

СЛЪНЧЕВИ ИЗБУХВАНИЯ [SOLAR FLARES]

Д-Р РОСИЦА МИТЕВА

ИКИТ-БАН

RMITEVA@SPACE.BAS.BG

Литература:

Benz, A. O., Living Reviews in Solar Physics (2016), <https://link.springer.com/article/10.1007/s41116-016-0004-3>

Fletcher et al., Space Sci. Rev. (2011)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Слънчевото избухване

е процес на освобождаване на магнитна енергия и превръщането ѝ в лъчение, топлина и движение на коронална плазма чрез процес на магнитно присъединяване за време от минути до часове, или комплексно еруптивно събитие съпроводено с:

- излъчване на огромно количество електромагнитна радиация (от гама до радио диапазона): 10^{32} erg,
- движение на коронална маса (струи, коронално изхвърляне на маса),
- ускорение на частици (протони, електрони, тежки йони),
- преструктуриране на магнитната конфигурация в активната област.

Големина (клас)

дефинира се в мекия рентген 1 – 8 Å на спътника GOES

X: 10^{-4} W/m²

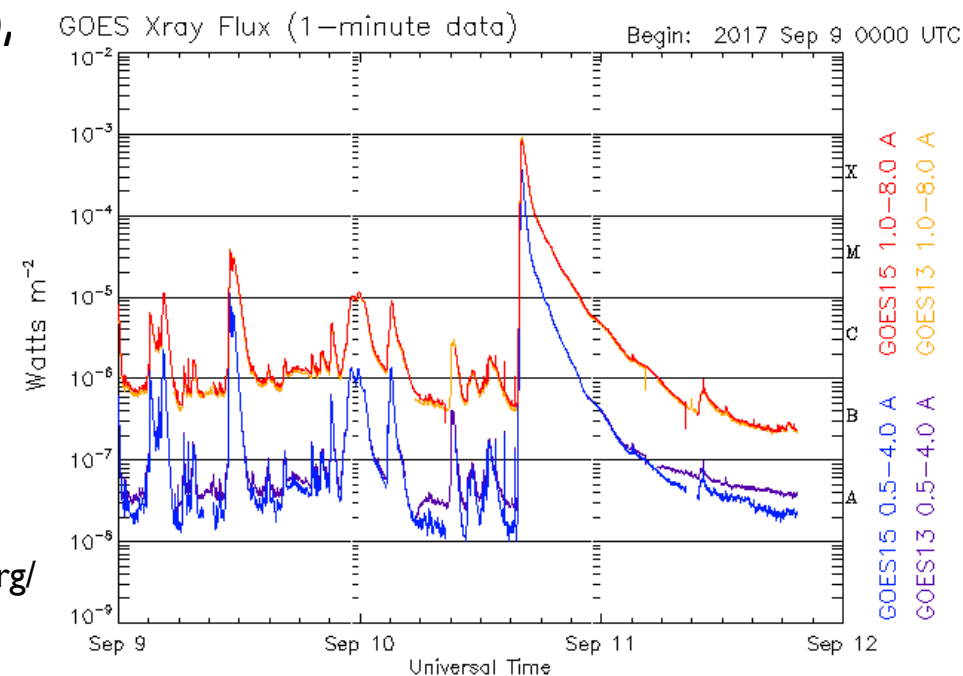
M: 10^{-5} W/m²

C: 10^{-6} W/m²

B: 10^{-7} W/m²

A: 10^{-8} W/m²

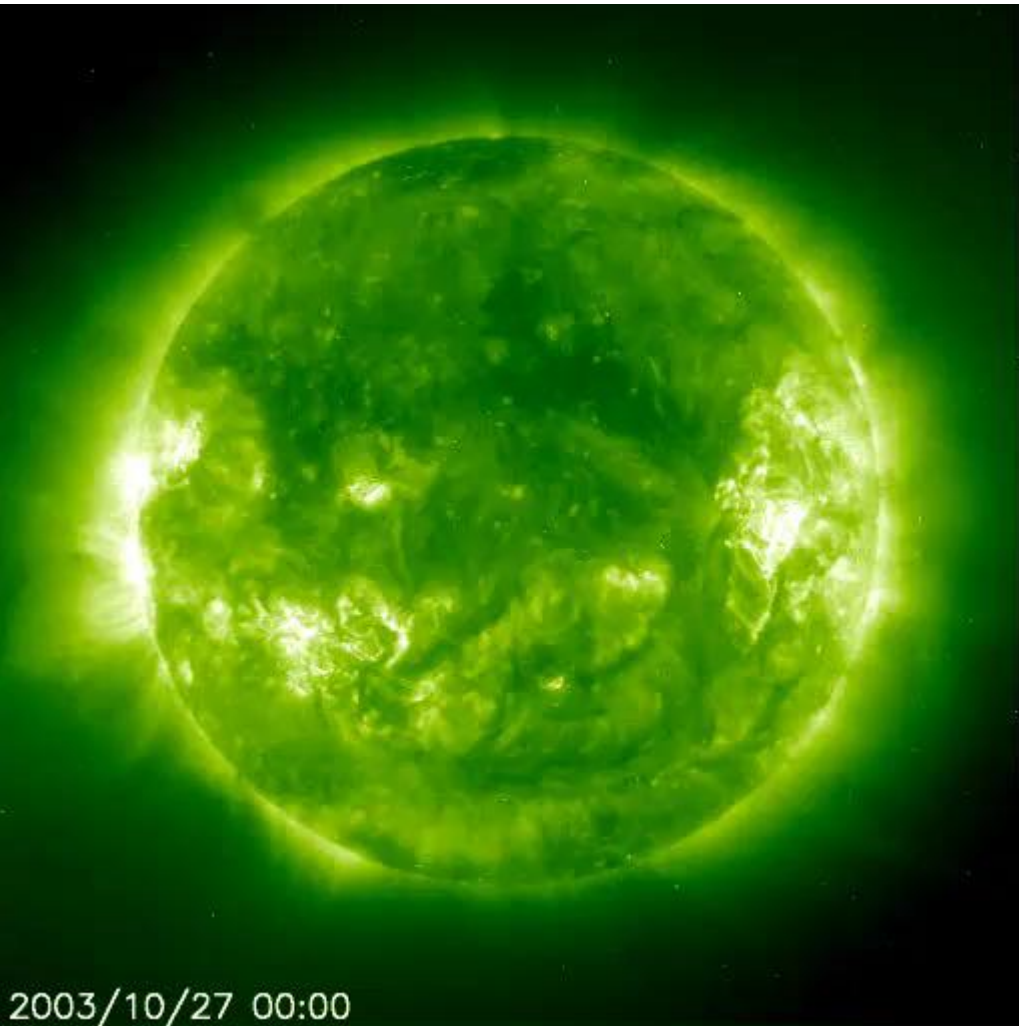
<https://solarmonitor.org/>



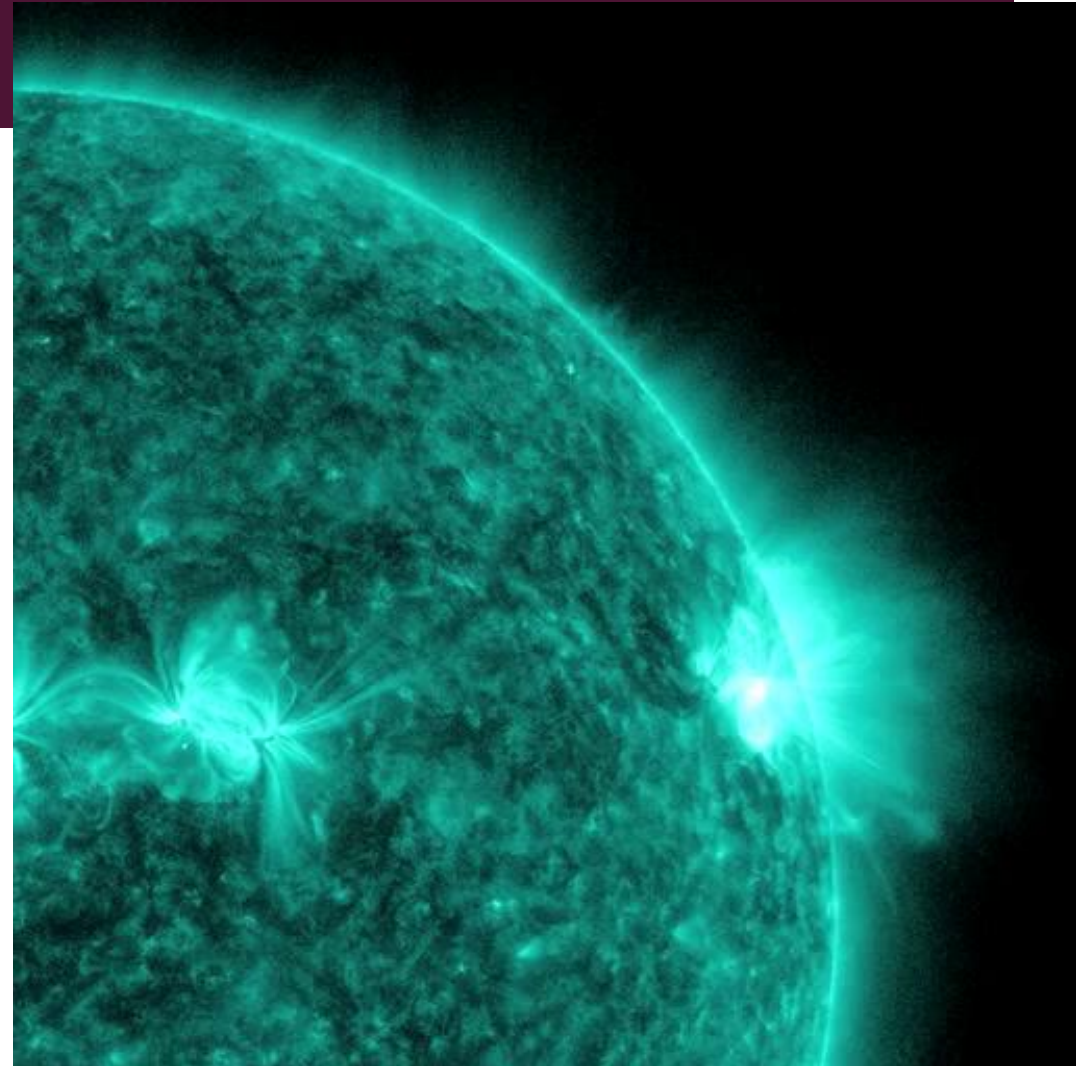
Updated 2017 Sep 11 19:28:11 UTC

NOAA/SWPC Boulder, CO USA

СЛЪНЧЕВИ ИЗБУХВАНИЯ



SDO/AIA
131 Å



SOHO/EIT
195 Å

1859-09-01 CARRINGTON-HODGSON FLARE EVENT

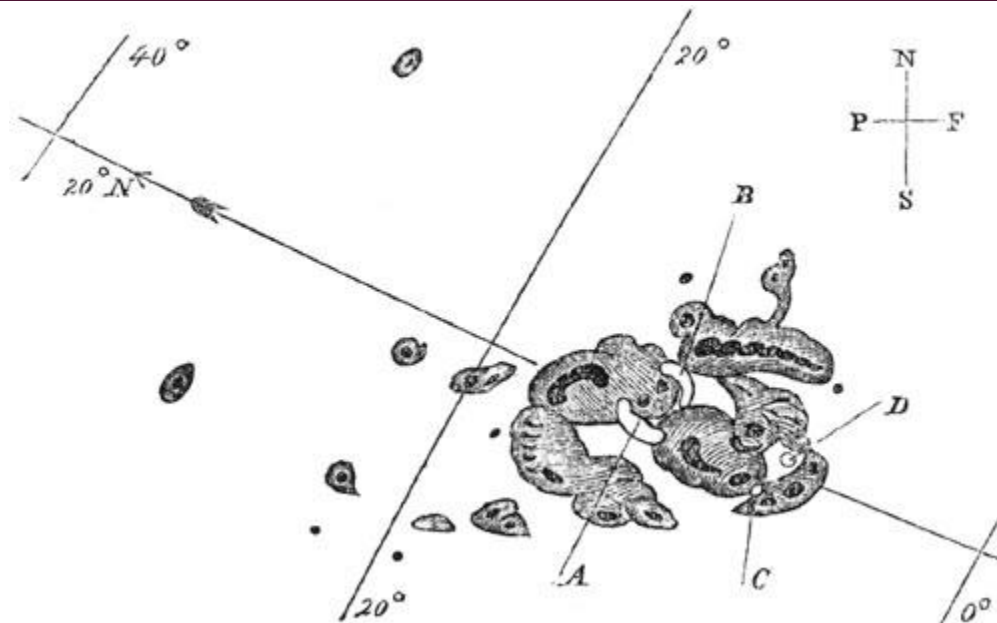


рисунок от Карингтън

След ~17.5 часа се наблюдава най-голямата геомагнитна буря досега с измервания от -800 nT до -1750 nT (оценка за скоростта на короналната маса ~ 2400 km/s, но има и по-бързи!)

Оценка: X_{45} ($45 \cdot 10^{-4}$ W/m²), най-голямо избухване досега!

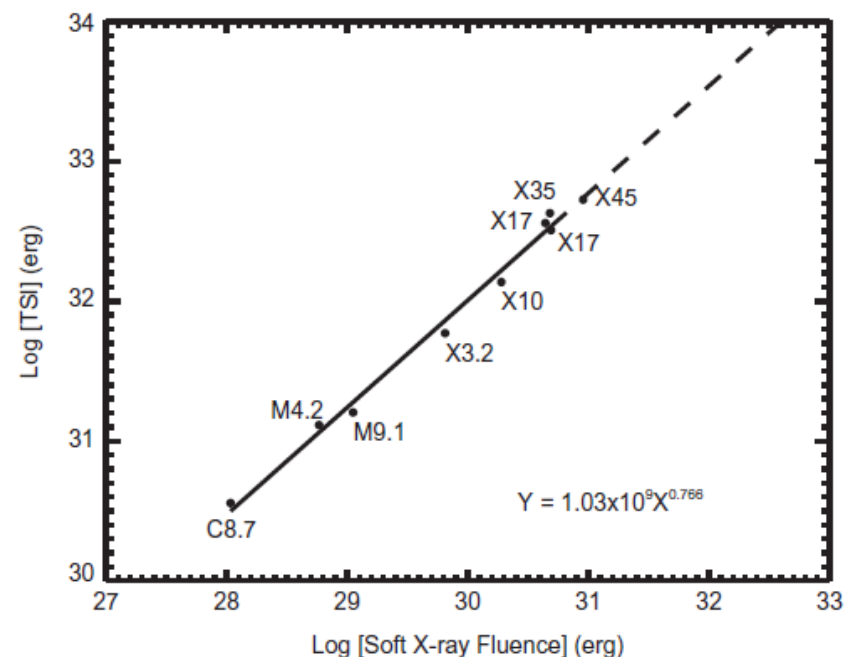


Fig. 3. Plot of the log of flare bolometric fluence vs. the log of the corresponding flare 1–8 Å SXR fluence. The data are taken from [Kretzschmar \(2011\)](#) and [Emslie et al. \(2012\)](#); we use X35 for the 4 November 2003 flare.) The regression line is a geometric mean least squares fit. The X45 event corresponds to the Carrington flare.

МЕСТОНАХОЖДЕНИЕ

- Предимно в активни области, (по границата) на места с различна ориентация на магнитно поле с хоризонтална компонента
- В спокойни области
- При избухване на протуберанси

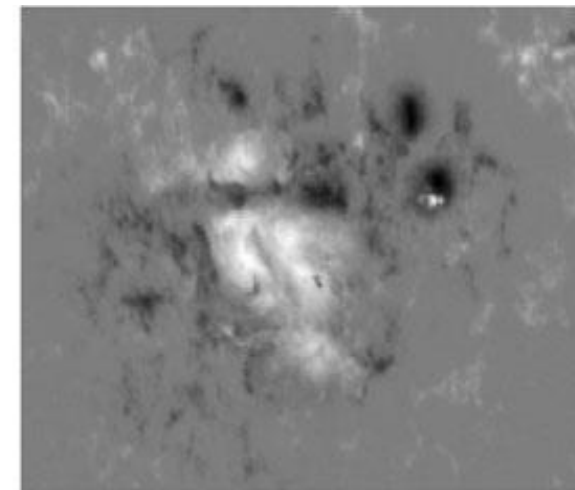
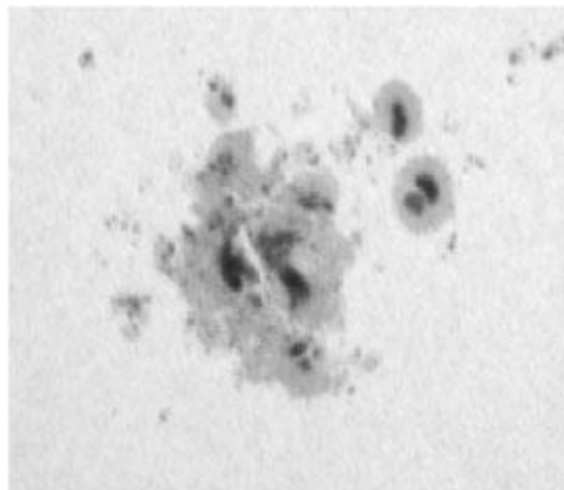
Най-силните избухвания възникват в околността на слънчеви петна с т.нар. δ -конфигурация (две сенки с обща полусиянка) и при силно магнитно усукване наблюдавано на фотосферно ниво, както и при активиране на протуберанси.

Все още не може да се прогнозира с точност кога и къде ще има избухване.

Fletcher et al. (2011), Fig. 2

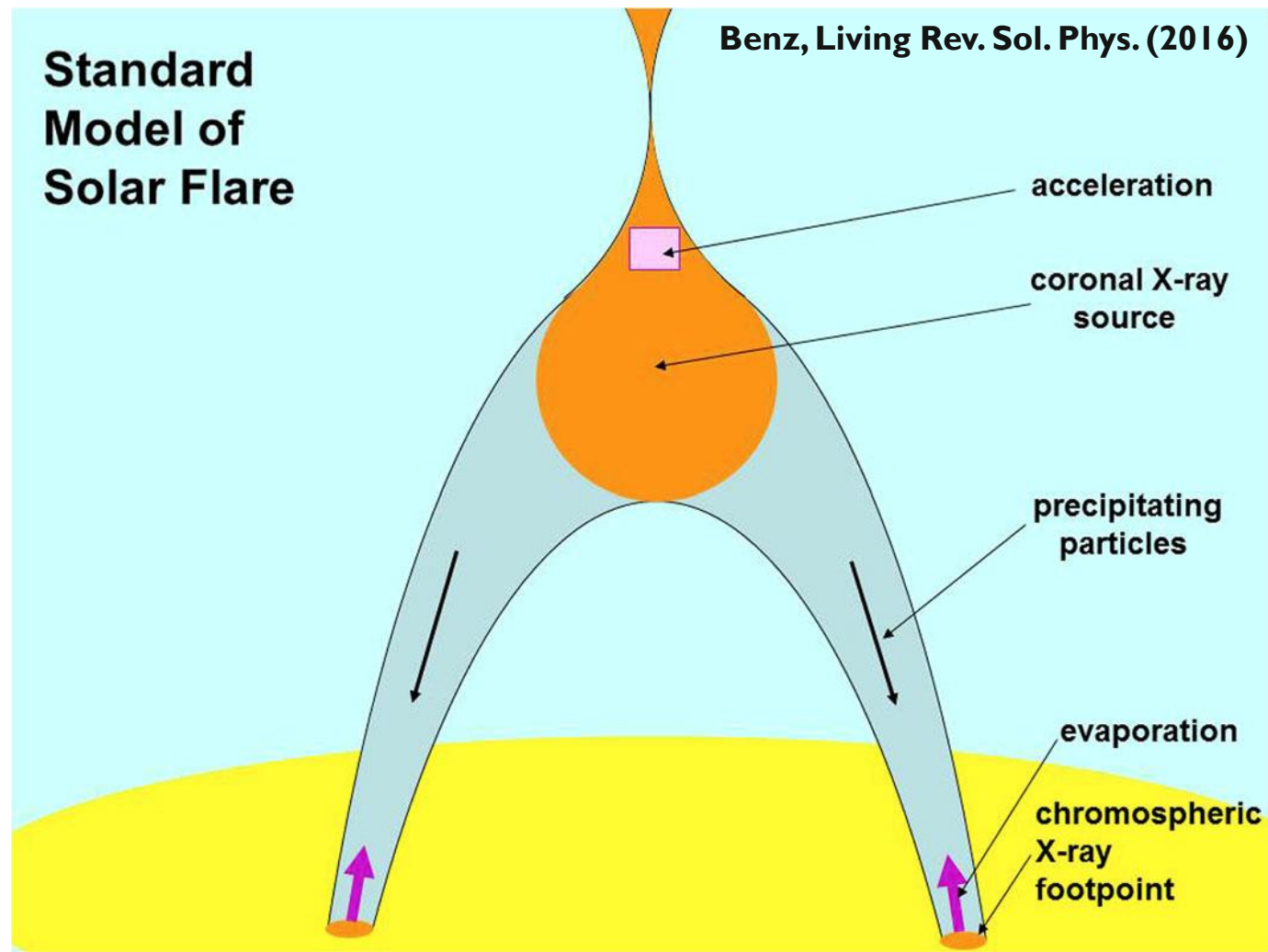
SOHO/MDI 28-Oct-2003 11:11:33

Continuum (*left*) and magnetogram (*right*) images of flare-active NOAA AR 10486, incl. SOL2003-10-29T20:49 (X10.0), SOL2003-11-03T09:55 (X3.9), and SOL2003-11-04T19:53 (X17.4), the most powerful GOES flare on record. The δ configuration is visible in the positive polarity region of this group, with three major umbrae.



СТАНДАРТЕН МОДЕЛ (КАЧЕСТВЕНО ОПИСАНИЕ)

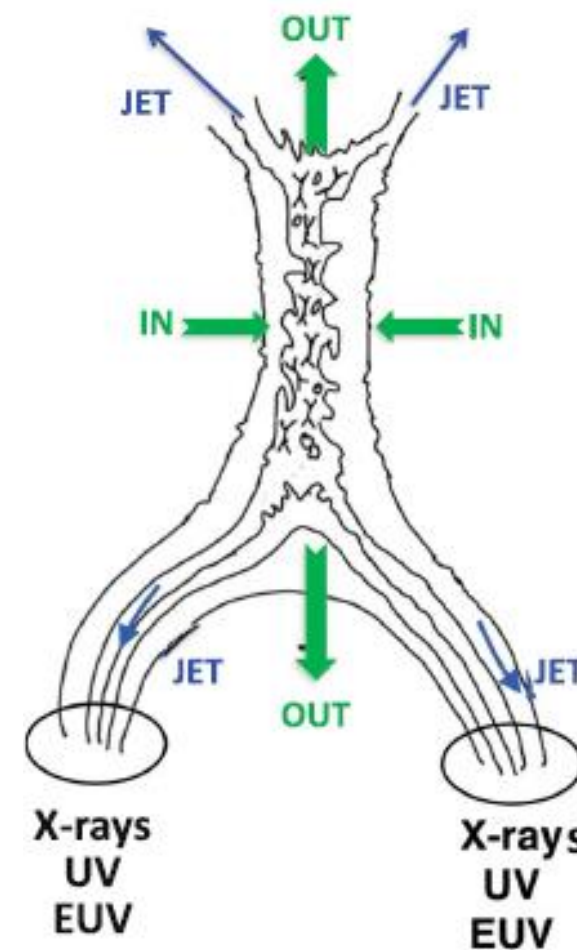
- CSHKP 2D-scenario: Carmichael (1964), Sturrock (1966), Hirayama (1974), Kopp & Pneumann (1976)
- Енергията на избухването се съдържа при магнитните силови линии, които от конвективната зона се появяват над повърхността. Избухването се детектира едва когато се наблюдава емисия от гореща плазма или вече ускорени частици.
- В активните области, големи на размери и интензитет както и видими под силен наклон магнитни полета натрупват свободната енергия (и създават нестабилни конфигурации). Нова поява на магнитен поток може да предизвика импулсното освобождаване на енергия. Това става над фотосферата, в хромосферата или в короната (Moore et al. 2001).
- <http://solarmuri.ssl.berkeley.edu/~hudson/cartoons/>



СТАНДАРТЕН МОДЕЛ (КАЧЕСТВЕНО ОПИСАНИЕ)

Опростения сценарий постулира, че енергията на избухването идва от ускорените частици. Процесът на самото ускоряване, обаче, не е част от модела. Енергетичните частици достигат до хромосферата, където нагряват плазмата до високи температури, а арките стават видими в мекия рентген. Горещата плазма се разширява и изпълва магнитната арка в короната – процесът се нарича хромосферно изпарение. С този опростен модел могат да се обяснят следните наблюдения:

- Корелация между мек рентген и интегрирания твърд рентген (Neupert effect).
- Твърдият рентген (>25 keV) често произхожда от източници в основите на светещите в мекия рентген арки.
- Понякога коронален източник в твърд рентген се наблюдава над арката, в която предварително е имало депозит на енергия, а самата арка все още излъчва в мекия рентген (Masuda et al. 1994).
- Енергията съдържаща се в ускорените частици се оценява да е по-голяма от топлинната енергия в източника на мек рентген.
- Спектърът, наблюдаван в твърд рентген на нетоплинните електрони в короналния източник, е по-мек (т.е. съставен от частици с по-ниски енергии) в сравнение със спектъра от източниците в основите на арката (предполага се, че мишената при основите е по-плътна). В този случай, електроните изгубват цялата си кинетична енергия и емисията е резултат от всички удари до достигане на пълен покой на частиците (thick target, bremsstrahlung emission).
- Наблюдава се хромосферен материал изпълващ магнитната арка – индиректно чрез увеличение на интензитета (emission measure) в мекия рентген и директно – чрез синьо отместване на горещи линии и в изображения в мекия рентген.



Cairns et al. (2018)

www.nature.com/scientificreports

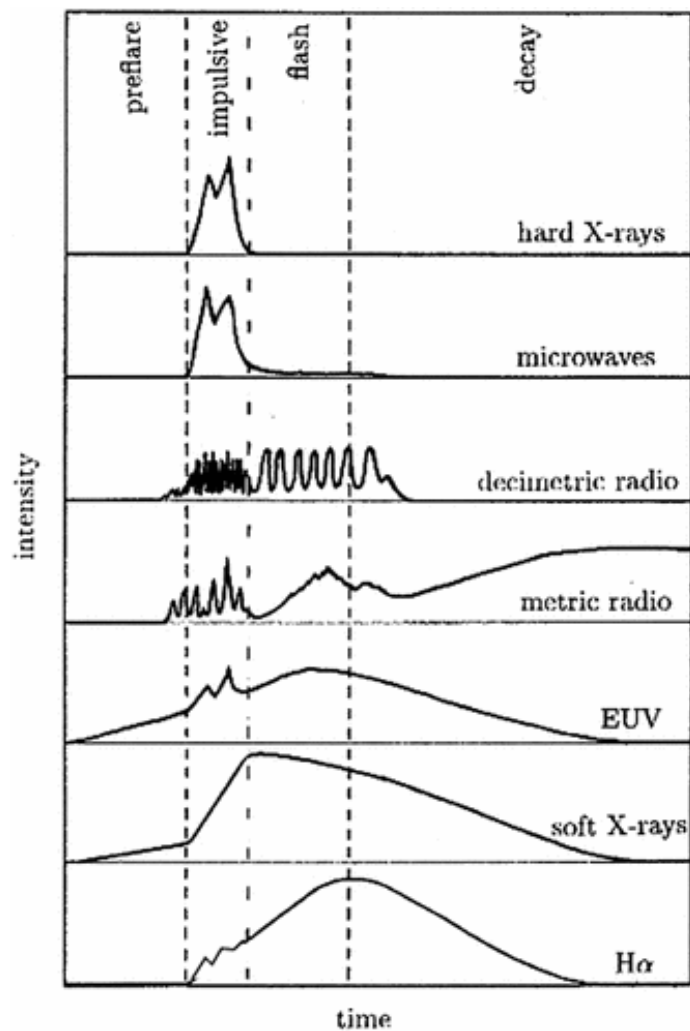
NEUPERT EFFECT

- Емпирична зависимост: времевия интеграл на нетоплинна емисия следва профила на топлинната емисия
- Neupert (1968) забелязва за първи път, че нарастването на потока в мекия рентген съответства на времевия интеграл на см-радио поток, от началото на избухването. Тъй като см-радио излъчването е от релативистки електрони, същата зависимост по-късно е открита с интеграла на интензитета на твърдия рентген.
- Neupert (1968) предполага, че има директна връзка между енергетичните електрони и топлинната плазма: излъчването в мекия рентген произлиза от плазма нагрята предимно от депозираната енергия чрез ускорени електрони по време на избухването.
- Уравнението е приближение, често се наблюдават случаи когато тази връзка не е изпълнена (особено когато имаме силно охлаждане чрез пренос или радиация).

$$F_{\text{SXR}}(t) \propto \int_{t_0}^t F_{\text{HXR}}(t') dt' ,$$

$$\frac{d}{dt} F_{\text{SXR}}(t) \propto F_{\text{HXR}}(t) .$$

НАБЛЮДЕНИЯ: КРИВИ НА БЛЯСЪКА



Основни фази на времева еволюция

Pre-flare

слабо нарастване в EUV, SXR, понякога се наблюдават и радио избухвания от тип III

Impulsive

рязко нарастване на потока във всички дължини на вълната

Gradual (flash + decay)

плавно спадане на интензитета от достигнатия максимум, нарастване в радио областта от избухвания тип IV

Benz (2002)

PRE-FLARE PHASE

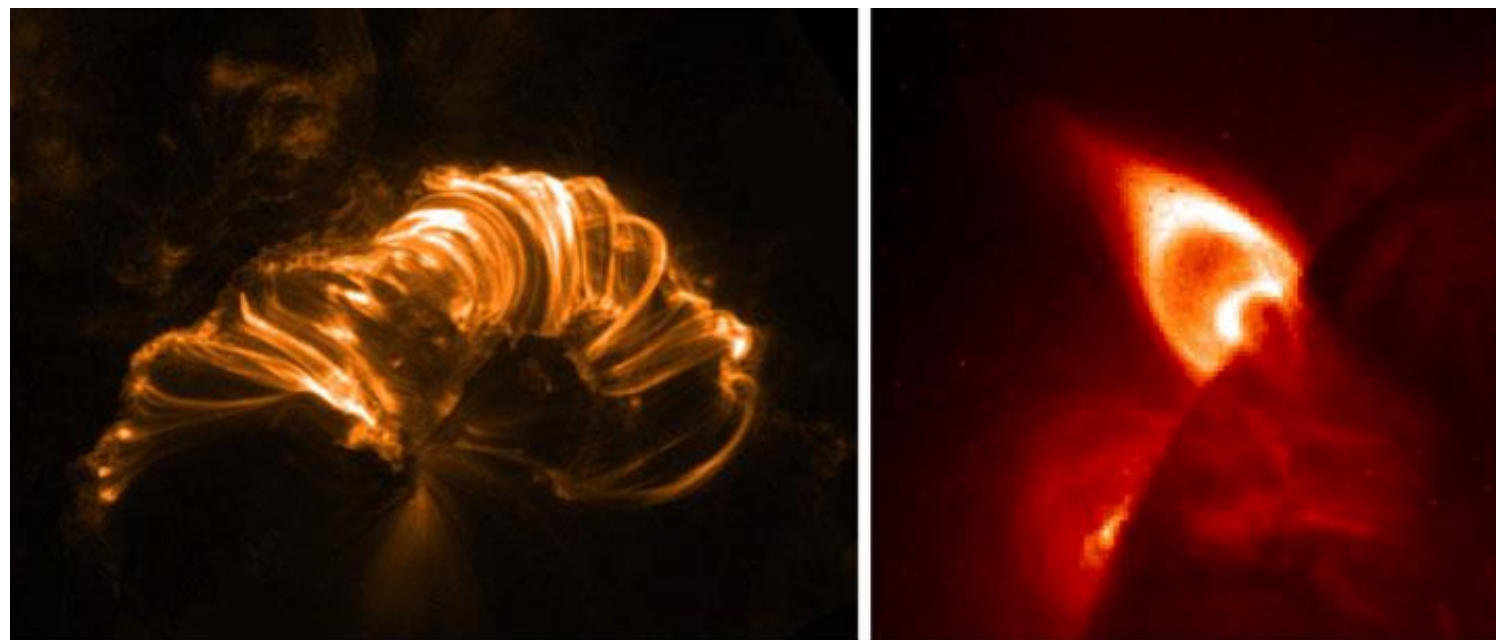
- Короналната плазма се нагрява и става видима в EUV, SXR във вид на малки проблясвания (flare precursor) – 10-на минути преди самото избухване в околността на избухването, но не на същото място
- Увеличаването на емисията в SXR изпреварва тази в HXR с около 3 минути, независимо от големината на избухването
- Наблюдава се разширение на спектралните линии
- Наблюдават се радио избухвания – в отделни случаи

IMPULSIVE PHASE

- Основното освобождаване на енергия (гама, твърд рентген, радио, оптичен континуум, както и ултравиолет и мек рентген) става по време на тази фаза, за време от секунди до десетки минути
- Ускорение на голям брой енергетични електрони до 10^{38} и в някои събития – йони
- Поява на *hard X-ray footpoint* на хромосферни височини (пренос на енергия до хромосферата)
- Високоенергетични частици се захващат в магнитни конфигурации и излъчват в радио диапазона
- Максимум на емисиите в топлинен мек рентген и $H\alpha$
- Промяна на магнитната конфигурация

GRADUAL PHASE

- Връщане на короналната плазма в началното състояние с изключение на високата корона, ($>1.2 R_{\odot}$), където продължава ускорението на частици при магнитното преструктуриране, движение на плазма, ударни вълни
- Бавен спад на емисията в мек рентген и радио (с часове)
- Формиране на магнитни арки (в мек рентген, ултравиолет и $H\alpha$), изпълнени с гореща хромосферна плазма (процес на т.нар. хромосферно „изпарение“)
- Коронален „дъжд“ по колоните на арките
- Най-горещи са най-външните арки (cusp), появя на по-високи и по-широки арки с времето – индиректно доказателство за модела на магнитно присъединяване
- Връзка между формирането на арката и ерупцията на протуберанс и коронална маса



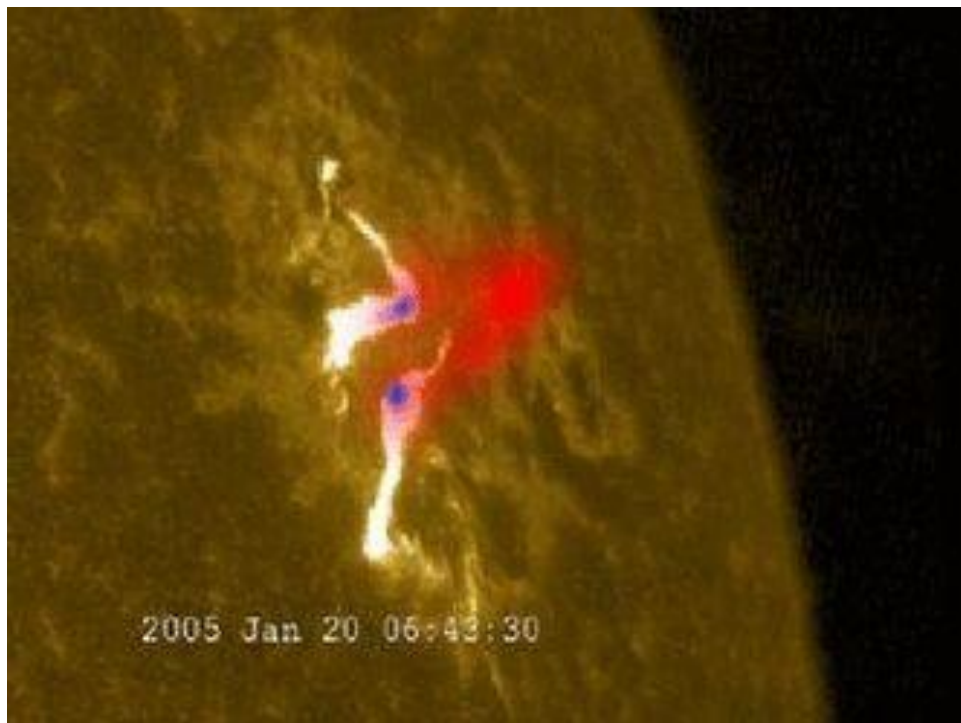
Fletcher et al. (2011)

Fig. 4 Left: a beautiful flare arcade (SOL2001-04-10T05:26, X2.3) seen here in the 171 Å channel of TRACE, revealing plasma at ~ 1 MK emitting in lines of Fe IX/X.

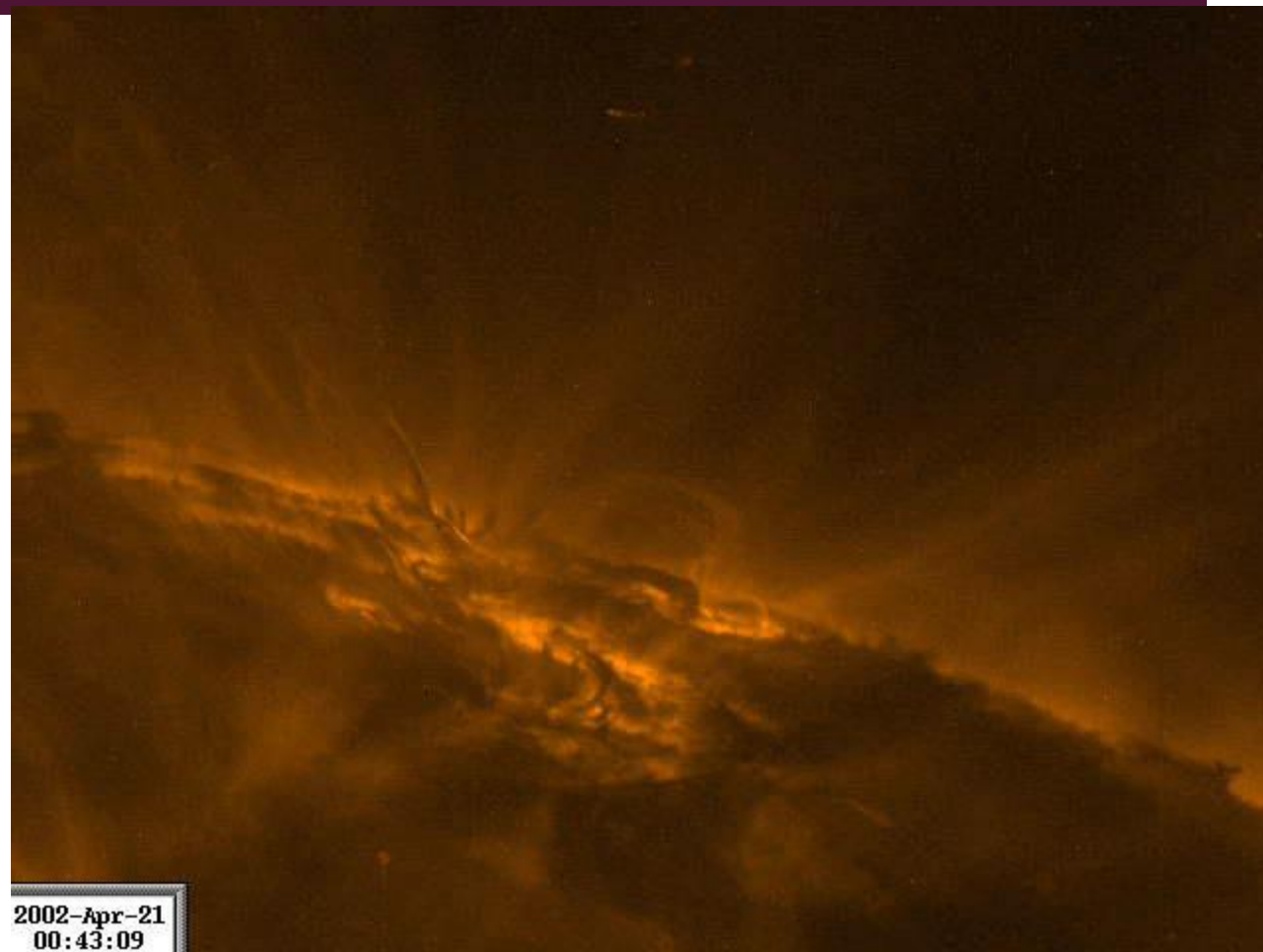
Right: a large post-flare cusp structure observed several hours after the impulsive peak of SOL1999-03-18T08:31 (M3.3) by Yohkoh/SXT and reported by Yokoyama et al. (2001). The temperature in this structure is 3–4 MK

RIBBONS AND FOOTPOINTS

- Hard X-ray източници корелират по време с $H\alpha$ kernels (Vorpahl 1972; Wülser and Marti 1989), което показва, че енергията на избухването достига до плътната част на хромосферата за по-малко от 10 s.
- Hard X-ray източници съвпадат по място с $H\alpha$ kernels



Benz (2009), Fig. 9, RHESSI & $H\alpha$



НАБЛЮДЕНИЯ: РАДИО

- от 1942
- Широкоивична радио емисия от 1 до 100-ти GHz в резултат от въртене на релативистки електрони около магнитните силови линии (gyrosynchrotron emission) и плазмена емисия от MHz (корона) до 10-30 kHz (земна орбита)

Наземни

- „Микровълни“ – cm диапазон
- cm/mm Nobeyama 17, 34 GHz ...
- dm Nancaй 150-450 MHz ...

Спътници

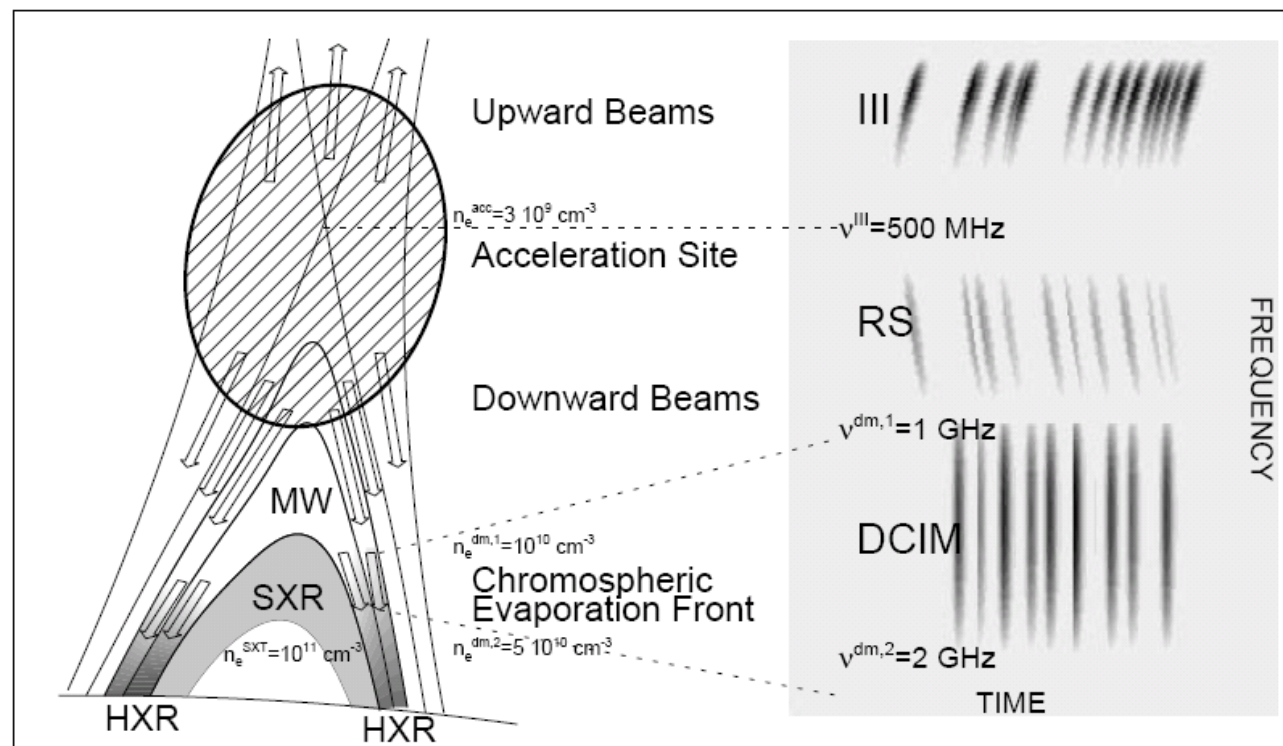
- Wind/WAVES, STEREO/WAVES – Dm-Hm-km, kHz

Типове радио избухвания

- Bursts: I, II (ударни вълни), III (електрони), IV, V

Диагностика

- Оценка за магнитно поле, място на ускорение, посока на разпространение на електроните



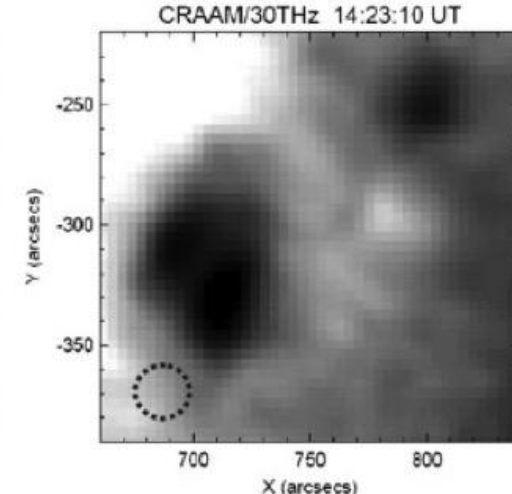
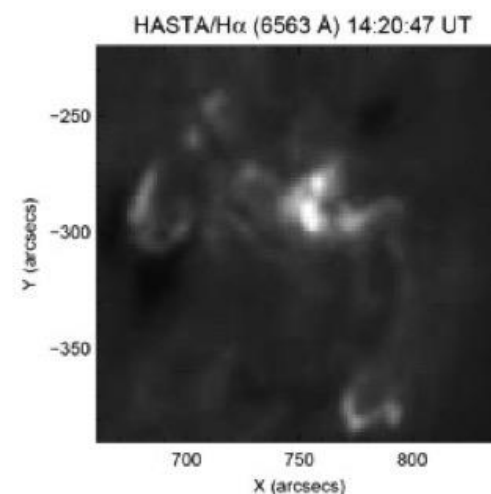
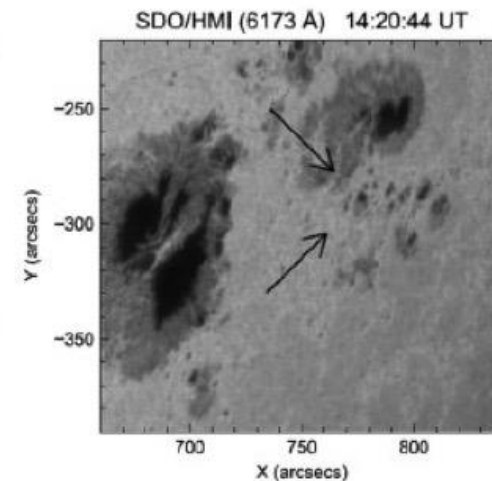
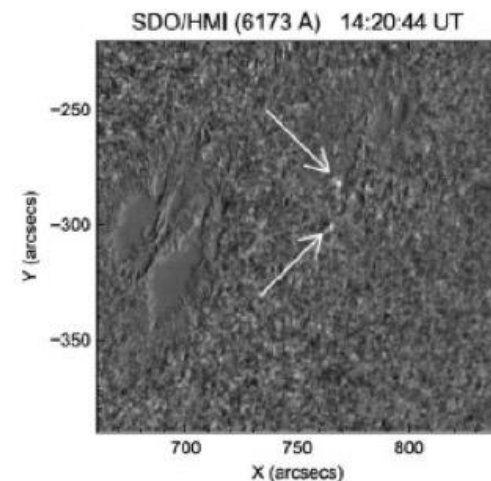
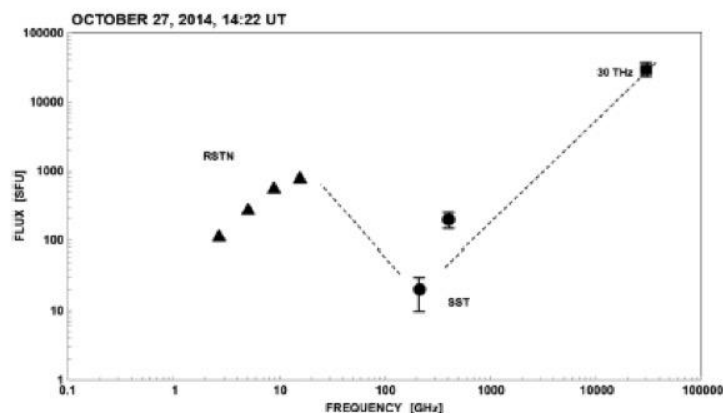
Bastian et al. (1998)

НАБЛЮДЕНИЯ: ИНФРАЧЕРВЕНА ОБЛАСТ

Малко на брой обсерватории и наблюдения в тази област

- IR: от видимата област до $10\text{ }\mu\text{m}$ – наземни наблюдения
- Mid-IR: – спътникови наблюдения
- Submm-THz: 200-400 GHz – (30) THz – наземни наблюдения

Сравнително малък брой избухвания в тези области са докладвани – предимно поради липсата на рутинни наблюдения, недостатъчната разделителна способност и ограничен динамичен диапазон на наличната апаратура.



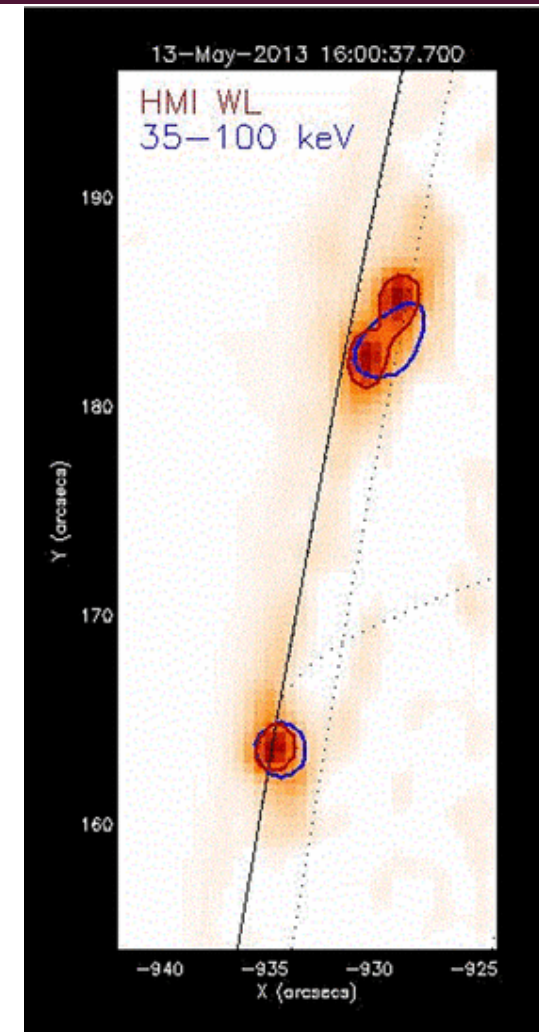
October 27, 2014

<https://www.astro.gla.ac.uk/users/eduard/cesra/?p=743>

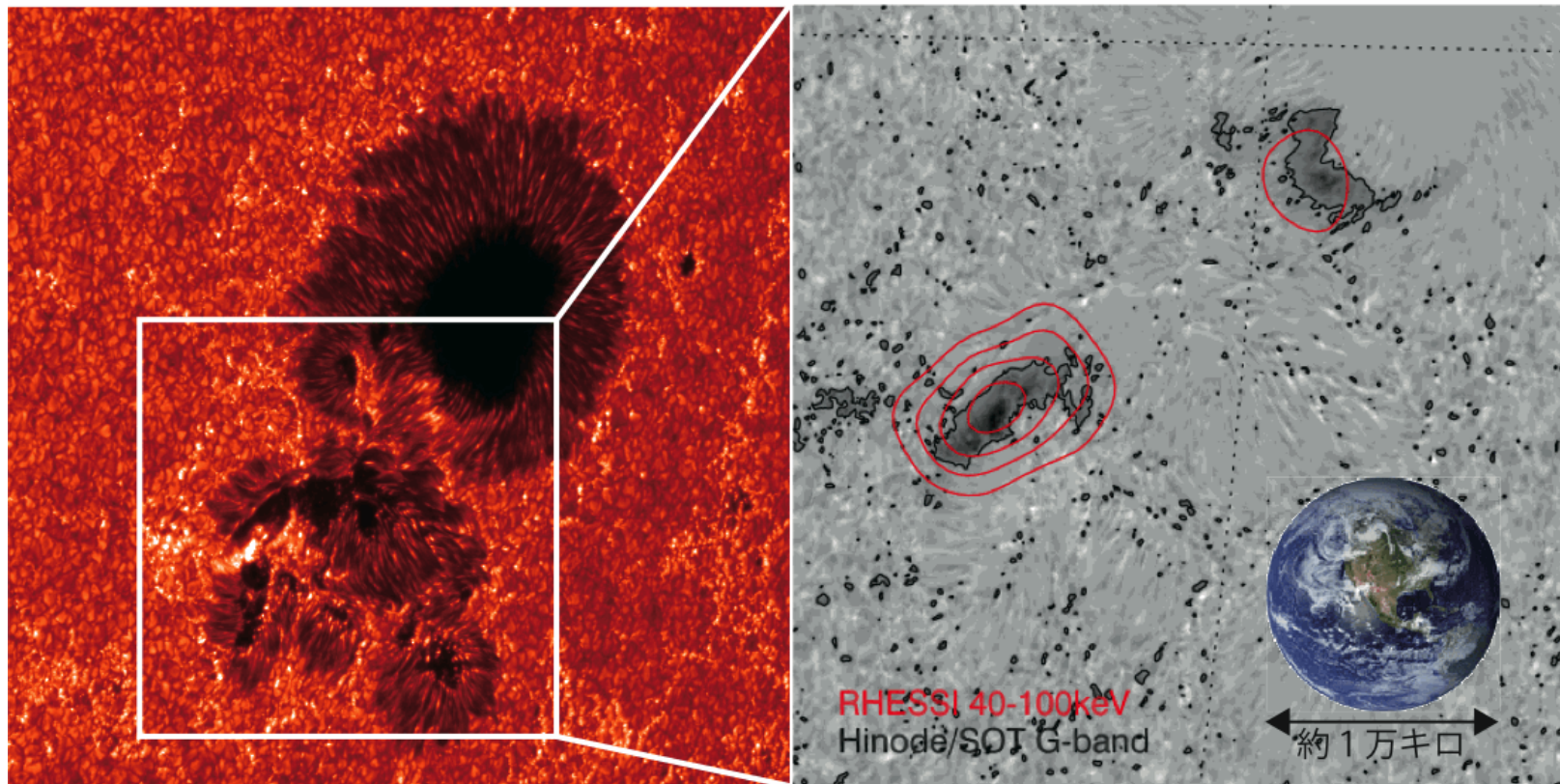
НАБЛЮДЕНИЯ: ОПТИЧЕСКИ ДИАПАЗОН – БЯЛА СВЕТЛИНА

- Относително голяма част от енергията е излъчена в бяла светлина (Emslie et al. 2012)
- Предполага се, че е резултат от ускорени електрони: енергията в бяла светлина е еквивалентна на емисията от всички налични електрони над 40 keV
- Съвпада по време с емисия в твърдия рентген
- Съвпада по място (под 1") с емисия в твърдия рентген (предполага се че е в ниската хромосфера)
- Предполага се, че липсата на много наблюдения е ниската чувствителност на настоящата апаратура

Säm Krucker, Martínez Oliveros et al. (2012)
A white-light flare near the solar limb. The RHESSI hard X-ray (30–50 keV, blue) contours are overlaid on a white-light difference (background and red) image observed by HMI/SDO. Note spatial coincidence of hard X-ray and white-light brightenings.



НАБЛЮДЕНИЯ: ОПТИЧЕСКИ ДИАПАЗОН – БЯЛА СВЕТИНА



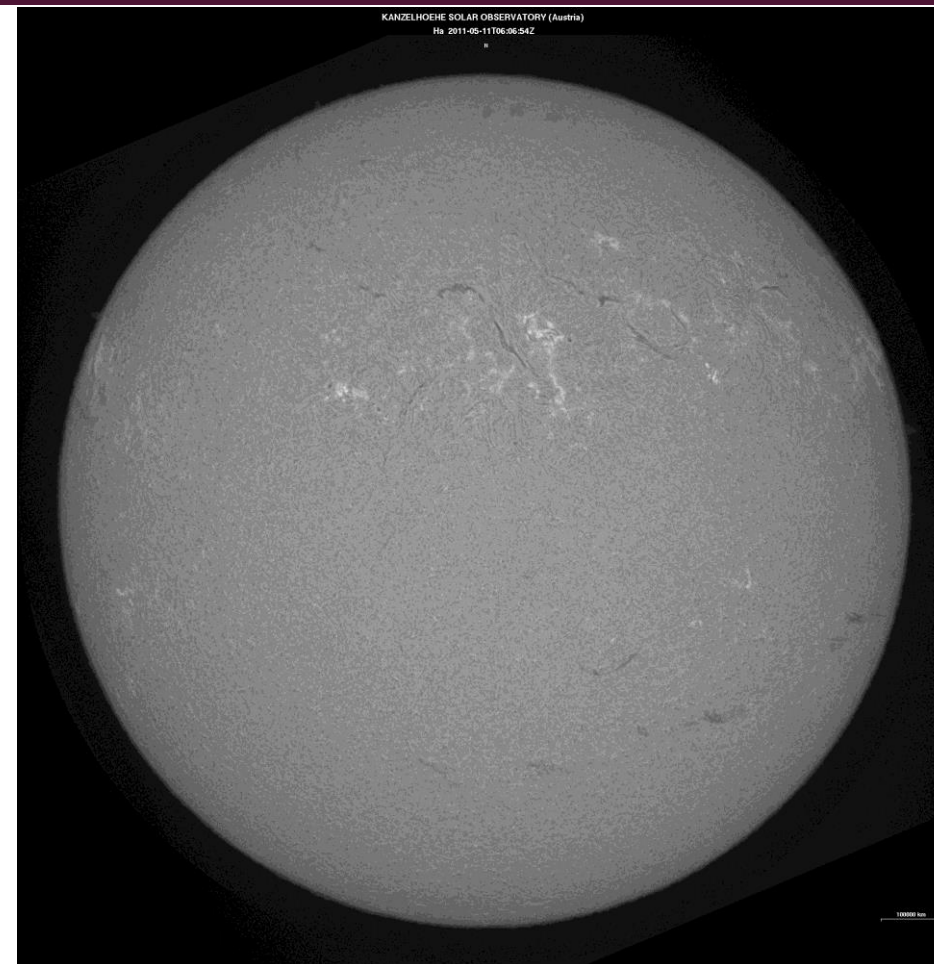
<https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/news/releases/2010/10-052.html>

НАБЛЮДЕНИЯ: H-А

- Балмерова линия на водород $3 \rightarrow 2$, $6563 \text{ \AA}$
- Традиционни рутинни наблюдения на Слънцето в тази линия – мрежа от обсерватории
- H α flare ribbons (разледени до 30,000 km), описващи основата на магнитните арки (Masuda et al. 2001)
- Наблюдения на филаменти и протуберанси

<https://www.solarmonitor.org/>

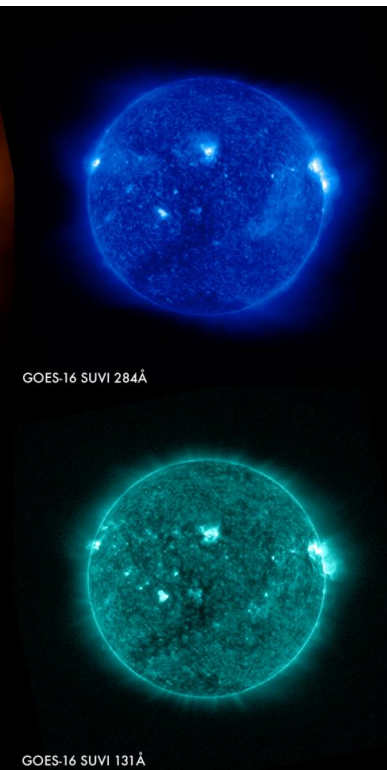
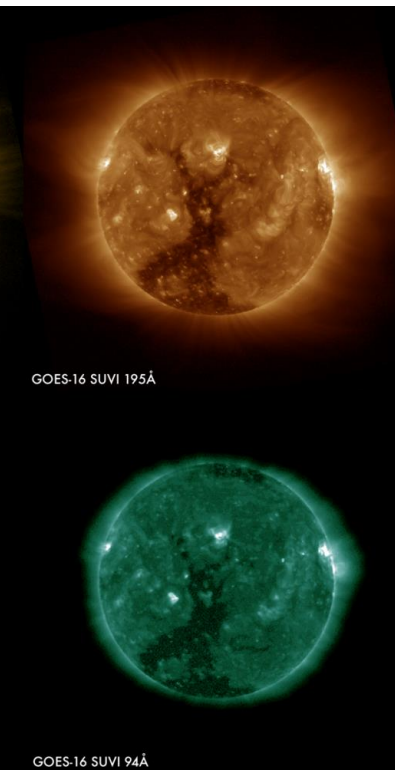
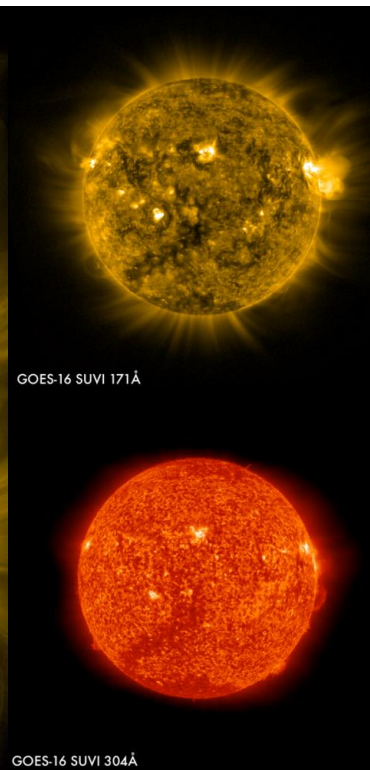
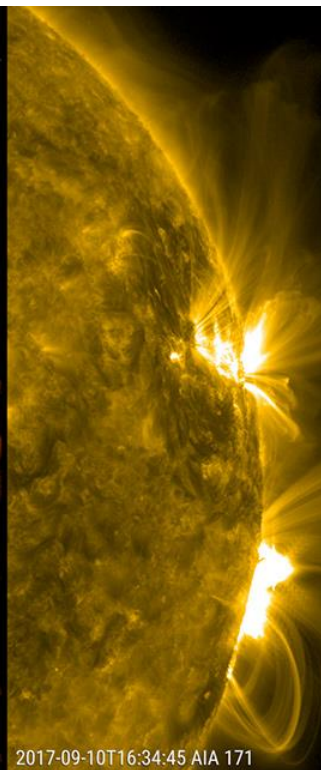
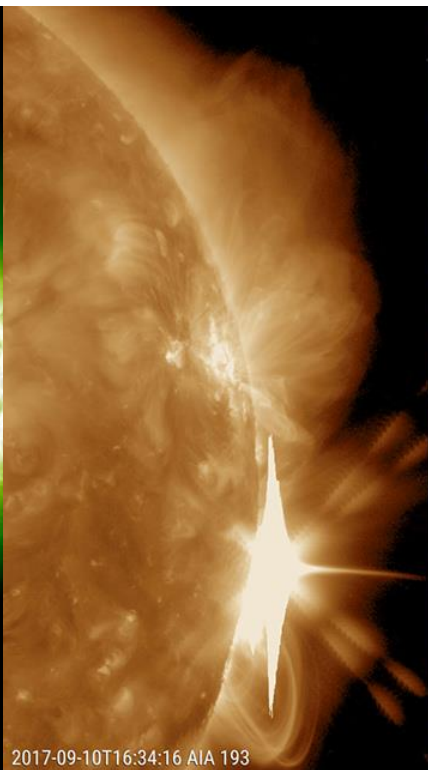
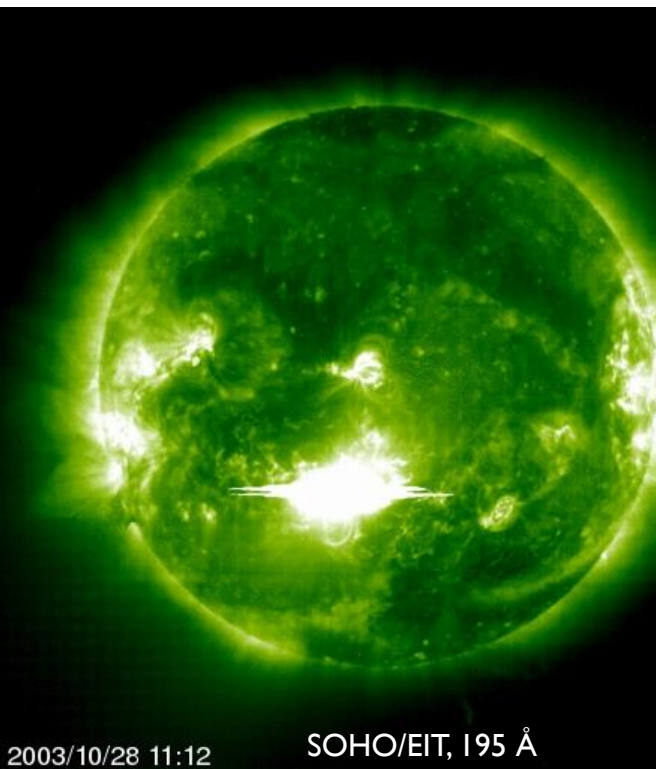
<http://cesar.kso.ac.at/>



<http://cesar.kso.ac.at/>

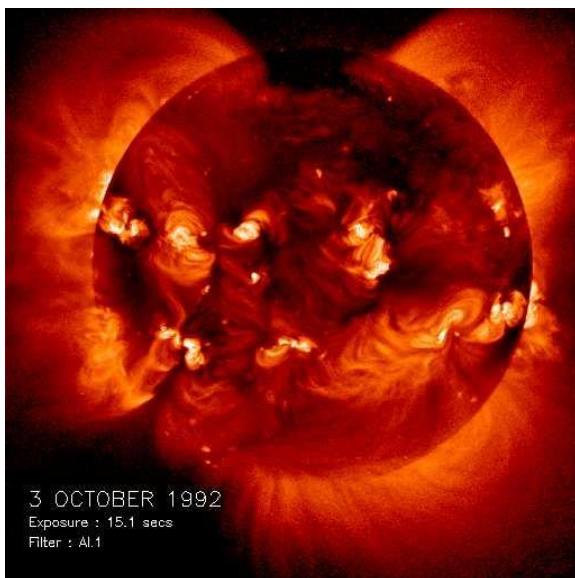
НАБЛЮДЕНИЯ: УЛЬТРАФИОЛЕТ-ДАЛЕЧЕН УЛЬТРАФИОЛЕТ

- Традиционни наблюдения в избрани линии: SOHO, TRACE, Hinode, STEREO, SDO
- Тесноивични наблюдения, напр. 171, 193/195, Å
- Широкоивични наблюдения, напр. SOHO 310-380, 520-630 Å, Hinode 170-210, 250-290 Å

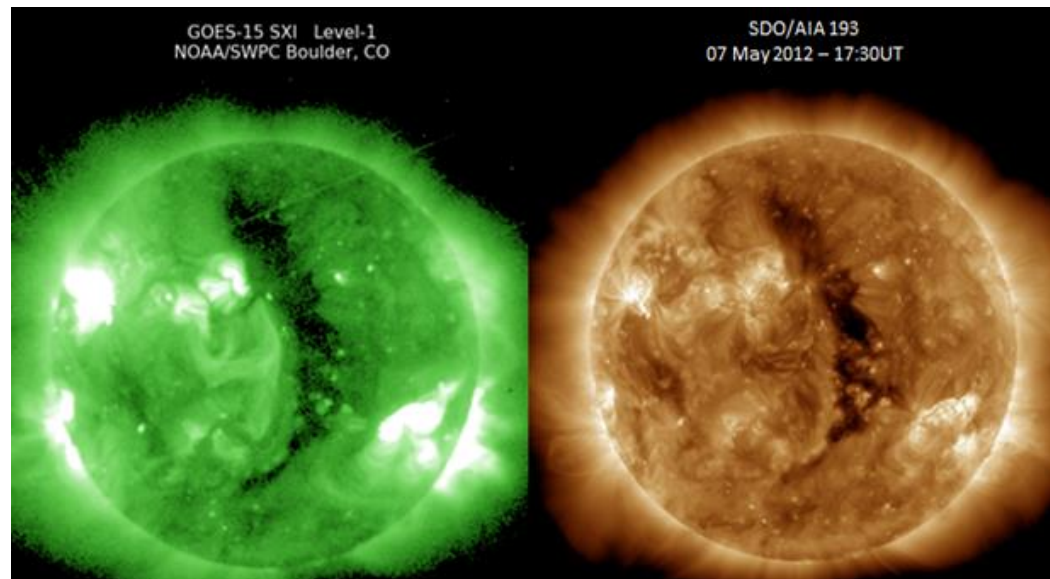


НАБЛЮДЕНИЯ: МЕК РЕНТГЕН

- thermal millimeter, EUV, and soft X-ray (10 keV) нагряване на плазмата в короналните бримки от 1.5MK до над 30 MK
- Бримките се наблюдават в thermal soft X-ray emission, което показва висока плътност 10^{11} cm^{-3} (e.g., Švestka 1976; Tsuneta et al. 1997) чрез процеса “chromospheric evaporation”, т.е. разширение на хромосферната плазма при нагряване от енергетични частици. Плазмата изпълва магнитните арки до върха на бримките, което се наблюдава и като синьо отместване в избрани спектрални линии.



Yohkoh,
SXR,
L. Harra



НАБЛЮДЕНИЯ: ТВЪРД РЕНТГЕН

- След 1958 датират първите наблюдения в HXR $> \sim 10$ keV
- Hard X-rays от т.нар. спирано лъчение (bremsstrahlung) на електрони в мишена – при кулонови удари с йони без да бъдат захванати (free-free radiation of thermal electrons). Промяната в посоката и импулса на електрони с keV енергии води до емисия на рентгенови фотони.
- Разпределението на фотоните има форма близка до степенна функция (power-law).
- Емисия на рентгенови лъчи с нетоплинно разпределение по енергия се наблюдава при източниците в основата на магнитните арки Hoynig et al. (1981). Според Kane (1983) 95% от 150 keV X-ray emission произхожда от височини 2500 km, което е нивото на хромосфера, подобно на collisional thick target model на Brown et al. (1983), където електрони ускорени по време на избухването следват магнитните линии и отдават цялата си енергия в хромосферата.
- flare particle number problem: броят на електроните изведени от рентгеновата емисия е много голям, а областта на коронално ускорение трябва постоянно да се запълва с нови частици, за да не се достигне ниво на вакуум

НАБЛЮДЕНИЯ: ГАММА

- През 1972 γ -ray line emission (0.8-20 MeV) от тежки йони – породени от MeV протони – се наблюдава за първи път (Chupp et al. 1973)
- 2.223 MeV neutron-capture line: възниква когато протони и тежки ядра ускорени от около 10 до > 100 MeV се ударят с ядрата на хромосферната плазма и се създават неутрони, те достигат топлинни скорости и се захващат от фонов протон, създавайки деутерий
- Изображения на 2.223 MeV line показват мястото на депозит на йони
- Представяват компактни източници, понякога двойни
- Не съвпадат по място с източниците на твърд рентген (депозит на електрони) – възможно обяснение е разлика в механизмите на ускорение на йони и електрони или различни магнитни структури, около които се движат двата вида частици

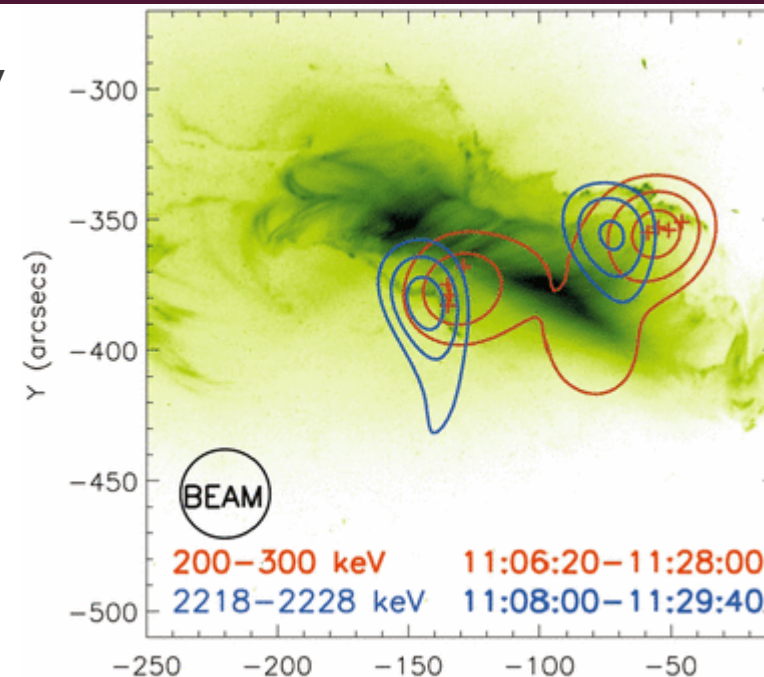
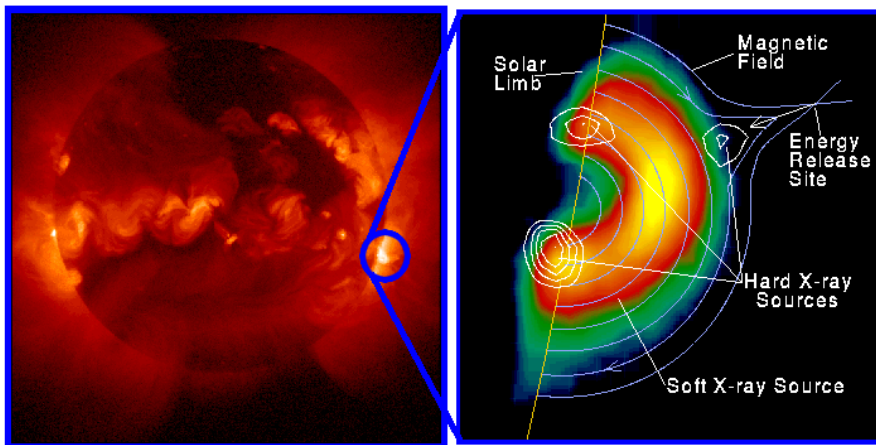


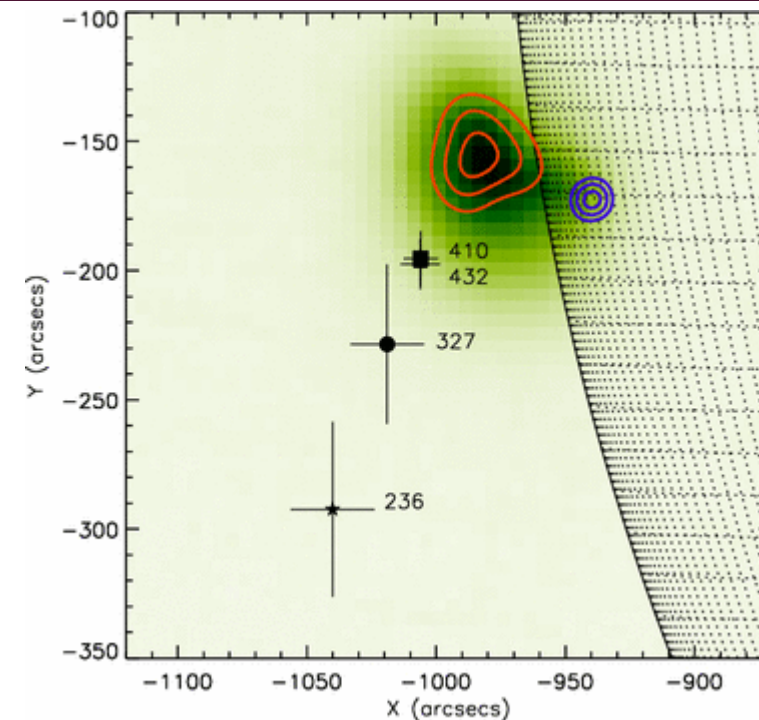
Image: Hurford et al. (2006)
SOL2003-10-23, RHESSI overlaid on the negative of a TRACE 195 Å image dominated by the emission of Fe xii.
The contours at 50, 70, and 90% of the peak value show in blue the deuterium recombination line at 2.223 MeV and red the electron bremsstrahlung at 200–300 keV. The centroid positions are indicated by plus signs. The FWHM angular resolution is 35"×35", given at bottom left.

КОРОНАЛНИ ИЗТОЧНИЦИ

- Къде се освобождава енергията при слънчевото избухване?
- Първите предположения идват от трети източник на твърдо рентгеново лъчение над магнитните арки (Masuda et al. 1994).
- Рентгеновото лъчение се състои от топлинна част, доминирано от ниски енергии и нетоплинна част над 8–10 keV. Топлинният спектър на короналния източник е обикновено стръмен (soft, Mariska and McTiernan 1999; Petrosian et al. 2002), съвпада с идеята за thin target (Datlowe and Lin 1973). А именно, ускорените електрони губят само малка част от тяхната енергия и продължават да се разпространяват към плътната хромосфера. Там те срещат плътна мишена (thick target), което води до по-плавен (harder) спектър (Brown 1971; Hudson 1972).



Yohkoh X-ray Image of a Solar Flare, Combined Image in Soft X-rays (left) and Soft X-rays with Hard X-ray Contours (right). Jan 13, 1992.

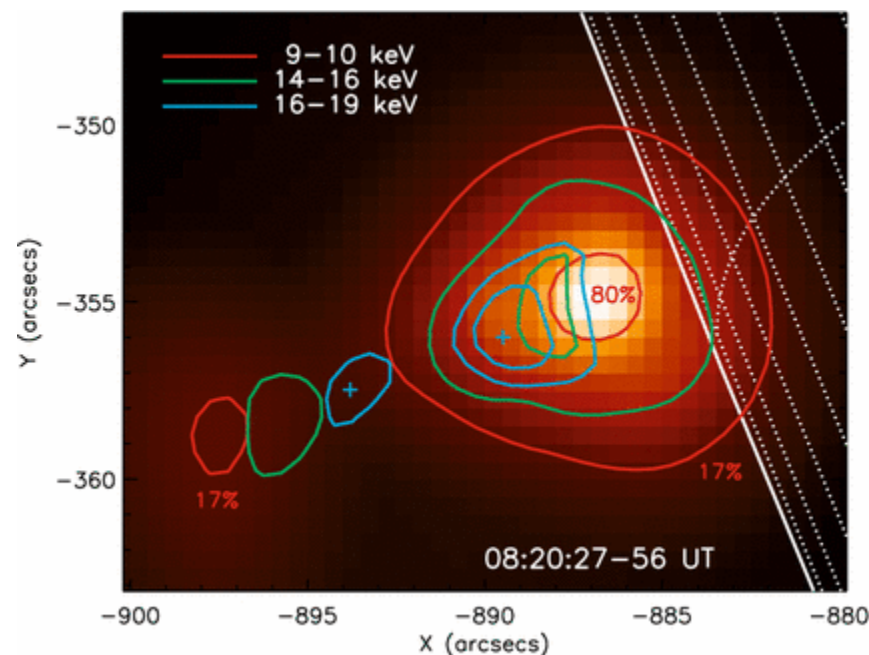


Benz et al. (2011)

The flare SOL2006-12-05 occurred at the solar limb. The averaged centroid positions of radio emission observed by the Nançay Radioheliograph and indicated in MHz are shown on a GOES/SXI image. The contours show RHESSI observations at 18–25 keV (red, coronal source, mostly thermal), and 25–50 keV (blue, non-thermal, footpoint source).

КОРОНАЛНИ ИЗТОЧНИЦИ

- В особени случаи, само най-бързите електрони достигат до хромосферата (Veronig and Brown 2004). Короналните източници често се наблюдават преди основното увеличение на твърдия рентген, но корелират по време и спектър с източниците в основата на бримките (Emslie et al. 2003), което показва тясната връзка между корона и хромосфера по време на избухванията.
- Височината на короналния източник е 6000–25000 km (Aschwanden et al. 1995) с оценки от радио наблюдения до 90000 km.
- Ниско енергетичните фотони се наблюдават по-късно (в сравнение с високо енергетичните) и се предполага, че се движат по-продължително време.



Liu et al. (2008)

RHESSI observations of the flare SOL2002-04-30 with soft X-ray emissions that extend beyond the loop top. The footpoints are occulted by the solar limb. In the lowest energy band (9–10 keV, red) two contours are shown representing 17 and 80% of the maximum brightness.

ВРЪЗКА С ДРУГИ СЪБИТИЯ

- Коронално изхвърляне на маса (КИМ)

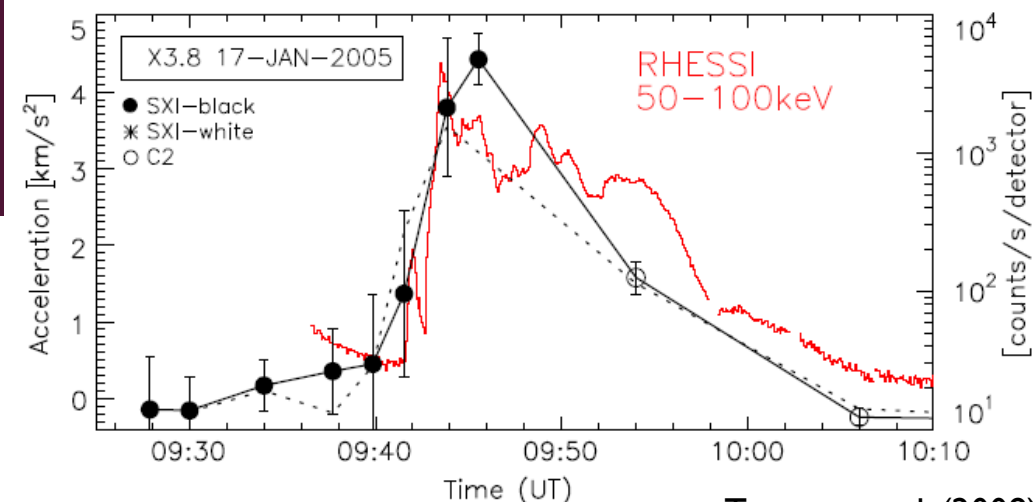
синхронизация между ускорението на КИМ и потока в твърд рентген на избухването, въпреки че има и самостоятелни събития

- Ударни вълни, Coronal dimmings, Moreton waves ($H\alpha$), EIT waves

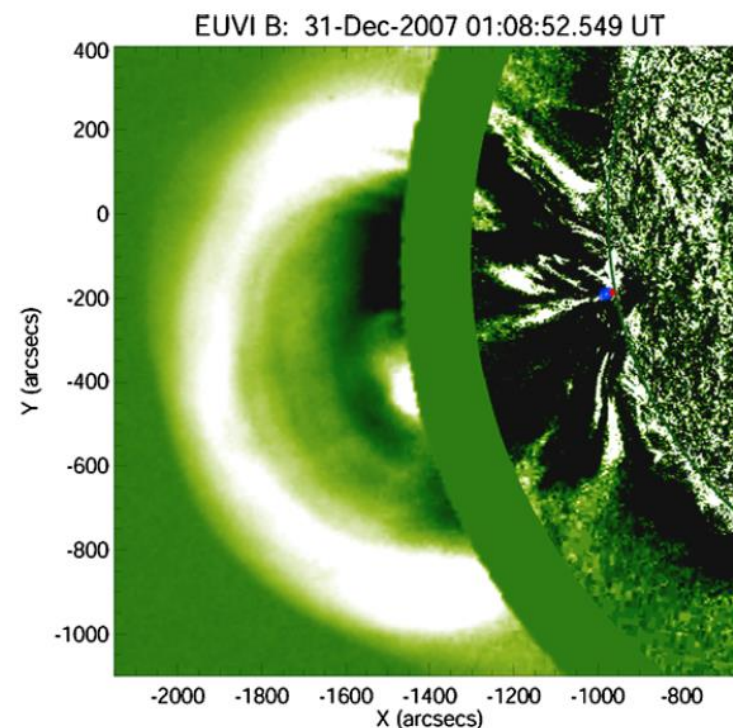
ударни вълни – по наблюдения на т.нар. радио избухвания от тип II – коронални и междупланетни

- Енергетични частици

силна статистическа връзка с т.нар. радио избухвания от тип III – сноп от електрони



Temmer et al. (2008)



S. Krucker;
Fletcher et al. (2011),
Fig. 31

ЕНЕРГИЕН БЮДЖЕТ (ПРИБЛИЖЕНИЕ)

- Пълната излъчена енергия е сума поне от твърд рентген, ултравиолет и оптически емисии.
- Нетоплинната енергия зависи от формата на електронното разпределение и евентуална промяна в наклона (около 10-20 keV), затова оценката е винаги долна граница.
- Оценки за бюджета са направени само за ограничен брой събития.

Table 3 Flare and CME energy budgets^a

	21 April 2002	23 July 2002
<i>Primary energy</i>		
Magnetic	32.3 ± 0.3	32.3 ± 0.3
<i>Flare</i>		
<i>Intermediate energies</i>		
Electrons ($> E_{\min}$)	31.3 ± 0.5	31.3 ± 0.5
Ions ($> 1 \text{ MeV nucleon}^{-1}$)	< 31.6	31.9 ± 0.5
Thermal plasma ($T > 5 \text{ MK}$)	$31.1^{+0.4}_{-1.0}$	$30.4^{+0.4}_{-1.0}$
<i>Radiant energy</i>		
From <i>GOES</i> plasma	31.3 ± 0.3	31.0 ± 0.3
Assuming $L_{\text{total}}/L_X = 100$	32.2 ± 0.3	32.2 ± 0.3
<i>CME</i>		
Kinetic	32.3 ± 0.3	32.3 ± 0.3
Gravitational potential	30.7 ± 0.3	31.1 ± 0.3
<i>Energetic particles at 1 AU</i>	31.5 ± 0.6	< 30

^aTabulated values are $\log_{10}$ of the energies in erg of the different components given in Table 1 of Emslie et al. (2005)