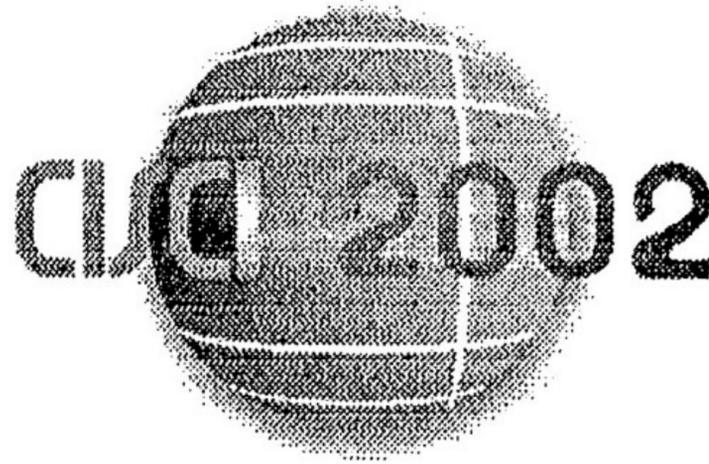


Luciso 1.2.12



**Conferencia Iberoamericana en
SISTEMAS, CIBERNÉTICA E INFORMÁTICA**

del 18 al 21 de Julio de 2002
Orlando, Florida, EE.UU.

Memorias

Volumen II



Organizada por
International Institute of Informatics and
Systemics IIS

Member of the International
Federation of Systems Research IFSR

Editores:
Jorge Baralt
Belkis Sánchez
Emilio García Moreno

Observaciones en la heliosfera con EPHIN/SOHO: Perfiles temporales de sucesos de partículas energéticas solares.

L. del Peral, D. Rodríguez-Frías, R. Gómez-Herrero, J. Gutiérrez,
Departamento de Física. Universidad de Alcalá, 28871 Alcalá de Henares, Spain

and J. Pérez-Peraza

Instituto de Geofísica, UNAM 04510 - C.U., Coyoacán México D.F., MEXICO

Resumen. En este trabajo se ha realizado el estudio de 18 sucesos de partículas energéticas solares detectados por el instrumento EPHIN (Electrón, Proton and Helium Instrument) embarcado en el satélite SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) desde su lanzamiento en diciembre de 1995 hasta finales del año 2000. Se ha realizado una parametrización de los perfiles temporales de los flujos de partículas detectados por EPHIN. Los parámetros determinan diferencias entre sucesos dependiendo de la conexión magnética entre la región activa en que se originó el suceso y las condiciones físicas de la fuente y el transporte interplanetario.

1 Introducción

El perfil temporal de los flujos de partículas energéticas de un suceso de partículas energéticas solares observado en las vecindades de La Tierra a 1 AU viene determinado por varios factores: principalmente por la forma en que se produce la inyección de partículas en la fuente y por las condiciones en que se realiza el transporte interplanetario como son la conexión magnética entre la fuente y el punto de observación y la cantidad de dispersión que se produce en el medio interplanetario debido a las irregularidades del campo magnético y sus características.

Atendiendo a la forma temporal de los perfiles de intensidad de los sucesos, éstos se pueden clasificar en dos tipos claramente diferenciados y de características observacionales completamente opuestas: Los sucesos graduales y los impulsivos.

Los sucesos graduales se caracterizan por poseer los siguientes rasgos particulares:

- Duración de más de dos días.
- Poseen gran abundancia de protones.
- Acontecen uniformemente distribuidos por todas las longitudes solares e incluso detrás del limbo.
- La relación de abundancias entre los isótopos de helio corresponde a la propia de la corona y el viento solar ${}^3\text{He}/{}^4\text{He} \ll 1$.
- La aceleración de las partículas parece producirse por ondas de choque en la alta corona a más de 5 radios solares.

- Las variaciones en las abundancias se corresponden con las diferencias en las condiciones de aceleración.
- Son sucesos que se asocian con emisiones de material coronal rápidas y con producción de frentes de ondas de choque.
- Cuando la velocidad del frente de la onda de choque es > 500 km/s hay elevada posibilidad de que se observe un suceso de partículas energéticas solares de tipo gradual
- Cuando la velocidad del frente de choque supera los 750 km/s siempre se produce un suceso gradual.
- La relación $\text{He}/\text{H}=0.046$ es típicamente coronal.
- Presentan una gran isotropía en la dirección de llegada de las partículas.

Los sucesos impulsivos se caracterizan por ser completamente opuestos en todas las características reseñadas de los sucesos graduales, es decir:

- Tienen duración corta de menos de un día.
- Están dominados por la gran abundancia de electrones.
- Se encuentran distribuidos en la zona de heliolongitudes de buena conexión magnética con el punto de observación, es decir 20-90 Oeste.
- La relación de abundancias de los isótopos de helio muestra una sobre abundancia del ${}^3\text{He}$ que siendo típicamente la relación ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}=1$ puede llegar en algunos sucesos a alcanzar un valor 10.
- La aceleración se localiza en la zona de la fulguración, en la baja corona y el mecanismo de aceleración que energiza las partículas se cree que es la resonancia onda-partícula.
- Muchos de los sucesos impulsivos son denominados ricos en ${}^3\text{He}$ debido a su gran abundancia de este isótopo en relación con las abundancias coronales.
- No se asocian con emisiones de material coronal.
- No se asocian con la producción de ondas de choque interplanetarias.
- Se observan explosiones de radio tipo III

- Se observa emisión de rayos X.
- Para producirse esta sobre abundancia de ^3He el mecanismo de aceleración debe acelerar el 10% del ^3He presente en la región fulgurante.
- Hay también exceso en la abundancia de iones pesados y este exceso aumenta con la carga del ión.
- La relación de abundancias Fe/O es 10 veces la de los sucesos graduales.
- No hay correlación entre las abundancias de distintos sucesos.
- La dirección de llegada presenta gran anisotropía.

De acuerdo con las teorías actuales (Reames 1999), los sucesos graduales poseen unos perfiles temporales de intensidad muy prolongados que duran durante varios días debido a que la aceleración de estas partículas se produce de forma continua en el medio interplanetario en los frentes de ondas de choque que se producen en las eyecciones de masa coronales rápidas. Los sucesos graduales muy grandes pueden generar turbulencias en el campo magnético interplanetario que son capaces de afectar a los propios sucesos (Mason et al, 1989). Los sucesos impulsivos están asociados con la aceleración de partículas en la región activa en que se produce la fulguración solar. Estos sucesos se producirían en la baja corona y sus perfiles temporales muestran estrechos conos de emisión de partículas (Kallenrode et al, 1992) así como escalas temporales muy cortas. La dispersión que se produce en cada suceso depende de las condiciones del medio interplanetario y de las condiciones físicas del medio interplanetario, viéndose afectados por el tamaño e intensidad de la fulguración.

2 Instrumentación y selección de datos

Los perfiles temporales que se presentan en este trabajo han sido obtenidos por el sensor EPHIN embarcado a bordo del satélite SOHO. El satélite SOHO se encuentra en órbita alrededor del primer punto lagrangiano. El instrumento consiste en conjunto de detectores de estado sólido iónica apilados con simetría cilíndrica (mayor información técnica puede encontrarse en Müller-Mellin et al, 1995), cuyo eje apunta en la dirección paralela a la dirección nominal del campo magnético interplanetario, es decir, 45° al Oeste de la dirección que une el satélite con el Sol. EPHIN tiene contadores de electrones en el intervalo energético entre 0.25 y 10.3 MeV e hidrógeno, deuterio, e isótopos de helio en el intervalo energético de 4 a 53 MeV/nucleón. La resolución temporal máxima de los contadores es de 1 minuto. Para este estudio, hemos seleccionado los intervalos energéticos de menor energía: 4.3-7.8 MeV/nucleón para hidrógeno y helio y 0.25-0.7 MeV para electrones. Los datos de análisis de energía depositada en cada detector (PHA Pulse height analyzed data) también se han examinado para obtener las relaciones de abundancias $^3\text{He}/^4\text{He}$, importantes en la identificación de sucesos impulsivos y ricos en ^3He .

Hemos seleccionado 18 sucesos de partículas energéticas solares acaecidos entre Julio de 1996 y agosto de 2000. Siete de ellos han sido identificados como

impulsivos, con relaciones de abundancias, promediadas sobre el suceso, $^3\text{He}/^4\text{He} > 0.3$ en el intervalo energético 5-9 MeV/nucleón. En estos sucesos impulsivos, la energía máxima alcanzada por las partículas del suceso ha sido de 30 MeV/nucleón. Nueve de los 18 sucesos han sido identificados claramente como graduales. Todos ellos poseen una asociación con una emisión de masa coronal y bajas relaciones de abundancias $^3\text{He}/^4\text{He}$. En la mayoría la abundancia de ^3He es tan pequeña que no se puede identificar aumento significativo en los flujos de ^3He sobre el fondo de radiación cósmica. Se han utilizado datos del viento solar y del campo magnético interplanetario de los instrumentos MFI (Magnetic Field Instrument) y SWE (Solar Wind Experiment) que realizaron sus mediciones embarcados en el satélite WIND. En seis de los sucesos graduales se han detectado mediante estos parámetros del viento solar y campo magnético los pasos de los frentes de onda de choque interplanetarios en los cuatro días precedentes a la detección de la llegada de la nube magnética correspondiente a la emisión de masa coronal. En cinco de los nueve sucesos graduales el mecanismo de aceleración fue capaz de acelerar iones a energías superiores a los 50 MeV/nucleon siendo detectados al nivel de tierra en las estaciones de monitores de neutrones. Por último dos de los 18 sucesos muestran características híbridas: el suceso del 9 de Julio de 1996 que aunque con características mezcladas entre gradual e impulsivo tiene un carácter más impulsivo que gradual por su corta duración (Laitinen et al, 2000) y el suceso del 24 de diciembre de 1996 que siendo híbrido muestra características más cercanas a los sucesos graduales (McKenna-Lawlor et al, 1999).

3 Análisis de datos

En las columnas quinta y sexta de la Tabla 1 se listan los tiempos de inicio de los sucesos de partículas energéticas solares para electrones y protones. Han sido determinados utilizando promedios temporales de los contadores de 5 minutos. Las siguientes cuatro columnas contienen los parámetros de la fulguración asociada, estos son, la localización sobre el disco solar, la clasificación en H_α y en rayos X, el instante en que se alcanza el máximo de intensidad en rayos X y la duración de la emisión en rayos X. Estos datos han sido obtenidos de los Solar Geophysical Data. Las columnas de la undécima a la decimotercera listan los parámetros de la emisión de material coronal asociada (datos del coronógrafo LASCO, embarcado en SOHO). Estos datos son: Primera aparición en el coronógrafo C2, velocidad estimada y dirección de propagación. La última columna contiene el instante de paso del frente de choque interplanetario por la posición del satélite WIND.

Utilizando promedios de 30 minutos de los contadores de electrones, protones y helio hemos determinado el tiempo desde el inicio hasta el máximo absoluto t_r que representa el tiempo de aumento del flujo, el tiempo de decaimiento, es decir, el tiempo desde el máximo hasta el instante de recuperación del flujo inicial t_d ; y la relación entre el flujo máximo y el flujo inicial R. En los sucesos en que la fase de decaimiento del flujo es interrumpida por un segundo suceso t_d representa sólo un límite inferior al valor real.

Se ha realizado una parametrización de los perfiles mediante su ajuste a una función impulso de la forma:

$$j = j_0 + A \left[1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau_1}\right) \right]^p \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau_2}\right) \quad (1)$$

donde, j_0 es el nivel de flujo ambiental, t_0 es el instante inicial del suceso que son parámetros que se fijan por evaluación directa en los flujos de partículas. A , representa la amplitud del suceso, τ_1 y τ_2 caracterizan los tiempos de subida y decaimiento del impulso, todos ellos parámetros del ajuste junto con la potencia p . Esta parametrización se ha utilizado para caracterizar la amplitud, y los tiempos de subida y decaimiento para intentar extraer de la forma de los perfiles temporales características de la conexión magnética, la intensidad del suceso y su clasificación, no con el intento de modelar el transporte interplanetario.

La Tabla 2 muestra los parámetros t_r , t_d , R y los resultados de los ajustes realizados de los parámetros τ_1 , τ_2 , A para electrones, protones y helio. La Figura 2 muestra los perfiles temporales de cuatro sucesos graduales y cuatro impulsivos seleccionados entre los 18 estudiados aquí.

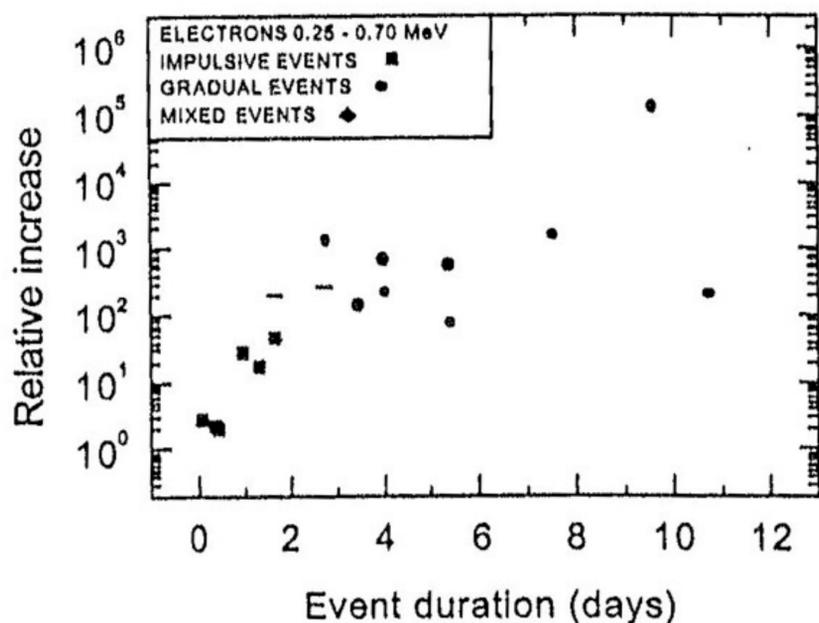


Fig. 1. Duración de los sucesos en días como función del aumento relativo en el flujo de electrones de 0.25-0.70 MeV.

4 Conclusiones

- La duración de los sucesos y el aumento relativo producen Buena distinción entre sucesos graduales e impulsivos. La duración total de los sucesos impulsivos no supera nunca 48 horas y el incremento de flujo relativo es inferior en los sucesos impulsivos que en los graduales en un factor 200 lo que permite una distinción clara entre ambos. Algunos sucesos graduales son tan grandes que el incremento relativo llega a superar los cinco órdenes de magnitud. En la Figura 1 puede observarse un gráfico en que se representa el aumento relativo, A , en función de la duración del suceso t_d para electrones observándose el agrupamiento de los sucesos impulsivos y graduales, quedando los mixtos en una zona intermedia del gráfico.
- El parámetro de ajuste τ_1 proporciona una Buena caracterización de la etapa de incremento, estando relacionado con la conexión magnética del suceso pero

no produce una clara distinción entre los sucesos graduales y los impulsivos. Aunque los sucesos graduales poseen generalmente un incremento menos rápido, hay sin embargo sucesos graduales cuyo aumento de flujo es muy rápido como el del 27 de mayo de 1999 y sucesos impulsivos con aumentos no excesivamente rápidos como el del 10 de agosto de 1997.

- Todos los sucesos graduales muestran un decaimiento largo y difusivo con $\tau_2 > 0.4$ tanto para hidrógeno como para helio. La forma de la fase de decaimiento puede verse afectada por perturbaciones interplanetarias como frentes de ondas de choque y nubes magnéticas. Algunas veces (ej. 6 Junio de 2000) el paso de un frente de choque interplanetario puede observarse como un pico en el flujo de partículas causado por las partículas atrapadas en la perturbación producida por el propio frente de la onda de choque (*energetic storm particles*, ESP).
- La forma global de los perfiles temporales de los sucesos graduales depende de la conexión magnética entre el observador y la localización de el frente de la onda de choque en el instante donde la aceleración es más intensa (Reames, 1999), que es óptima pronto en sucesos conectados hacia el Oeste y tardía para los sucesos conectados hacia el Este. Los tiempos de aumento tan extremadamente rápidos observados en algunos sucesos (6 de Junio de 2000) pueden deberse a aceleración adicional de partículas el frente de onda de emisiones de material coronal secundarias (Kahler, 1993).
- En algunos sucesos graduales se observa un pico muy temprano seguido de un máximo secundario. Este primer pico se piensa que es producido por partículas aceleradas en la fulguración.

Agradecimientos: Los autores agradecen a los equipos de los instrumentos WIND/MFI y WIND/SWE por el uso de los datos KP. La lista de emisiones de material coronal utilizada aquí ha sido producida mediante un consorcio entre el Naval Res. Laboratory (Estados Unidos de América) y el Max-Planck-Institut für Aeronomie (Alemania), Lab. d'Astronomie (Francia), and the Univ. of Birmingham (Inglaterra). Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (MCYT) mediante el proyecto BXX2000-0784 y por la Universidad de Alcalá mediante el proyecto E010/2001. SOHO es un proyecto de cooperación internacional entre la ESA and NASA

Bibliografía

- Kahler, S.W., *Journal of Geophysical Research*, 98 5607-5615, 1993
- Kallenrode, M.B., Cliver E.W., and Wibberenz, G., *Astrophysical Journal*, 391, 370-379, 1992
- Laitinen, T., et al., *Astronomy and Astrophysics*, 360, 729-741, 2000
- Mason, G.M. et al, *Astrophysical Journal*, 339, 529-544, 1989
- McKenna-Lawlor, S.M.P. et al., *proceedings of the 26th ICRC*, 6, 1999.
- Müller Mellin, R. et al., *Solar Physics*, 162, 483-504, 1995.
- Reames, D. V., *Space Science Reviews* 90, 413-491, 1999.

Tabla 1. Sucesos de partículas energéticas solares analizadas y fulguraciones y emisiones de material coronal asociadas con los mismos.

Suceso	Clas. (m d, y)	Fecha (m d, y)	Fecha (DOY)	Instante inicio		Fulguración				Emisión de Material Coronal			
				-0.3 MeV (hh:mm)	-6 MeV (hh:mm)	H α Loc.	H α /XR Clasif.	rayosX tmax (hh:mm)	rayosX durac. (min)	C2 App. time (hh:mm)	Veloc. Inicial (Km/s)	Dirección de propag.	Choques IP paso DOY:hh:mm
1	M	Jul. 9, 1996	191	09:04	09:35	S10W30	1B/X2.6	09:12	48	12:28	426	W	-
2	MG	Dic. 24, 1996	359	13:22	15:00	-	-/C2.1	13:11	20	13:28	300	W	-
3	G	Abr. 1, 1997	91	>8:58	14:37	S25E16	1B/M1.9	13:48	36	15:18	296	E	-
4	G	Abr. 7, 1997	97	14:16	16:07	S30E19	3N/C6.8	14:07	29	14:27	830	Halo	100:13:00
5	I	Ago. 10, 1997	222	>17:47	20:28	-	-/B8.6	18:33	27	-	-	-	-
6	G	Sep. 24, 1997	267	03:00	05:45	S31E19	1B/M5.9	02:48	9	02:51 ^a	>300	SE	(274:01:00)
7	G	Nov. 4, 1997	308	06:14	08:35	S14W33	2B/X2.1	05:58	10	06:10	830	Halo	310:22:10
8	G	Nov. 6, 1997	310	12:12	15:30	S18W63	2B/X9.4	11:55	12	12:10	1560	W	313:10:00& 313 22:30
9	I	Nov. 28, 1997	332	15:25	16:54	(N19E54)	(SF/C2.2)	(15:15)	(9)	-	-	-	-
10	G	Abr. 20, 1998	110	10:25	11:00	S43W90	EPL/M1.4	10:21	100	10:07	1638	W	113:17:30
11	I	Mar. 21, 1999	80	17:00	18:18	?	?	?	?	-	-	-	-
12	I	Mar. 22, 1999	81	18:06	21:00	?	?	?	?	-	-	-	-
13	I	May. 12, 1999	132	06:55	08:22 ^b	?	?	?	?	06:26	-	N	-
14	G	May. 27, 1999	147	10:55	11:51	-	-/C1.2	09:17	7	11:06	?	Halo	-
15	I	Nov 1, 1999	305	00:00	02:45	N09E12	SF/C1.7	00:30	31	-	-	-	Datos no válidos
16	G	Abr. 4, 2000	95	15:21	16:50	N16W66	2F/C9.7	15:41	53	16:32	984	Halo	97:16:27& 98:09:16
17	G	Jun. 6, 2000 ^c	158	16:48	19:15	N20E18	3B/X2.3	15:25	42	15:54	908	Halo	160:09:04
18	I	Ago. 22, 2000 ^d	235	00:13	02:23	-	-/C2.5	00:21	32	<00:54	?	NW	-

^aOnda Moreton observada por SOHO/EIT en la región NOAA AR 8088

^bTiempo de inicio de llegada del helio (No hubo aumento del flujo de protones durante este suceso)

^cTiempo de subida del suceso muy grande. Evidencia de inyección múltiple de partículas (Fulguraciones X2.3 y X1.2 a las 158:15:25 y 159:15:53 ambos acompañadas por Emisiones de material coronal halo)

^dpromedios de flujos de 5 minutos muestran un Segundo pico probablemente asociado con una fulguración SF/C1.1 a las 235:05:16 en NOAA AR 9131 (N15W34)

Table 2. Parámetros medidos y ajustados de los perfiles temporales. (τ_r , τ_d , τ_1 , and τ_2 en días. A in $\text{cm}^2 \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1} (\text{MeV/n})^{-1}$, R adimensional)

Event	Electrones						protones						A					
	τ_r	τ_d	R	τ_1	τ_2	A	τ_r	τ_d	R	τ_1	τ_2	A						
1	0.15	2.71	262	0.004	0.128	998	0.11	2.99	2333	0.013	0.402	0.03	0.011	2.13	237	0.011	0.449	$3.9 \cdot 10^{-3}$
2	0.06	1.68	197	0.002	0.222	155	0.44	3.50	1300	0.123	0.501	0.09	-	-	-	-	-	-
3	0.50	5.40	75.4	0.103	0.668	85.5	0.96	5.96	848	0.350	0.961	0.07	0.73	2.32	28.3	0.905	0.596	$2.1 \cdot 10^{-3}$
4	0.09	3.46	144	0.009	0.429	59.8	0.31	6.22	2529	0.051	0.843	0.34	0.27	2.64	70.1	0.092	0.616	$3.3 \cdot 10^{-3}$
5	0.14	1.64	45.7	0.017	0.234	30.6	0.36	1.65	50.0	0.224	0.269	$8.7 \cdot 10^{-3}$	0.34	0.98	23.7	0.219	0.182	$6.2 \cdot 10^{-3}$
6	0.11	10.7	199	0.009	0.435	55.3	0.21	7.48	162	0.173	0.980	0.02	-	-	-	-	-	-
7	0.07	2.78	1344	0.018	0.282	$1.5 \cdot 10^4$	0.23	2.70	450	0.030	1.557	9.32	0.23	2.70	$1.3 \cdot 10^4$	0.017	1.262	0.24
8	0.48	7.53	1509	0.105	0.434	$3.3 \cdot 10^5$	0.58	7.32	96.0	0.173	0.620	245	0.35	7.34	265	0.134	0.599	6.20
9	0.09	0.96	27.7	0.003	0.085	95.0	0.10	1.02	25.0	0.015	0.193	0.02	0.08	0.79	55.0	$9.0 \cdot 10^{-4}$	0.164	$4.0 \cdot 10^{-3}$
10	1.06	9.57	$1.3 \cdot 10^5$	0.366	0.493	$6.2 \cdot 10^6$	0.98	9.55	$2.5 \cdot 10^5$	0.929	0.659	1405	0.88	9.45	$1.6 \cdot 10^5$	1.115	0.523	153
11	0.02	0.08	2.80	-	-	-	0.08	0.50	83.3	0.016	0.070	0.03	0.06	0.27	66.7	0.009	0.033	0.02
12	0.04	0.40	2.01	0.023	0.132	5.3	0.09	0.27	8.1	0.018	0.055	$2.6 \cdot 10^{-3}$	0.07	0.17	104.3	0.053	0.015	1.32
13	$4 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	1.60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.10	6.5	0.012	0.0076	0.61
14	0.06	5.35	541	0.002	0.169	1909	0.17	5.37	$2.7 \cdot 10^4$	0.007	0.535	2.49	0.06	4.83	286	0.005	1.165	$3.3 \cdot 10^{-3}$
15	0.08	0.37	2.40	0.086	0.068	20.8	0.11	0.71	26.8	0.013	0.204	10^{-3}	0.09	0.38	46.3	0.006	0.151	$2.6 \cdot 10^{-4}$
16	0.71	4.03	221	$4 \cdot 10^{-4}$	0.897	1184	1.08	9.33	$4.2 \cdot 10^5$	0.238	0.411	653	0.64	5.31	$1.8 \cdot 10^5$	0.270	0.395	8.95
17	1.81	4.00	677	-	-	-	1.75	3.98	$1.1 \cdot 10^4$	-	-	-	1.56	3.79	$1.4 \cdot 10^4$	-	-	-
18	0.04	1.29	17.6	0.001	0.055	120	0.09	1.44	24.7	1.124	0.463	$7.4 \cdot 10^{-3}$	0.09	2.15	125.0	0.586	0.532	$2 \cdot 10^{-3}$

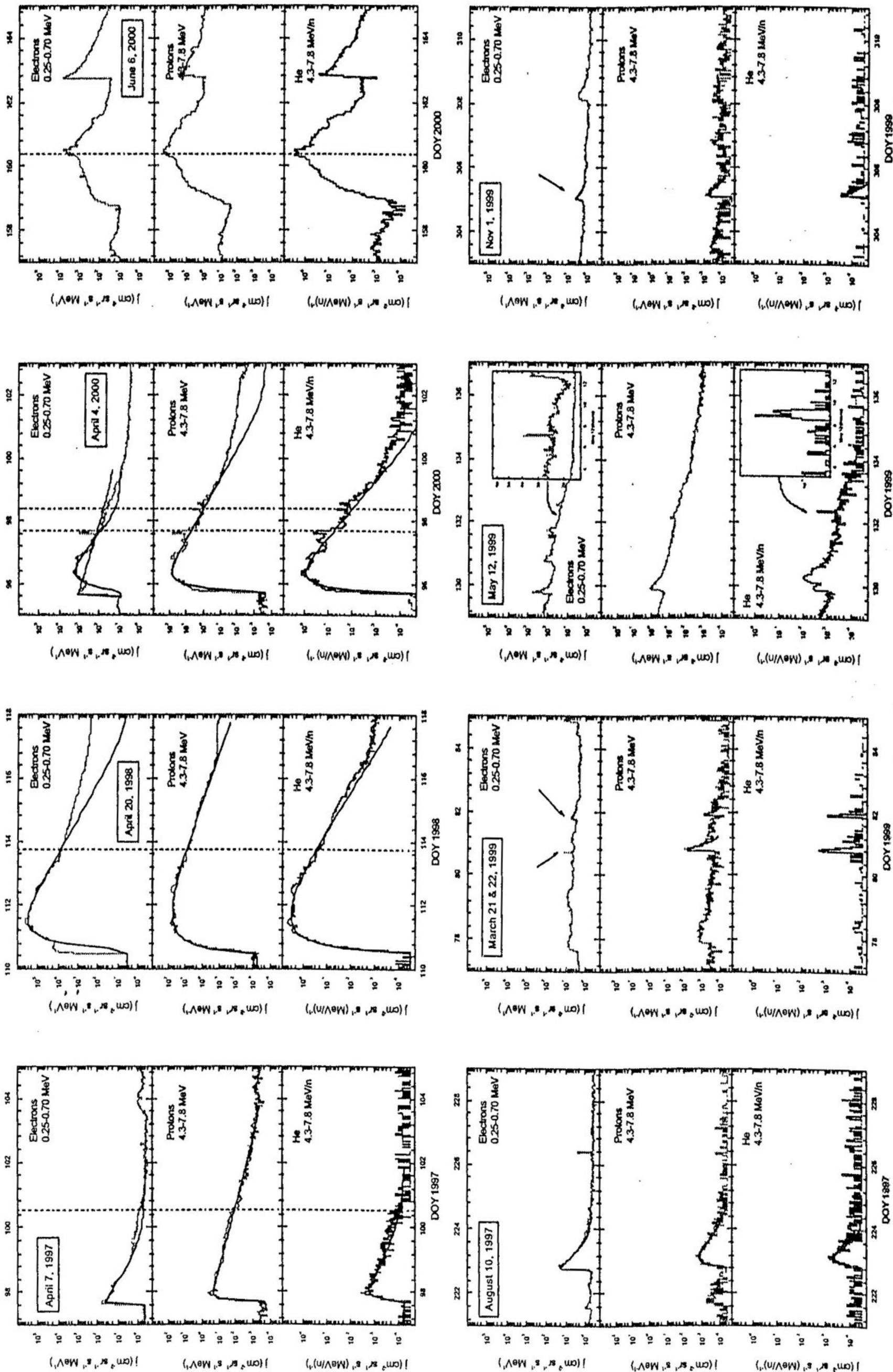


Fig.2. Promedios de 30 minutos de los flujos de 4 sucesos graduales (arriba) y 4 impulsivos (abajo) seleccionados entre los 18 sucesos analizados en este trabajo. Las escalas de los ejes son las mismas para todas las gráficas. Las líneas discontinuas marcan pasos de frentes de ondas de choques interplanetarios. Los flujos de helio son totales ($^3\text{He} + ^4\text{He}$).