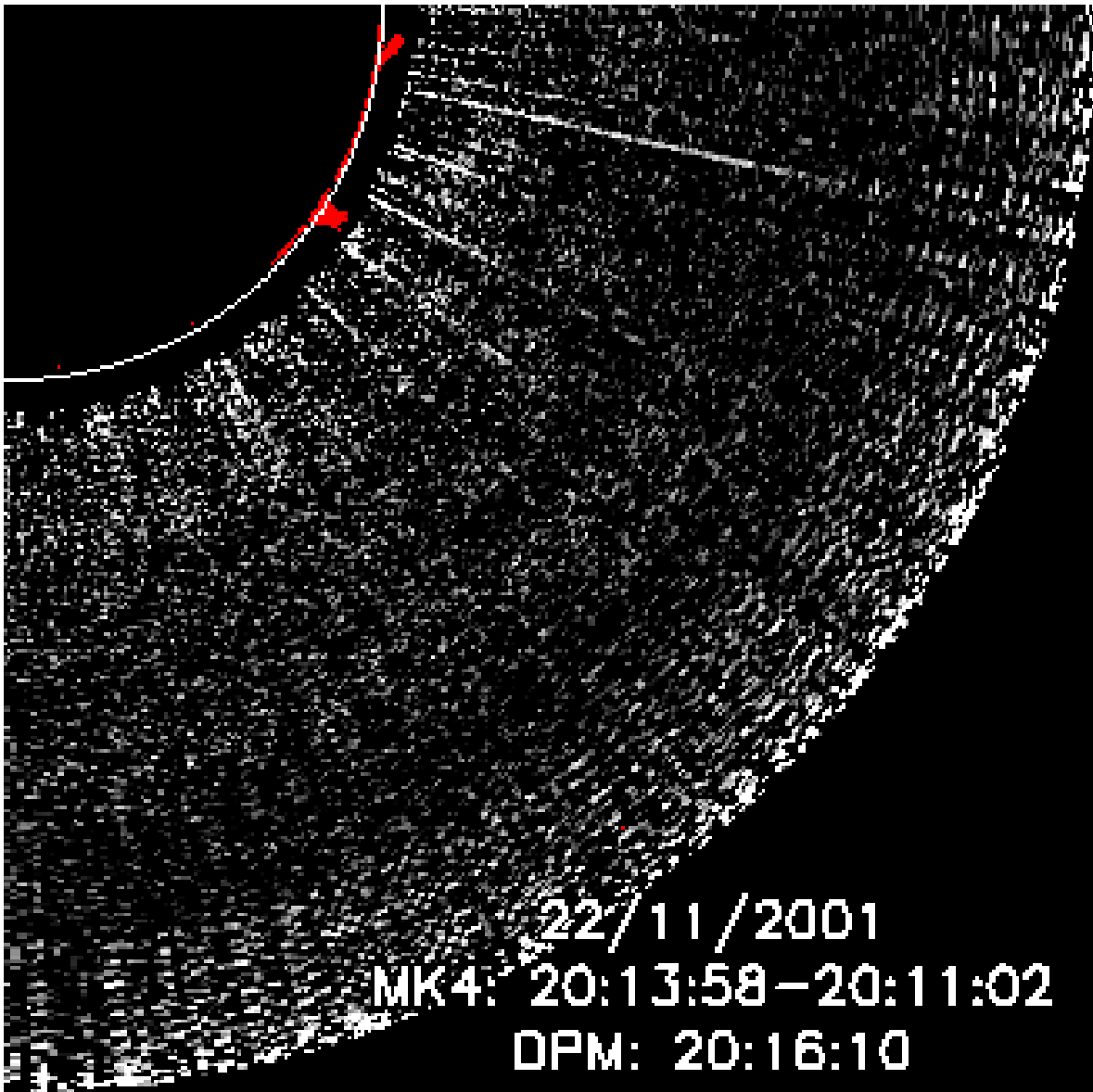
25 марта 2008 г.

$V \approx 1100$ км/с

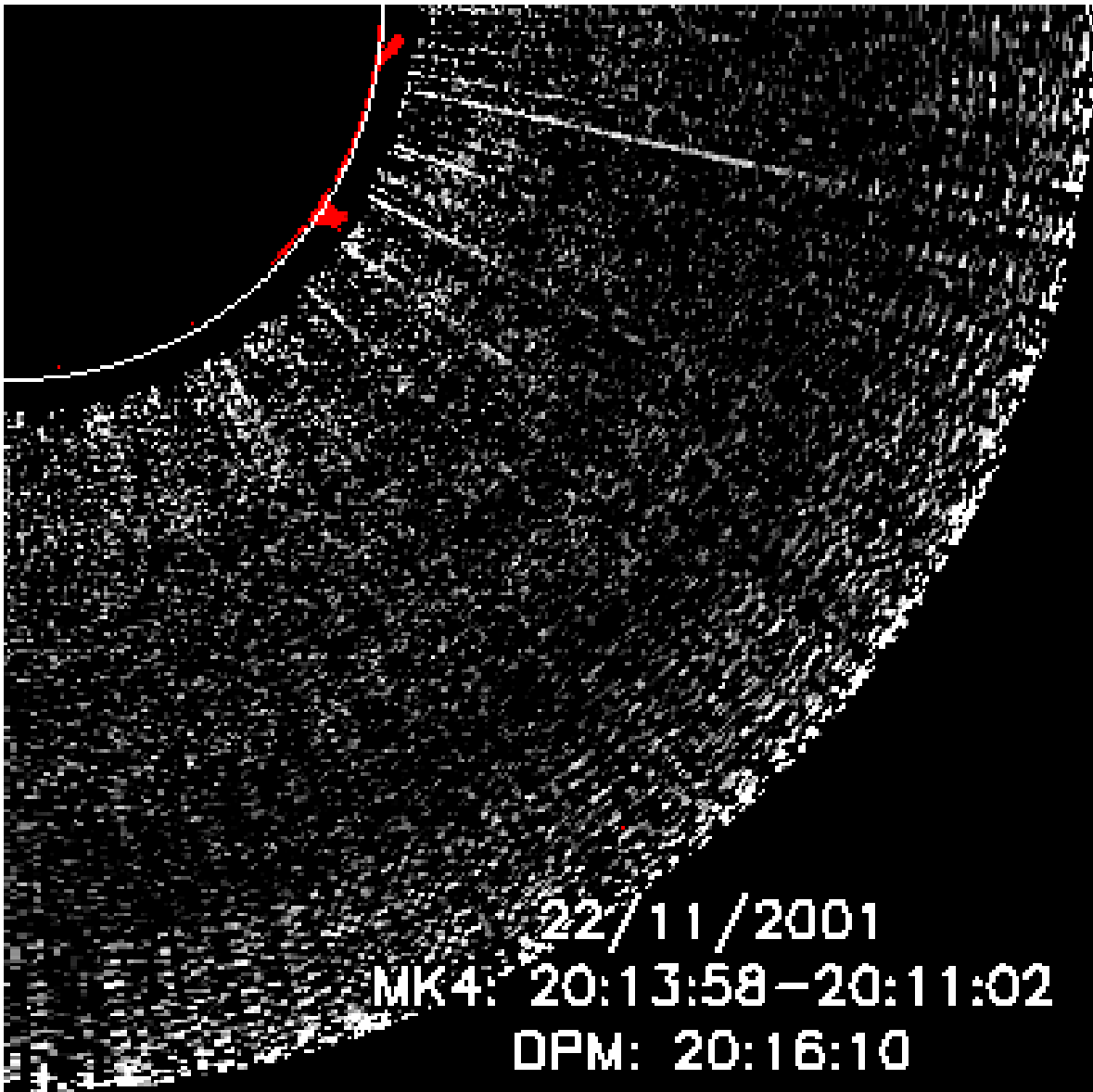
связан с активным
протуберанцем



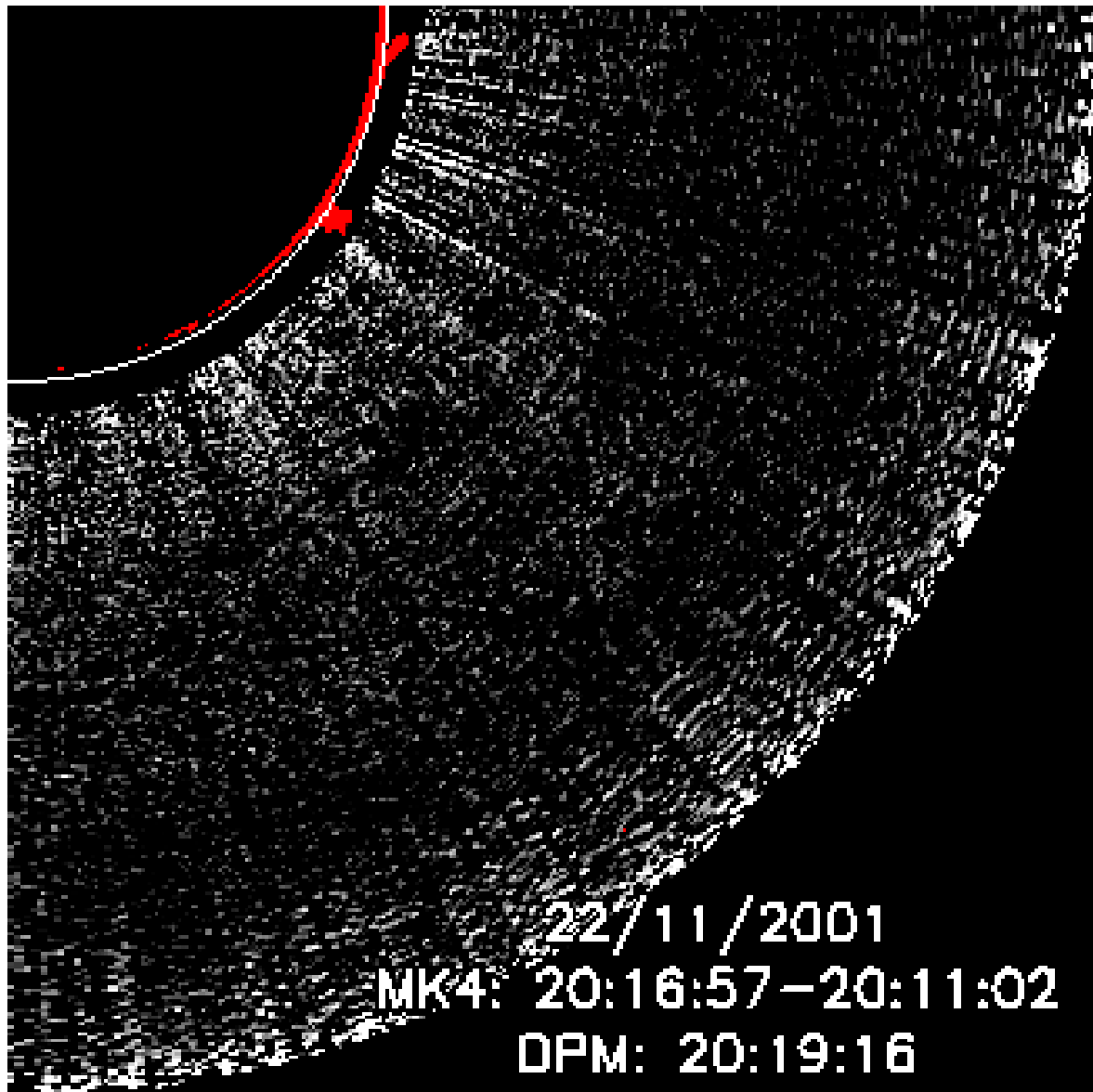
Второй пример импульсного СМЕ - 22 ноября 2001 г.
связан со вспышкой



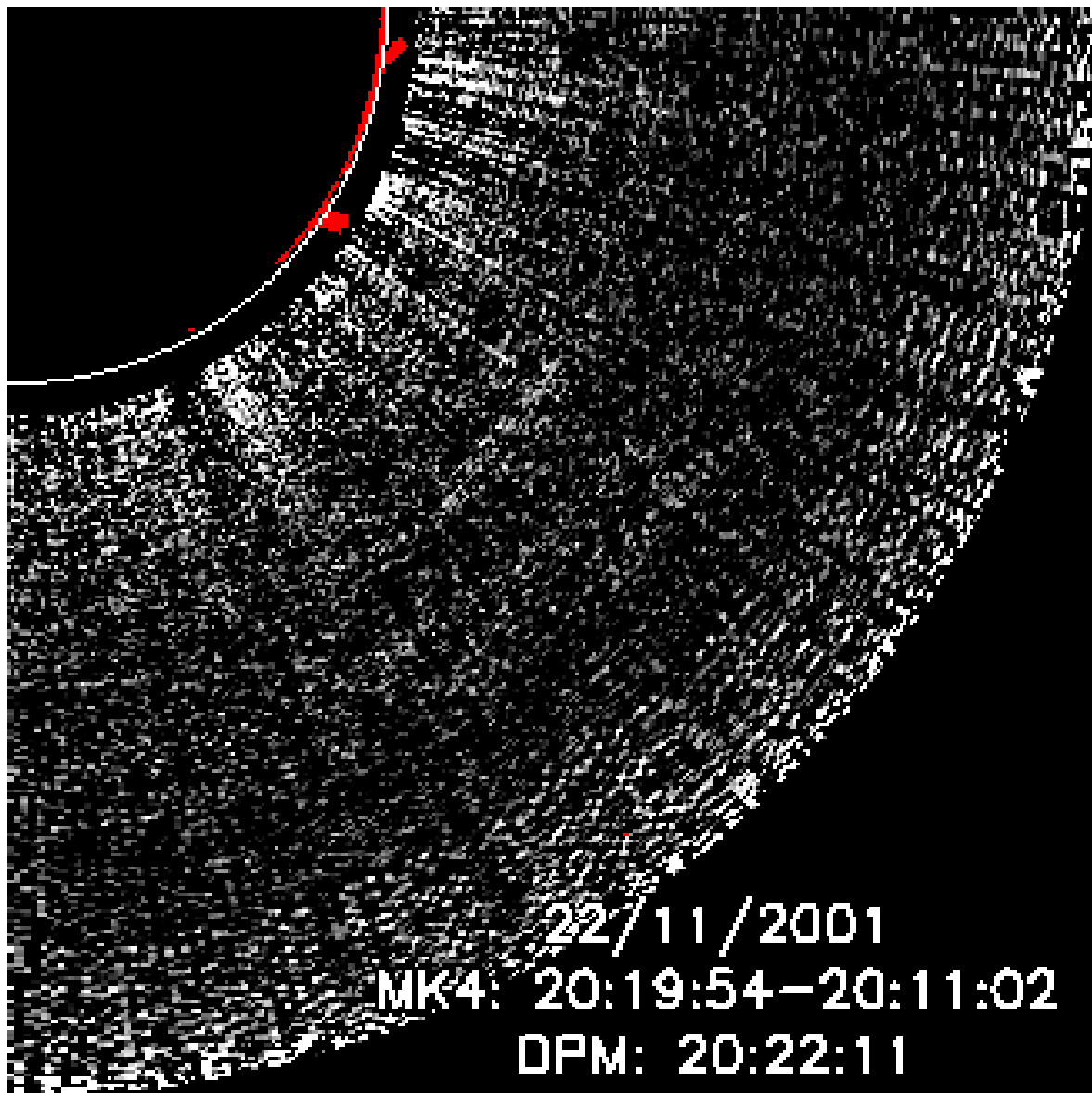
Импульсный СМЕ
22 ноября 2001 г.
 $V \approx 1400$ км/с
СВЯЗАН СО ВСПЫШКОЙ



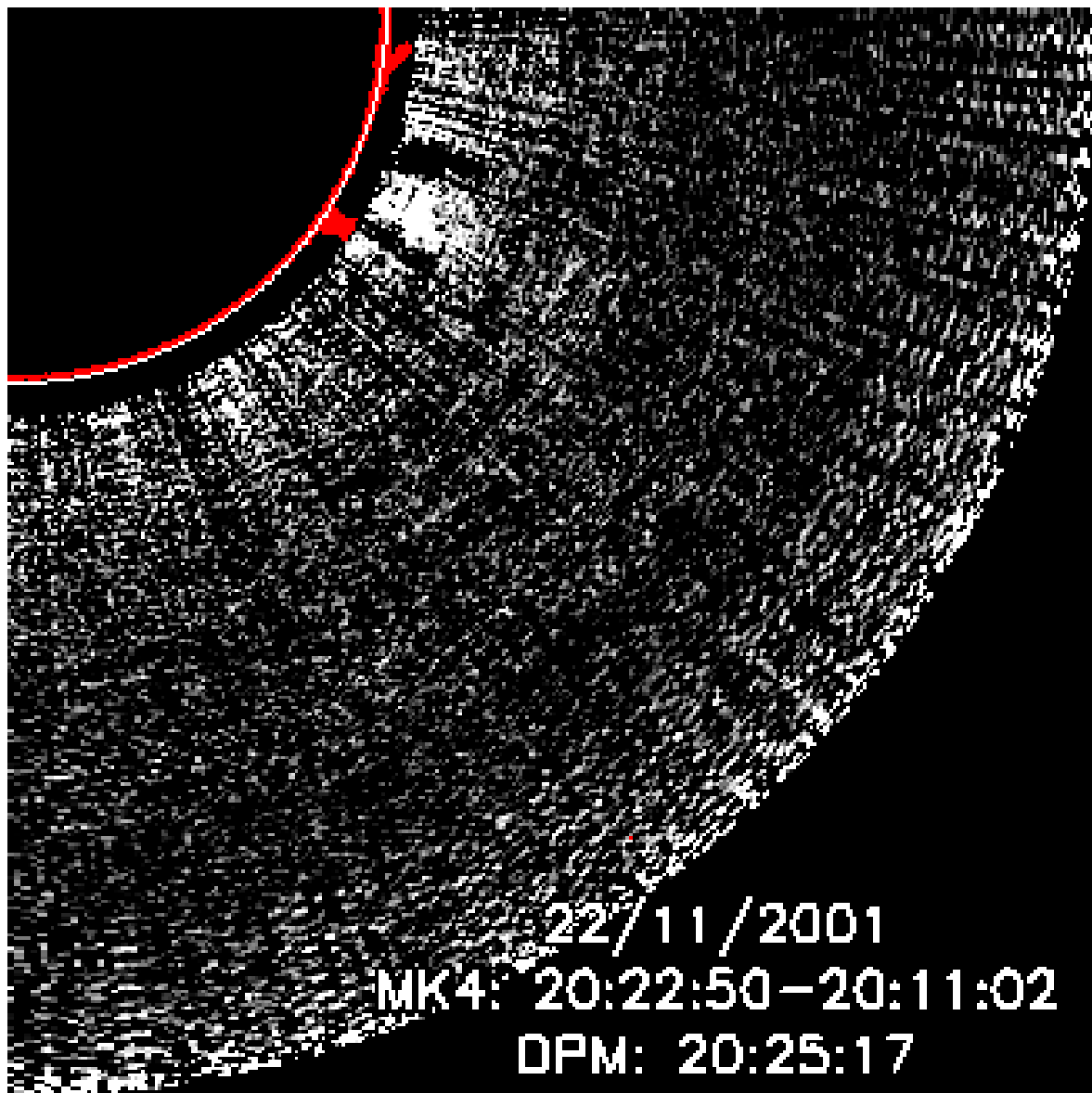
Импульсный СМЕ
22 ноября 2001 г.
 $V \approx 1400$ км/с
СВЯЗАН СО ВСПЫШКОЙ



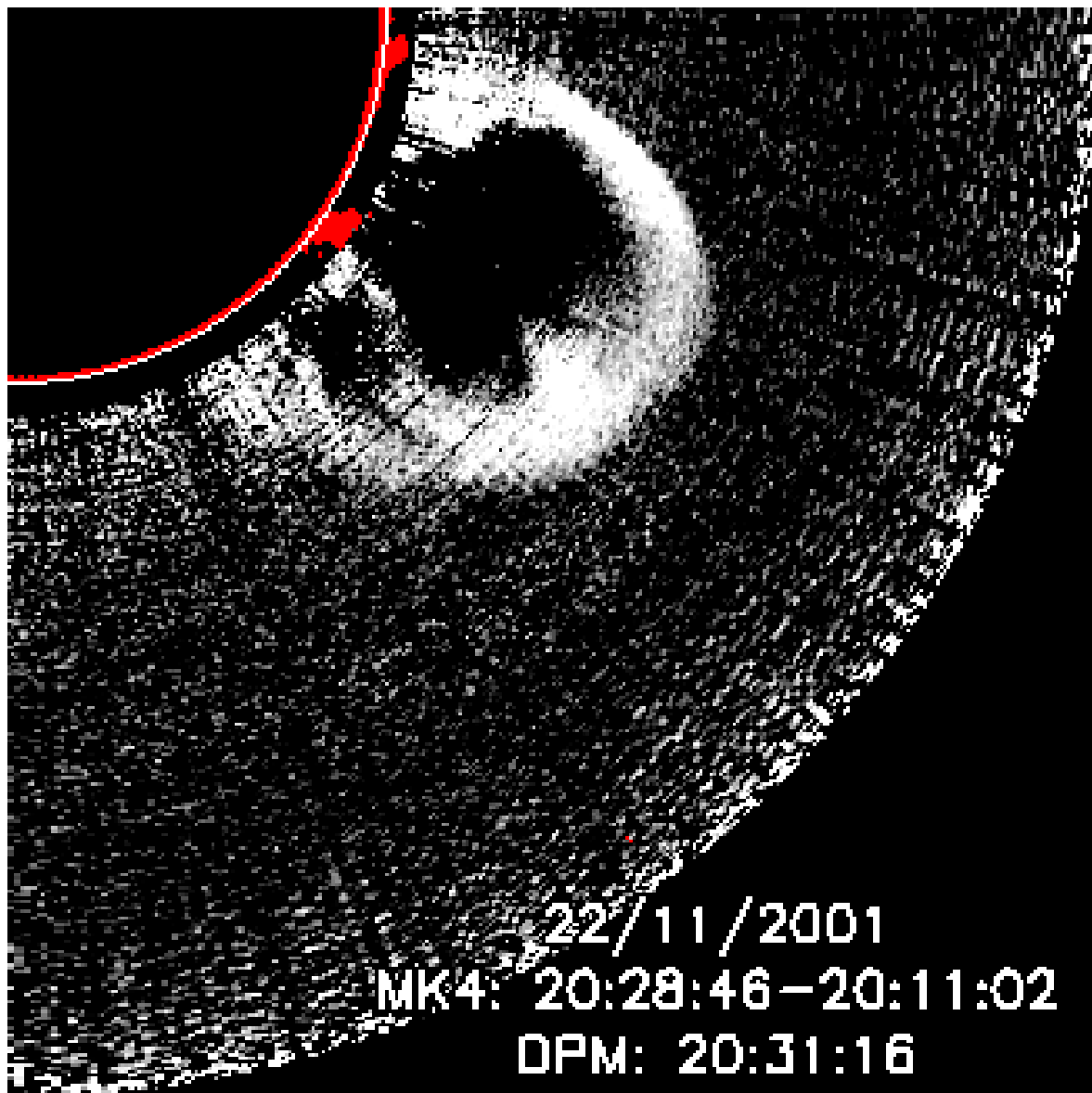
Импульсный СМЕ
22 ноября 2001 г.
 $V \approx 1400$ км/с
СВЯЗАН СО ВСПЫШКОЙ



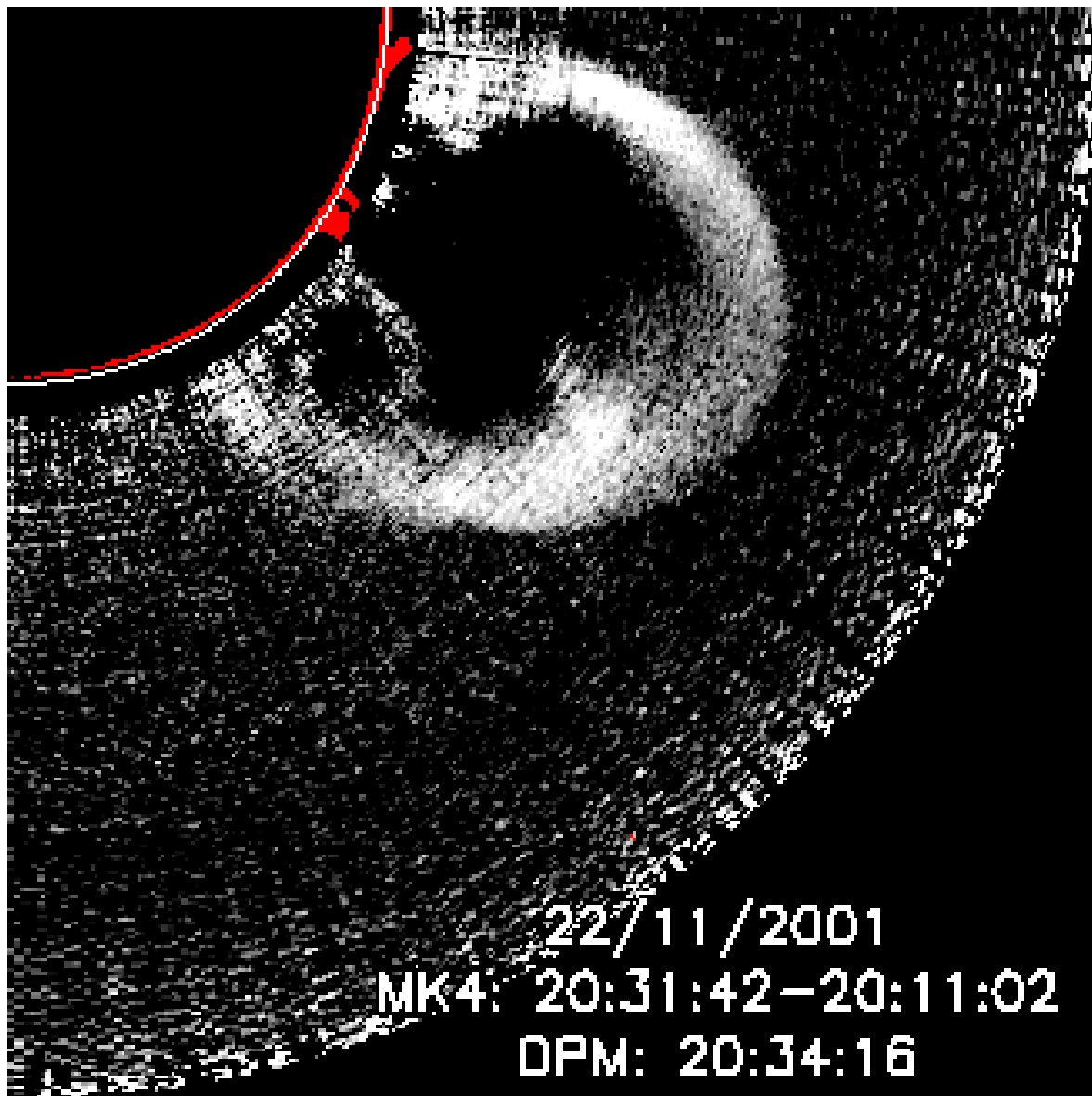
Импульсный СМЕ
22 ноября 2001 г.
 $V \approx 1400$ км/с
СВЯЗАН СО ВСПЫШКОЙ



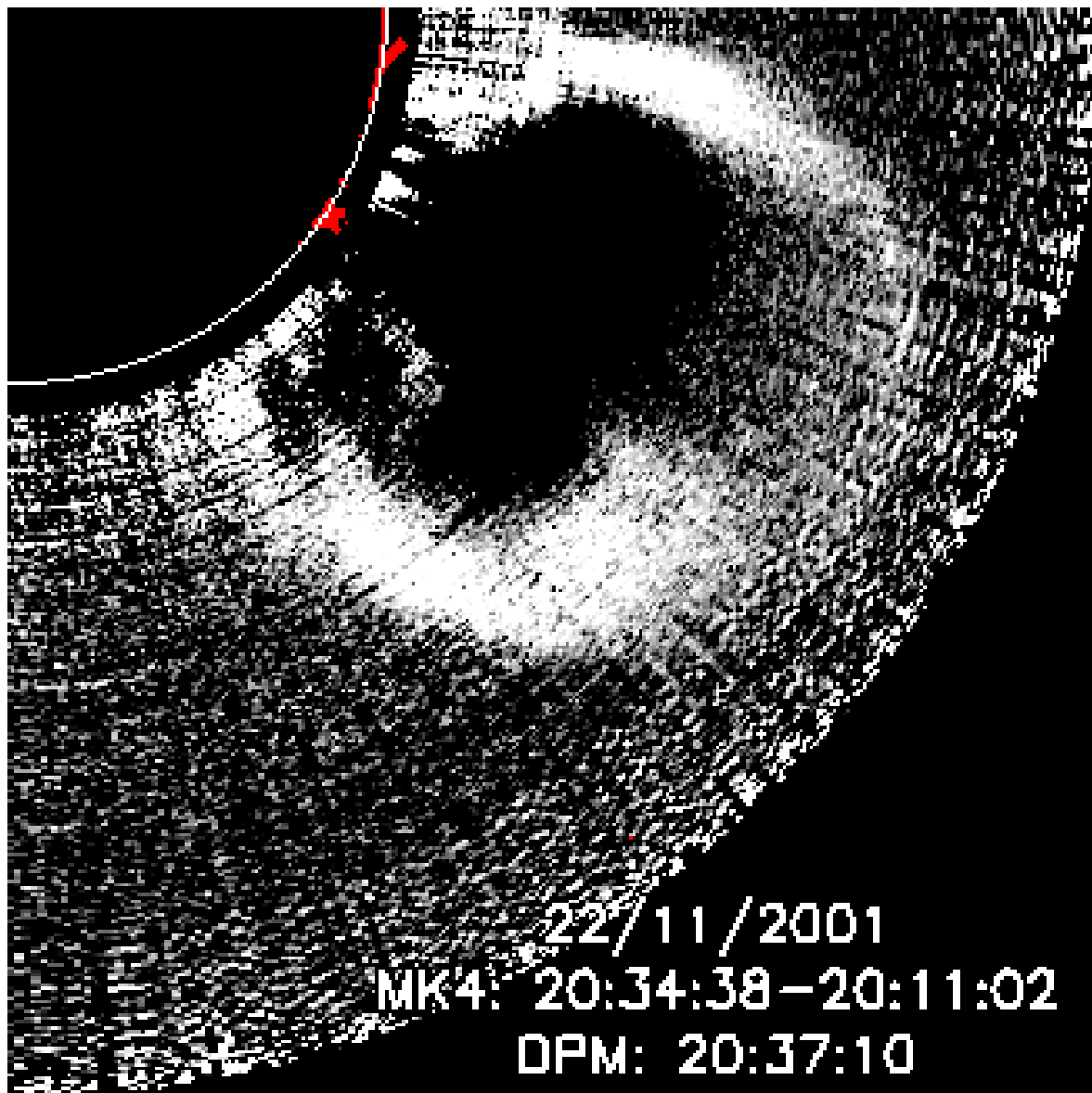
Импульсный СМЕ
22 ноября 2001 г.
 $V \approx 1400$ км/с
СВЯЗАН СО ВСПЫШКОЙ



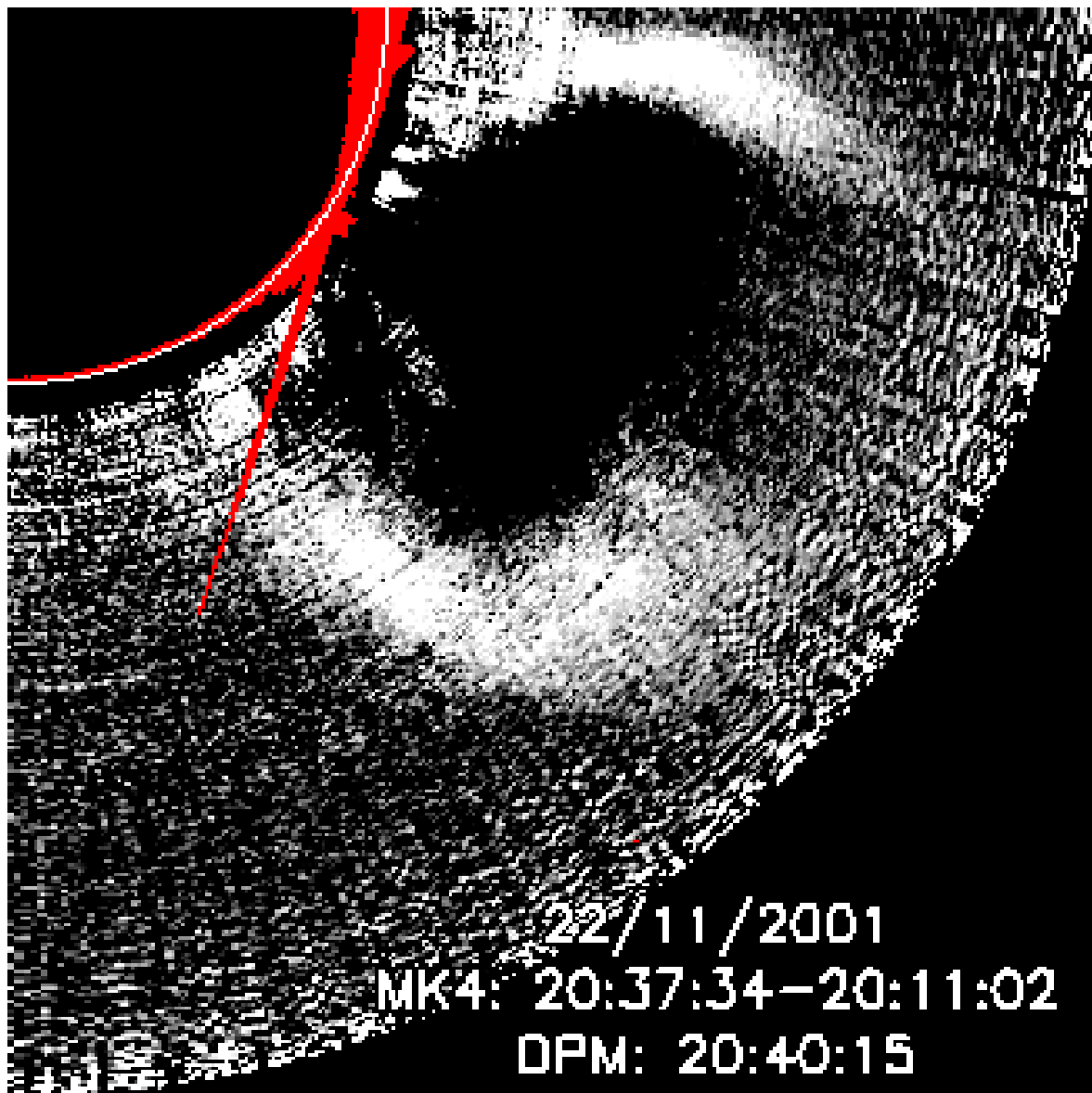
Импульсный СМЕ
22 ноября 2001 г.
 $V \approx 1400$ км/с
СВЯЗАН СО ВСПЫШКОЙ



Импульсный СМЕ
22 ноября 2001 г.
 $V \approx 1400$ км/с
СВЯЗАН СО ВСПЫШКОЙ



Импульсный СМЕ
22 ноября 2001 г.
 $V \approx 1400$ км/с
СВЯЗАН СО ВСПЫШКОЙ

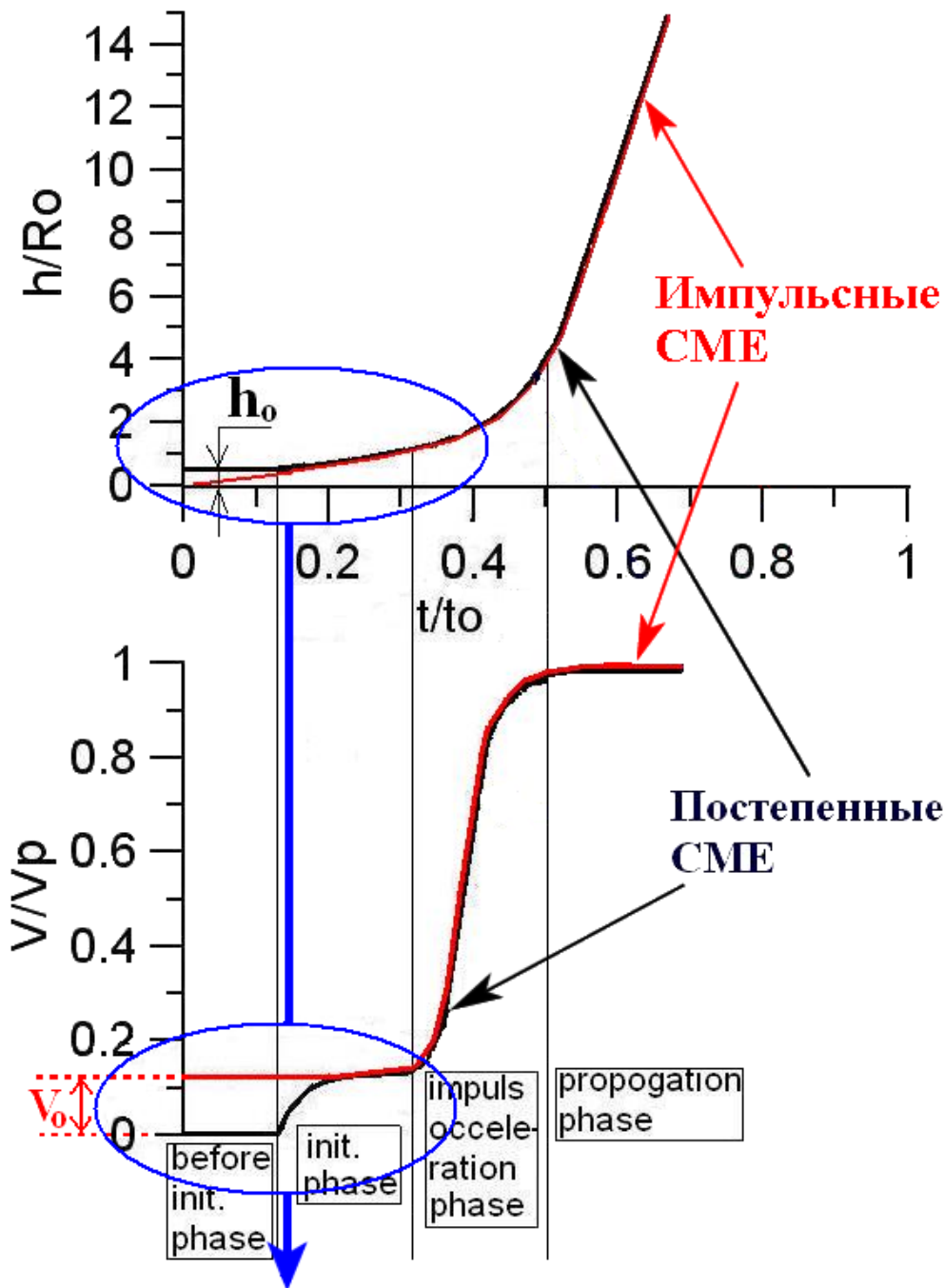


Импульсный СМЕ
22 ноября 2001 г.
 $V \approx 1400$ км/с
СВЯЗАН СО ВСПЫШКОЙ

Визуальные отличия **импульсных** СМЕ от **постепенных** СМЕ:

1. Первая регистрация СМЕ в виде полости (области пониженной яркости), ограниченной ярким кольцом, происходит на очень малых высотах 2. По-видимому, отсутствует стадия **“before initiation phase”**, когда фронтальная структура (плазменное кольцо) покоится.

Более детально отличия можно видеть на графиках $h(t)$ и $V(t)$.

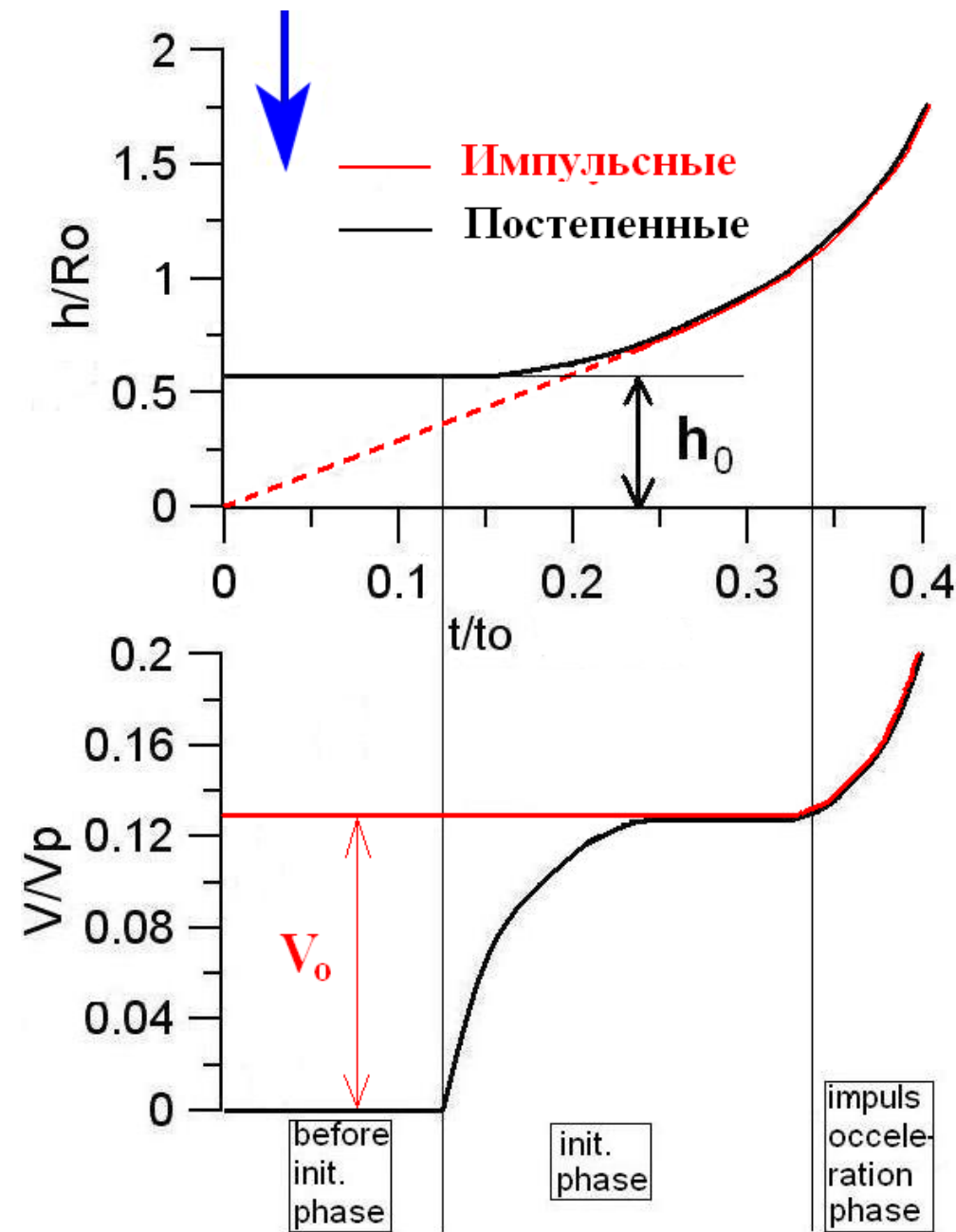


Зависимости $h(t)$ и $V(t)$ для импульсных (красные линии) и постепенных (черные линии) CME аналогичны в "impulsive phase" и "propagation phase".

Однако, в "before initiation phase" и "initiation phase" имеются принципиальные отличия.

Отличия (на примере СМЕ 25 марта 2008 г.):

- регистрация первых признаков появления СМЕ (по данным STEREO/EUVI, 171Å) происходит значительно ближе к поверхности Солнца, чем у **постепенных** СМЕ, на высоте $h_0 \approx 0.065R_0$ (**постепенные** на высоте $h \geq 0.2R_0$);
- скорость СМЕ уже на этой высоте составляет $V_0 \approx 240$ км/с, (**постепенные** СМЕ начинают движение из состояния покоя $V_0 \approx 0$);
- начальный угловой размер, составляет $d_0 \approx 2^\circ-3^\circ$ (для **постепенных** $d_0 \approx 15^\circ-65^\circ$).



Все это позволяет высказать новую гипотезу о происхождении импульсных СМЕ: они возникают не в короне, а выбрасываются из конвективной зоны!

Действительно, тот факт, что рассматриваемый импульсный СМЕ впервые появляется над фотосферой в виде полости с пониженной яркостью, т.е. с пониженной концентрацией плазмы, означает, что в нем имеется повышенное магнитное поле. Границы полости достаточно четкие. Это может означать, что в плоскости лимба мы регистрируем, по-видимому, поперечное сечение быстро всплывающей из конвективной зоны магнитной трубки (жгута). При вылете в корону объем трубки резко увеличивается, т.к. полное давление окружающей плазмы в короне существенно меньше, чем на уровне фотосферы.

Анализ УФ изображений и оценки показали, что угловой размер трубки на уровне фотосферы $d_0 \approx 1^\circ-2^\circ$, а на высоте $h_C \approx 0.055 R_0 - d \approx 4^\circ-5^\circ$, т.е. увеличение объема трубки происходит в $\approx 30-50$ раз. Примерно во столько же раз должна уменьшиться концентрация плазмы внутри трубки при достижении высоты h_C .

Итак, согласно гипотезы, оба типа СМЕ, по-видимому, представляют собой магнитную трубку (жгут). Однако, наблюдаемые заметные различия на стадии формирования означают, что механизмы их возникновения отличаются **принципиально**. Если **постепенные** СМЕ возникают из статического положения на некоторой высоте над лимбом в короне, то **импульсные** СМЕ выбрасываются из конвективной зоны в атмосферу Солнца.

Скорость трубки при переходе через фотосферу может превышать локальную скорость звука $V_S = (5/3 \times P/\rho)^{1/2} \approx 8-10$ км/с, где ($P = 1.14 \times 10^5$ эрг/см³ и $\rho = 2.6 \times 10^{-7}$ г/см³ – давление и плотность плазмы на уровне фотосферы). Возможность такого явления рассматривалась в работе **Романов и др., 1993**. Было показано, что равновесное положение магнитной трубки в зоне Динамо может становиться неустойчивым в результате прогрева содержащегося внутри нее газа окружающим газом. В результате трубка всплывает к фотосферному уровню в режиме конвективной неустойчивости. При этом возможны режимы сверхзвукового выброса трубки в атмосферу Солнца.

Всплывание магнитных полей с дозвуковыми скоростями ($\approx 1-2$ км/с), которое приводит к формированию активных областей, и, в частности, квазистационарных жгутов магнитного потока, исследовалось в ряде работ как теоретически *Романов и др. 1993, Fan et al., 2001*, так и экспериментально *Fan et al., 2001, Leka et al., 1996; Григорьев и др., 2007*.

Выводы

Показано, что:

1. Параметрами, отражающими различие физической природы возникновения **импульсных** и **постепенных** СМЕ, являются **место, скорость и угловой размер СМЕ в момент их возникновения.**
2. Место возникновения **постепенных** СМЕ находится в короне на высоте $0.1R_0 < h \leq 0.7 R_0$ над лимбом Солнца. Они начинают движение, имея угловой размер в диапазоне $\approx 15^\circ$ - 65° с начальной скоростью $V_0 \approx 0$. Вероятным механизмом их возникновения является эрупция квазистационарного коронального жгута магнитного поля.
3. Формирование **импульсных** СМЕ, по-видимому, начинается под фотосферными слоями Солнца и может быть связано с явлением сверхзвукового всплывания магнитных трубок (жгутов) из зоны Динамо, возможность которого было показана ранее теоретически. На уровне фотосферы радиальная скорость таких трубок превышает локальную скорость звука и может достигать от десятков до сотен км/с, а их угловой размер не превышает $\approx 1^\circ$ - 5° .

Спасибо за внимание!