Наблюдения и моделиране на коронални ударни вълни и високоенергийни слънчеви частици

Камен Козарев

Харвард-Смитсониански център по астрофизика, Кеймбридж, Масачузетс (САЩ)







Коронално изхвърляне на маса в бяла светлина

 STEREO B
 Земя
 STEREO A

Наблюдения на 2010/04/03

Коронални изхвърляния на маса (СМЕ):

- Най-голямите експлозивни отделяния на маса и енергия в слънчевата система
- Резултат на реорганизацията на магнитните полета на слънчевата повърхност (короната)
- СМЕ-та смущават междупланетното пространство
- Често предизвикват силни ударни вълни
- Ударните вълни се смятат за отговорни за ускоряването на слънчеви високоенергийни частици (Solar Energetic Particles – SEP)

Защо короналните вълни са интересни?

- Свързвани са с големи потоци високоенергийни заредени частици край Земята.
- Solar Energetic Particles (SEP), или Слънчеви високоененергийни частици като протони, електрони, и йони с енергия над 1 MeV (1000 пъти по-висока от тази на слънчевия вятър)
- SEP могат да се образуват при

 Избухвания в бяла светлина (flares)
 Ударни вълни свързани с Коронални изхвърляния на маса (CME)
- Около 1% от СМЕ-та предизвикват опасни SEP-потоци
- Възможността за по-ранно предсказване на SEP-потоци може да помогне за предпазване на астронавти и сателитна електроника



Предсказване на космическото врем

Solar Energetic Particles (SEP):

- Разпространяват се по междупланетни магнитни линии
- Могат да въздействат на планетарните системи
- Могат да причинят сериозни вреди на сателитната електроника
- Могат да предизвикат лъчева болест или рак при астронавти



Какво знаем дотук?



Въпроси

- Могат ли ударни вълни да се образуват ниско в короната (под 4-5 R_s)?
- Какви наблюдения са нужни, за да опишем и изучаваме коронални ударни вълни и потоците енергийни частици с отдалечени наблюдения?
- Могат ли СМЕ-та и ударни вълни в ниската и средна корона (1.3-8 R_s) да създадат SEP потоците, които наблюдаваме в близост до Земята?

Коронални вълни



•Extreme Ultraviolet (EUV), или ултравиолетови вълни – открити през 1997 в телескопски наблюдения от сателита SoHO (снимки през 12 минути)

•Скорости от 100 до >1000 км/с

•Силна времева корелация с избухвания и СМЕ-та

Коронални ултравиолетови вълни

Какво са те?

 "Звукови" вълни в короната, при които се образува рязка граница в параметрите на плазмата (плътност, скорост, магнитно поле, температура)

Какво ги предизвиква?

 Коронални изхвърляния на маса и/или слънчеви избухвания

Защо са интересни?

 Предполага се, че рязката смяна на плазмените параметри предизвиква ускорението на йони и електрони до много високи енергии

Как наблюдаваме коронални вълни?

Atmospheric Imaging Assembly (AIA)



Solar Dynamics Observatory

• Постоянно наблюдение на Слънцето

• Снимки в 6 EUV канала на всеки 12 секунди

DO/AIA- 171 20110402_184313

image: http://sdowww.lmsal.com/suntoday/

Параметри на Atmospheric Imaging Assembly (AIA)

 Прави изображения в 10 UV канала, 6 от които са EUV (почти в рентгеновата част на спектъра)

Канал (Å)	Йон	Район
94	Fe XVII	Flares
131	Fe VIII, XX, XXIII	Flares
171	Fe IX	Corona, Transition
193	Fe XII, XXIV	Corona
211	Fe XIV	Active Region Corona
304	Не п	Chromosphere, Transition
335	Fe XVI	Active Region Corona



- По едно изображение всеки 12 сек!
- Предишните EUV телескопи снимат на 5 минути.

Идентифициране на ударните вълни (I)

- Наблюдения над лимба са предпочитани.
- Това ни позволява да видим повече от структурата на вълните.



Слънчевият лимб



Идентифициране на ударните вълни (II)

- Вълните на западния лимб са по-желани, понеже SEP-потоците • оттам са по-добре магнитно свързани със Земята
- Това ни помага при корелацията на слънчевите избухвания с SEP-потоци на Земята.



- Има и наблюдения извън земна орбита (STEREO). Това ни позволява да ползваме и телескопични наблюдения над източния лимб

Идентифициране на ударните вълни (III)

• Наблюдават се и странични, и радиални движения при вълните.



Кандидат-вълни

- Прегледахме 31 месеца данни (януари 2011 юли 2013).
- Открихме 49 кандидат-вълни.
- От тях, избрахме 15 вълни над лимба.



Радио избухвания от тип II

- 8 вълни на Западния лимб. 8 вълни през 2011.
- 7 вълни на <mark>източния</mark> лимб.

- 8) 01/25/11 **E**
- 9) 01/28/11 W
- 10) 02/11/11
- 11) 10/20/11 W
- 12) 05/26/12 W
- 13) 10/07/12
- 14) 04/23/13 W
- 15) 05/01/13
- 5 вълни през 2012.
- 2 вълни през 2013

Кинематика на вълните (I)



23^{ти} април, 2013



- Искаме да определим скоростта и ускорението на вълната
- За да проследим вълната, завъртаме изображението

Кинематика на вълните (II)



Кинематика на вълните (III)



11™ май, 2011

Initial Velocity: $272.33 \text{ km/s} \pm 29.85 \text{ km/s}$ Final Velocity: 437.26 km/sAcceleration: $0.343 \text{ km/s}^2 \pm 0.070 \text{ km/s}^2$

Резултатите досега

Радиални скорости и ускорения за 5 вълни

	Дата	Крайна скорост (км/с)	Ускорение (м/с²)
1)	04/23/13 W	445.74	342.85
2)	05/26/12 W	697.69	5885.55
3)	11/09/11 🗧	599.55	606.17
4)	05/11/11 W	437.26	343.61
5)	08/04/11 W	1480.70	6560.07

Проблеми

- 1 Нисък контраст на изображенията.
- 2 Не всички вълни имат радиален компонент на скоростта.

Радио наблюдения - избухвания от тип II



- Слънчеви радио избухвания в 10-1000 MHz
- Корелират силно с короналните изхвърляния на маса
- Смятат се за индикация на присъствие на коронални ударни вълни – предизвикани от ускорени електрони

Радио избухвания от тип II

- Излъчването става на плазмената честота w_р
- Плазмената честота w_p определя електронната плътност: $w_p \propto \sqrt{n_e}$
- Можем да свържем двете наблюдения чрез подходящ модел на плътността



Радио и EUV наблюдения

Времева серия на EUVвълната

Времева серия на _____ радио-наблюденията Wave Tracker for e37 at 193: Rotated 0.00000 degrees











Достъпна технология за слънчеви радио телескопи Разширяваща се мрежа от станции Повече информация тук: www.ecallisto.org

Ударната вълна на 13ти Юни 2010



• За около 5 минути вълната минава разстоянието между 1.3 и 1.6 Rs



МНz • Радио избухване от тип II

• Излъчването е пред и зад ударната вълна.

• Вълната се отдалечава от слънцето, където плътността е пониска, съответно честотата намалява.



- Скорости на короналната вълна от 650-700 км/с

-Отстоянията на EUVвълновия фронт следват радио излъчването

-EUV-фронтът съвпада с радиоизлючването

Как да определим дали вълната е ударна?

• Един начин е да използваме Диференциалната мярка на излъчването (Differential Emission Measure - DEM, Q(T)) – количество излъчващ материал в обем dV и температурен интервал dT

•DEM е пропорционално на квадратът на плътността

$$n_e^2 dV = Q(T)dT$$

•Можем да изчислим DEM от 6те EUV канала на AIA (Weber et al., 2004)
•Избрахме 4 района, изчислихме DEM за две времена (t₁, t₂) – преди и по време на вълната

 Пресмятаме съотношението на плътностите като разделим интегралите на DEM по температурата за двете времена

• Така не е нужно да знаем обемът в който е излъчването

$$\frac{n_{e2}}{n_{e1}} \sim \frac{\sqrt{EM_2}}{\sqrt{EM_1}} \sim \frac{\sqrt{\int Q_2(T) \mathrm{d}T}}{\sqrt{\int Q_1(T) \mathrm{d}T}}$$

 Смислени резултати от R2 и R3

• Съотношението на плътностите е $r=n_{t2}/n_{t1}$

•For R2, r~1.18

•For R3, r~1.12

• Малко по-ниско от изчисленото чрез радио наблюдения – r~1.56 (Ma et al., 2011)

 Скокът в плътностите е индикативен за слаба ударна вълна!



Моделиране на максималната енергия на протоните



Реалистична MHD симулация на изригване



Коронална плътност по време на изхвърлянето на маса



• Х-Z и Х-Y разрези на короналната плътност за последните 20 мин на симулацията

- Виждат се различни структури на плазмата в изригването
- СМЕ-то се разпространява в стриймър

Числен модел за ускорението на протоните Energetic Particles Radiation Environment Module - EPREM







X [R_s]

 Избрахме две магнитни силови линии: една с наймного ускорение на частиците (1), и друга с наймалко (2)

 Линия 1 е в район където СМЕ-то се разширява и отдалечава с голяма скорост, и има голяма промяна в плътностите при ударната вълна

• Линия 2 е в много поспокоен район

Протонни потоци при 8 R_s



Резултати и предстояща работа

- Анализирахме EUV наблюдения на едромащабни вълни в короната
- Открихме съответствие между наблюденията и ударни вълни
- Ударните вълни могат да ускорят протони над 1000 пъти, до ~20 MeV

• Така, отдалечените наблюдения могат да се ползват за характеризиране и предвиждане на потоците енергийни частици

• Предстои пълен анализ на 15те коронални вълни

• Проведохме 3D числени глобални симулации на коронално ускорение на частици

• Бързите СМЕ и силна ударна вълна могат да ускорят протони до над 100 MeV под 8 R_s

 Ускорението на протони (и други йони) в ударни вълни в короната има голяма (може би доминантна) роля при образуването на потоците слънчеви високо енергийни частици.

 Отдалечените наблюдения в EUV и радио с голяма разделителна способност, комбинирани с моделиране, показват голям потенциал за предвиждане на SEP-потоците при слънчеви изригвания