

# **Detecció de partícules energètiques associades a l'activitat solar**

Ruiz Dern, Laura  
Peña Pérez, Dídac  
Subirà Vallés, Montserrat  
Blanco Cuaresma, Sergi

## Índex

1	Objectiu .....	3
2	Obtenció de dades.....	3
3	Resultats gràfics.....	3
4	Anàlisi de dades.....	5
4.1	Condicions del medi interplanetari .....	5
4.2	Intensitat màxima .....	5
4.3	Temps de trànsit .....	6
4.4	Temps d'injecció.....	6
5	Discussió de resultats.....	7
5.1	Fulguracions en $H\alpha$ .....	7
5.2	Emissions de ràdio .....	8
5.3	Característiques de la CME (Coronal Mass Ejection) .....	9
5.4	Emissions de Soft-X Ray .....	9
6	Conclusions .....	10
7	Referències .....	10

# 1 Objectiu

Aprendre mètodes bàsics d'anàlisi de dades que s'utilitzen per determinar l'origen solar d'esdeveniments de partícules energètiques solars que s'observen en el medi interplanetari, a partir del següent cas:

*El dia 20 d'octubre de 2002 (DOY (Day Of the Year) 293), entre les 13:51 UT i les 14:30 UT, s'observaren tres fulguracions en raigs X prop de tres regions actives solars. Quasi simultàniament, s'observà el llançament d'una ejecció de massa coronal a l'hemisferi oest del Sol. Uns minuts més tard, la sonda ACE enregistrà un esdeveniment d'electrons prop de l'òrbita de la Terra (1 UA).*

## 2 Obtenció de dades

Amb l'ajut de la pàgina web *ACE Science Center* s'han descarregat les dades corresponents al vent solar i al camp magnètic del dia indicat (DOY 293), amb una resolució de 64s. Per altra banda, s'han descarregat també les dades (facilitades pel Departament d'Astronomia i Meteorologia de la Facultat de Física de la Universitat de Barcelona) de les intensitats dels electrons per al telescopi DE30 en tres canals d'energia: DE2, DE3 i DE4, amb una resolució de 72s.

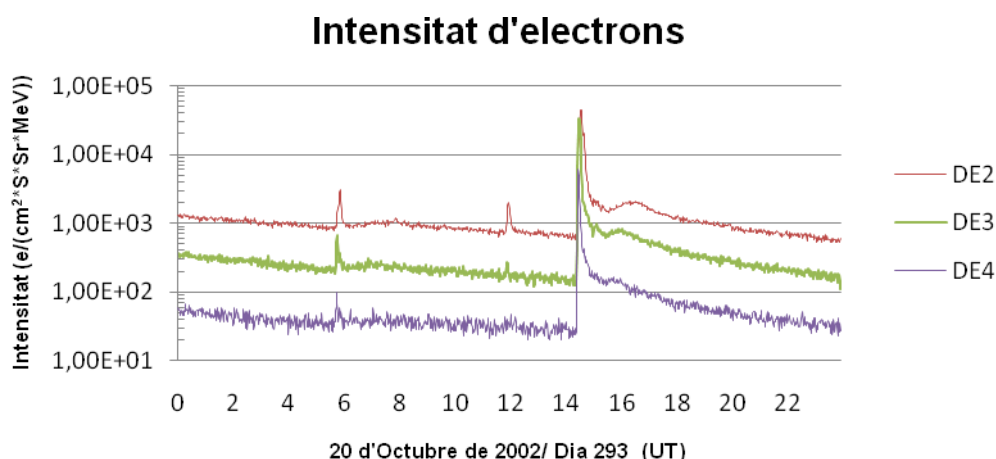
Donat que el camp magnètic interplanetari ve donat en el sistema de coordenades GSE (*Geocentric Solar Ecliptic*), s'aplica el següent canvi per a obtenir les components en esfèriques (mòdul  $B_r$ ,

longitud  $B_\phi$  i latitud  $B_\theta$ ):

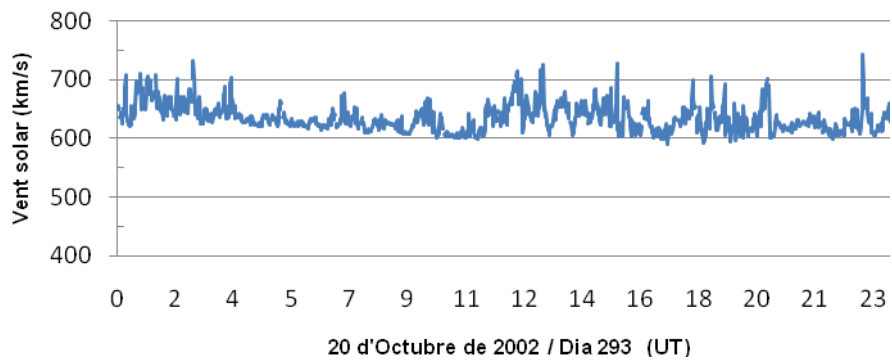
$$B_r = \sqrt{(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)}$$
$$B_\phi = \arctan(B_y/B_x)$$
$$B_\theta = 90 - \arccos \frac{B_z}{\sqrt{(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)}}$$

## 3 Resultats gràfics

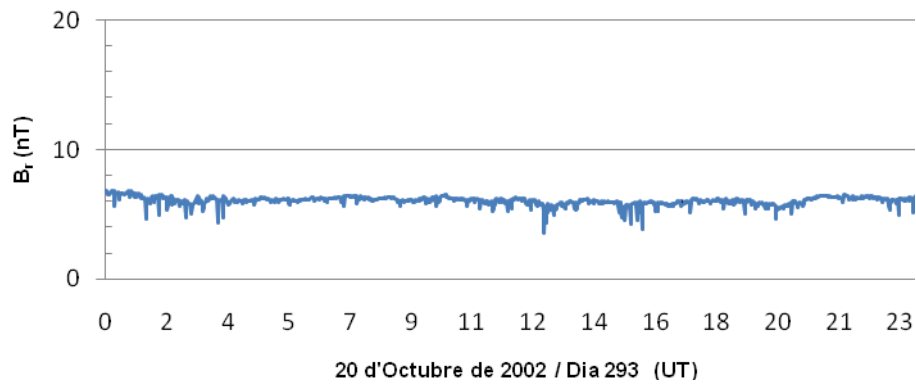
Els següents gràfics mostren les representació de les dades anteriors (intensitat d'electrons, components del camp magnètic i vent solar) respecte el temps (transcurs del dia 20 d'octubre de 2002):



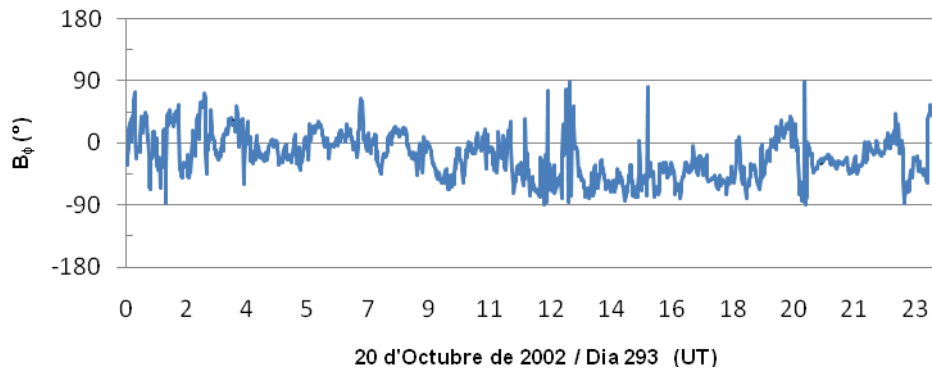
## Vent solar



## $B_r$ (Mòdul)

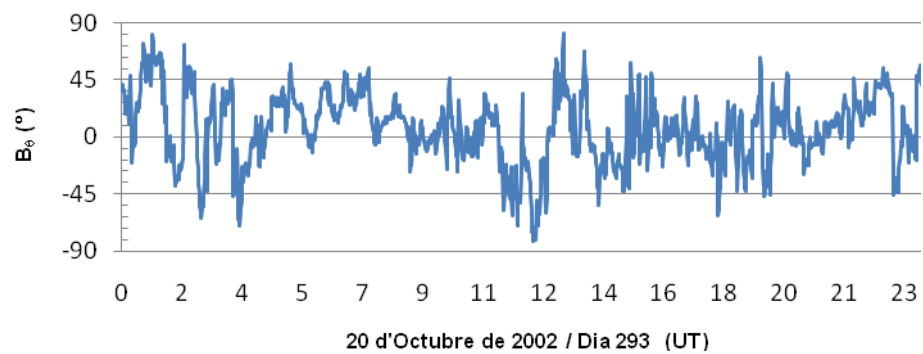


## $B_\phi$ (Longitud)



S'ha considerat una variació d'angles de  $-180^\circ$  a  $180^\circ$

## $B_\theta$ (Latitud)



## 4 Anàlisi de dades

### 4.1 Condicions del medi interplanetari

A partir de les dades descarregades i obtingudes en els apartats anteriors, es realitza la mitjana de cadascun dels paràmetres analitzats. Així es poden observar quines eren les condicions del medi interplanetari en un interval d'aproximadament una hora, abans i durant l'esdeveniment.

	Abans de l'esdeveniment (12:45 – 13:45)	Durant l'esdeveniment (13:45 – 14:45)
Vent (km/s)	648 ± 4	647 ± 2
Mòdul camp magnetic (nT)	5.63 ± 0.06	5.96 ± 0.05
Longitud camp magnetic (°)	-29 ± 6	-58 ± 2
Latitud camp magnètic (°)	16 ± 4	-2 ± 4
Intensitat electrons DE2 (keV)	711 ± 7	797 ± 101
Intensitat electrons DE3 (keV)	160 ± 3	334 ± 144
Intensitat electrons DE4 (keV)	28.5 ± 0.8	159 ± 100

Les variacions indicades s'han obtingut fent la desviació estàndard de la mitjana segons la següent expressió:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Es pot observar que el mòdul del camp magnètic no presenta variacions significatives, mentre que la seva longitud i latitud sí que pateixen canvis importants entre els moments previs i posteriors a l'esdeveniment.

### 4.2 Intensitat màxima

La intensitat màxima observada en cada canal d'energia es:

	DE2	DE3	DE4
Mínim (keV)	53	103	175
Màxim (keV)	103	175	315
Temps Int. Max (DOY)	0.60626	0.60376	0.60291
Temps Int. Max (UT)	14.55024	14.49024	14.46984

D'on es pot observar un efecte en la dispersió en velocitat, ja que les partícules més energètiques son les que arriben abans.

### 4.3 Temps de trànsit

A l'hora de fer el càlcul del temps de trànsit dels electrons per a cada canal de detecció s'han tingut en compte els següents factors:

- Propagació lliure dels electrons entre el Sol i la Terra.
- L'energia mitjana de cada canal ve donada per la mitjana geomètrica dels extrems del canal:

$$\langle E \rangle_{DE2} = \sqrt{53 \cdot 103} = 73,8850458 \text{ keV}$$

$$\langle E \rangle_{DE3} = \sqrt{103 \cdot 175} = 134,257216 \text{ keV}$$

$$\langle E \rangle_{DE4} = \sqrt{175 \cdot 315} = 234,787138 \text{ keV}$$

- La longitud de la línia de camp magnètic interplanetari és 1,2 UA, o el que és el mateix:  $1,8 \cdot 10^{11} \text{ m}$ .
- La velocitat dels electrons ve expressada com  $\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \left(\frac{m}{E+m}\right)^2}$ , on c és la velocitat de la llum,  $m = 510 \text{ KeV}$  i E l'energia mitjana de cada canal.
- Incertesa del 10% en la línia de camp magnètic. Per tant, es considera una longitud de línia de camp magnètic de  $x = (1,80 \pm 0,18) \cdot 10^{11} \text{ m}$ .

Per tant, s'obté que:

$$v_{DE2} = 146.068.987 \text{ m/s} \quad v_{DE3} = 183.308.279 \text{ m/s} \quad v_{DE4} = 218.630.761 \text{ m/s}$$

Ara, tenint en compte que  $t = \frac{x}{v}$  s'obté el temps de trànsit per a cada canal:

$$t_{DE2} = (1232 \pm 123) \text{ s} \quad t_{DE3} = (982 \pm 98) \text{ s} \quad t_{DE4} = (823 \pm 82) \text{ s}$$

### 4.4 Temps d'injecció

Per calcular el temps d'injecció al Sol cal restar el temps de trànsit al temps en què es va fer la detecció dels màxims en cadascun dels canals. Així, tenint en compte que:

- 1- Moment de detecció del màxim d'intensitat d'electrons en DE2: 0,60626 DOY 293, és a dir, les 14h, 33min i 0,9s del 20 d'octubre de 2002 (52381 s)
- 2- Moment de detecció del màxim d'intensitat d'electrons en DE3: 0,60376 DOY 293, és a dir, les 14h, 29min i 24,9s del 20 d'octubre de 2002 (52165 s)
- 3- Moment de detecció del màxim d'intensitat d'electrons en DE4: 0,60291 DOY 293, és a dir, les 14h, 28min i 11,4s del 20 d'octubre de 2002 (52091 s)

El temps d'injecció és:

$$t_{inj DE2} = 52381 \text{ s} - (1232 \pm 123) \text{ s} = (51149 \pm 123) \text{ s} = 14 \text{ h } 12 \text{ min } 29 \text{ s} \pm 2 \text{ min } 3 \text{ s}$$

$$t_{inj DE3} = 52165 \text{ s} - (982 \pm 98) \text{ s} = (51183 \pm 98) \text{ s} = 14 \text{ h } 13 \text{ min } 3 \text{ s} \pm 1 \text{ min } 38 \text{ s}$$

$$t_{inj DE4} = 52091 \text{ s} - (823 \pm 82) \text{ s} = (51268 \pm 82) \text{ s} = 14 \text{ h } 14 \text{ min } 28 \text{ s} \pm 1 \text{ min } 28 \text{ s}$$

Es pot veure, per tant, que els temps d'injecció obtinguts per als tres canals d'energia coincideixen en el temps sempre i quan es tingui en compte l'error associat a cada mesura. Concretament es pot dir que l'esdeveniment es va produir en un moment entre les 14 hores i 13 minuts i les 14 hores i 15 minuts del dia 20 d'Octubre de l'any 2002.

Per fer la propagació d'errors s'ha tingut en compte que:

- $\delta(\lambda x) = |\lambda| \cdot \delta(x)$
- Tant en la suma com en la diferència, si els errors són independents entre si, una molt bona estimació de l'error és la suma quadràtica d'errors.

Com que al fer la diferència de temps només es tenia un dels termes amb error associat, aquest s'ha propagat al temps d'injecció sense patir cap canvi.

## 5 Discussió de resultats

Per acabar de determinar amb més precisió el moment i el motiu (l'origen) de l'esdeveniment d'electrons prop de l'òrbita de la Terra, s'analitzen també les fulguracions solars en  $H_\alpha$ , les emissions

de ràdio, les característiques de l'ejecció de massa coronal i el flux de raigs X detectats en aquest període de temps, a partir de les dades proporcionades en el guió. Tot i que s'ha determinat que l'esdeveniment es produeix entre les 14:13 i les 14:15, s'han estudiat les dades al voltant d'aquest interval.

Cal destacar que als temps de les diferents dades obtingudes se'ls hi ha restat 500s (8 minuts), que corresponen al temps que la llum del Sol triga en arribar a l'òrbita de la Terra.

### 5.1 Fulguracions en $H_\alpha$

Les fulguracions en  $H_\alpha$  que es donen al voltant del temps d'aquest esdeveniment són:

Start (UT)	Max (UT)	END (UT)	Lat	Cnd	Regió	Class.
14:11-0:08=14:03	14:15-0:08=14:07	14:42-0:08=14:34	S13	W63	10154	SF
14:22-0:08=14:14	14:24-0:08=14:16	14:50-0:08=14:42	S16	W25	10159	1F
14:22-0:08=14:14	14:24-0:08=14:16	15:03-0:08=14:55	S19	W23	10160	1B
14:22-0:08=14:14	14:30-0:08=14:22	14:32-0:08=14:24	S15	W18	10159	1N
14:24-0:08=14:16	14:25-0:08=14:17	14:36-0:08=14:28	S10	W18	10159	SF
14:28-0:08=14:20	14:56-0:08=14:48	15:19-0:08=15:11	S19	W19	10160	SF
14:44-0:08=14:36	15:02-0:08=14:54	15:09-0:08=15:01	N26	E56	10162	SF

Per identificar millor les diferents fulguracions i fer més entenedora l'explicació, es senyalen amb el mateix color les que pertanyen a la mateixa regió.

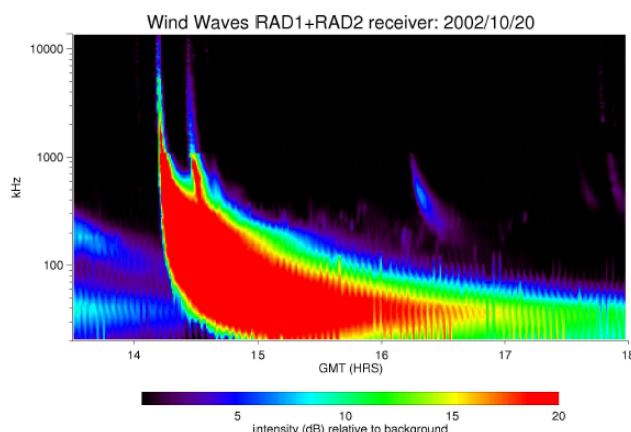
La primera fulguració (casella blanca) té una duració que omple el període en el que es va detectar l'esdeveniment d'electrons, però és de classe SF, de manera que és molt més feble que les següents. Pel que fa a les emissions de les caselles marrons i blaves, totes es van produir a la zona oest del sol (tal com indica la lletra W) i contenen una o dues fulguracions de classe 1, més intenses que les S. L'última regió, en canvi, la 10162 (casella rosa), a més d'estar classificada com a SF, es troba fora del marge horari de l'esdeveniment i està a la zona est (E56). Per tant, difícilment les línies

de camp magnètic podrien arribar a transportar partícules del Sol fins la zona d'ubicació de la sonda *ACE*, on es va detectar l'esdeveniment.

És a dir que, segons aquestes dades, unes de les possibles fulguracions causants de l'emissió d'electrons podrien ser les produïdes en les regions 10159 i 10160.

## 5.2 Emissions de ràdio

Segons el gràfic següent, el dia 20 d'octubre de 2002 hi van haver tres pics d'emissió en ràdio.



Per precisar el moment exacte de la seva emissió, s'ha mesurat l'amplada dels pics (a una freqüència de 1000Hz pels dos primers i de 900Hz pel tercer). Tenint en compte que, segons l'escala temporal del gràfic, 2 centímetres equivalen a una hora, s'han obtingut els temps següents (restant-hi els 8 minuts que triga a arribar a l'òrbita de la Terra):

	Inici	Final	Interval
<b>1r pic</b>	14:12:00-0:08:00= 14:04:00	14:15:00-0:08:00= 14:07:00	3 min.
<b>2n pic</b>	14:22:00-0:08:00= 14:14:00	14:23:05-0:08:00= 14:15:05	1.5 min.
<b>3r pic</b>	16:15:00-0:08:00= 16:07:00	16:18:00-0:08:00= 16:10:00	3 min.

Donat que ja s'ha acotat l'interval de temps entre les 14:13 i les 14:15, el segon pic seria el que podria haver ocasionat l'esdeveniment d'electrons. Pel que fa al primer pic, es pot relacionar amb la fulguració  $H\alpha$  de la regió 10154 a W63 que, tal i com s'ha indicat abans, és més feble que les altres. A més, aquest pic correspon a una línia de vent solar amb una velocitat inferior a la que s'ha obtingut com a mitjana (com es detalla en l'apartat posterior d'emissions de raig X). Per tant, serà menys important que el segon pic; però, donat que la part angular del camp magnètic varia durant l'esdeveniment, en certa manera també contribuirà.

Per altra banda, del gràfic anterior s'observa que els 3 pics són del tipus III. Si el *drift* de la corba fos més lent, es podria pensar en senyals de tipus II, que són els que corresponen a xocs coronals i/o interplanetaris. Els xocs coronals són els que es produeixen a la corona solar, mentre que els xocs interplanetaris es donen en el medi interplanetari. Tot i així, un xoc coronal, s'acaba detectant també en el medi interplanetari perquè es transmet a través d'una ona de xoc. Segons això es podria dir que no hi ha hagut cap xoc coronal ni/o interplanetari. A més, en el cas d'un xoc coronal i/o interplanetari es detectaria un salt important en la gràfica del vent solar, amb un canvi important de la velocitat mitja, fet que no es dona (tal com es comprova també en la taula de les condicions interplanetàries abans i després de l'esdeveniment).



### 5.3 Característiques de la CME (Coronal Mass Ejection)

Segons el catàleg SOHO Lasco CME, les característiques de l'ejecció de massa coronal que es donen en el moment de l'esdeveniment són les següents:

- Temps de la primera observació: 14:30:05
- Posició: PA Central = 274 deg; amplada angular = 20 deg
- Velocitat lineal: 1011 km/s
- Segon ordre de la velocitat a l'alçada final: 978 km/s
- Segon ordre de velocitat als 20Rs: 989 km/s
- Acceleració: -4.8 m/s<sup>2</sup>
- Massa: 3.4 e(+14) grams
- Energia cinètica: 1.7e(+30) erg

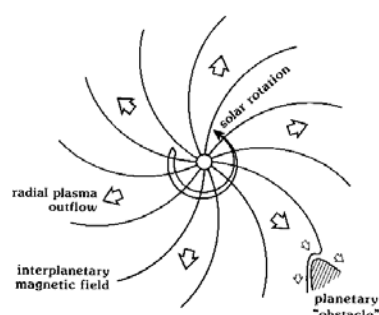
De totes aquestes dades, el més important és observar que la velocitat lineal és superior a 1.000km/s, de manera que és possible que es donin xocs. Tot i així, en aquest cas en concret, amb les dades ràdio i de la velocitat obtingudes, ja s'ha pogut descartar la presència de cap xoc coronal i/o interplanetari, donat que el *drift* de la senyal ràdio no és de tipus II i la gràfica de velocitat del vent solar no presenta cap salt significatiu en el seu valor mig. Per tant, la CME tampoc va contribuir en la generació de l'esdeveniment.

### 5.4 Emissions de Soft-X Ray

Per últim, segons l'interval especificat al guió de la pràctica es detecten els següents augments significatius del flux en Raig X (concretament de *Soft-X Ray*) a les dades del satèl·lit GOES:

Start (UT)	Max (UT)	END (UT)	Lat	Cnd	Regió	Class.
13:51-0:08=13:43	14:02-0:08=13:54	14:10-0:08=14:02	-	-	10162	C5.9
14:10-0:08=14:02	14:13-0:08=14:05	14:21-0:08=14:13	S13	W63	10154	C6.6
14:21-0:08=14:13	14:28-0:08=14:20	14:35-0:08=14:27	S19	W23	10160	M1.8

De les dades només hi ha dos pics per a dues longituds d'ona diferents dins el marge de l'esdeveniment. Sabent que la longitud de les línies del camp magnètic, la zona d'origen i la velocitat de les partícules manté una relació com la de la taula:



V <sub>sw</sub> (km/s)	L (UA)	Δ
300	1.3	W80
400	1.2	W60
500	1.1	W48
600	1.0	W40

S'observa que per a la zona W23 hi correspon una velocitat superior als 600km/s, mentre que per a la zona W63, una entre els 300km/s i els 400km/s. Per tant, l'emissió de la zona W23, on la detecció de raig X és més intensa (ja que és de classe M), tindrà més importància donat que la velocitat mitja del vent solar obtinguda durant l'esdeveniment és d'uns 646.61 km/s.

Tot i així, W63 no es pot descartar només per aquest motiu ja que coincideix amb la primera de les fulguracions detectades en  $H_{\alpha}$  i amb el primer pic de les emissions ràdio.

$\alpha$

## 6 Conclusions

La forma del gràfic d'intensitat d'electrons per als tres canals (DE2, DE3 i DE4) indica que, efectivament, hi va haver un esdeveniment de partícules energètiques solars (SEP) de caire impulsiu relacionat amb fluxos de raigs X. Aquest esdeveniment va tenir una duració de menys d'una hora i, com tots els impulsius, va ser de baixa intensitat, ric en electrons, ions pesats i Heli. A més, segons la relació de la distribució del flux de camp magnètic (línies de camp) amb l'eyecció de massa coronal (CME), la figura d'aquest gràfic d'intensitat d'electrons és pròpia de fulguracions de la zona oest.

Per altra banda, es sap que tant les fulguracions com els xocs coronals i/o interplanetaris conduïts per una CME provoquen l'acceleració de partícules carregades, és a dir, augments esporàdics de fluxos de partícules de diversos ordres de magnitud. Segons el *drift* del gràfic de l'emissió de ràdio i la velocitat mitjana obtinguda sense salts significatius, no és possible la generació de xocs (com ja s'ha comentat en l'apartat en qüestió). Per tant, es conclou que l'esdeveniment d'electrons va ser degut només a les fulguracions de les regions 10159 i 10160. No obstant, podrien haver-hi influències addicionals de la regió 10154, ja que es detecta en raigs X,  $H_{\alpha}$ , al primer pic de ràdio i es

$\alpha$

té una variació brusca en la part angular del camp magnètic en el moment d'aquella fulguració. La fulguració de la zona E i la CME no van contribuir en l'augment d'electrons detectat per la sonda ACE.

## 7 Referències

- Baumjohann, W., Treumann, R., Basic Space Plasma Physics, Imperial College Press, 1996. Solar Flare Theory
- <http://lep694.gsfc.nasa.gov/waves/waves.html>
- [http://gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://gsfc.nasa.gov/CME_list/)
- <http://pwg.gsfc.nasa.gov/istp/outreach/cmeposter/spmeasure.html>
- <http://hesperia.gsfc.nasa.gov/sfttheory/index.htm>
- <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html>
- <http://www.am.ub.es/~nagueda/practicaSol.html>
- <http://sgd.hgdc.noaa.gov/sgd/jsp/solarindex.jsp>
- <http://www-lep.gsfc.nasa.gov/waves/waves.html>
- [http://soho.esac.esa.int/cgi-bin/data\\_query](http://soho.esac.esa.int/cgi-bin/data_query)
- <http://SolarMonitor.org>
- Dossiers de la pràctica