

Modelación de los procesos de carga-descarga en la cola de la magnetosfera. Evidencias de SOC

Ojeda A. ⁽¹⁾, B., Lazo ⁽¹⁾, S., Savio ⁽¹⁾, A. Calzadilla ⁽¹⁾, K. Lazo ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Instituto de Geofísica y Astronomía. Calle 212 No.2906, La Lisa, C. Habana, CP 11600, Cuba.

Recibido: enero-octubre, 2005	Aceptado: noviembre, 2005
-------------------------------	---------------------------

Resumen

Se estudia la evolución del sistema viento solar–magnetosfera mediante el análisis de la dinámica de un modelo del proceso de carga-descarga en la magnetosfera. La simulación se realizó con ayuda de un autómata. Se observó invarianza de escala espacial y temporal, tanto para los parámetros de control incorporados a partir de un generador de números aleatorios, como a partir de datos reales del viento solar. La invarianza observada es un indicador de la posibilidad de que se establezca un estado de criticidad auto-organizada (SOC) en los procesos de carga–descarga que ocurren en el sistema viento solar–magnetosfera-ionosfera.

Palabras clave: Física solar.

Abstract

We study the temporal evolution of the solar wind-magnetosphere system using a cellular automaton to model the dynamical process of storage-release in the magnetosphere tail. We found invariance in the time and space scales, as much as for the control parameters artificially added by a random number generator and with a real data of the solar wind. The invariance observed is an indicator of the self organized criticality in the process of storage-release in the solar wind-magnetosphere-ionosphere system.

Key words: Solar physics.

Introducción

La mayor parte de la energía producida por el dínamo viento solar-magnetosfera es disipada en la ionosfera de altas latitudes como calor Joule mediante los sistemas de corrientes y campos eléctricos, y como deposición de energía a través de la precipitación de partículas en la “lámina de plasma” (plasma sheet). De esta forma, cualquier incremento en la entrada de energía procedente del viento solar, será redistribuido en la atmósfera terrestre mediante los diversos mecanismos disipativos que caracterizan el acoplamiento magneto-ionosférico.

Una vez que se incrementa el acoplamiento energético entre el viento solar y la magnetosfera debido al signo y valor de B_z , parte de la energía incidente es disipada después de algunos minutos mediante mecanismos de convección global. Esto produce una inyección de partículas energéticas en la corriente anular simétrica, incrementando la disipación Joule en la ionosfera de altas latitudes como consecuencia de una intensificación de las corrientes de convección y la deposición de partículas en la ionosfera auroral, generándose de esta forma el fenómeno de las auroras (Akasofu, 1981).

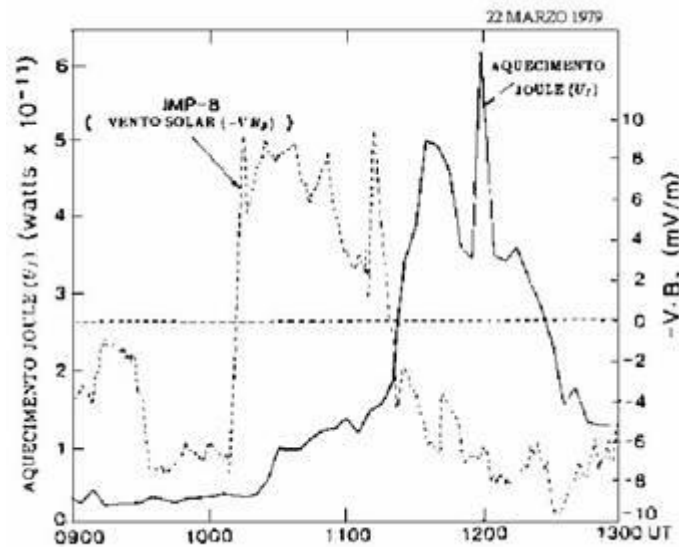


Fig.1- Debido al viento solar en las primeras dos horas se carga el sistema (líneas discontinuas), luego en las últimas dos horas aumenta la disipación joule, el sistema se descarga (adaptada de Baker et al. (1985))

Este tipo de disipación, que puede ser explosivo y está asociado a subtormentas magnéticas, constituye un proceso de “carga-descarga”. Estos procesos de carga-descarga coexisten con determinadas particularidades ya que se han observado eventos en los cuales un proceso domina sobre el otro. En la Fig. 1, adaptada de Baker et al. (1985), se ilustra la coexistencia de estos dos mecanismos. Después de un aumento “repentino” de energía, (de 10 a 20 minutos) debido a la inductancia del sistema, ésta es disipada en la ionosfera de altas latitudes vía calor Joule, mientras la que se encuentra almacenada en la cola magnética es liberada después de 30 a 60 minutos. A pesar de la competencia entre ambos procesos, es innegable el papel fundamental que juega la componente B_z del CMI, en particular cuando $B_z < 0$ durante períodos prolongados de tiempos.

Criticalidad Auto-Organizada (SOC)

El concepto de criticalidad auto-organizada (SOC) [Bak, et., all. (1987).] lo podemos ilustrar mediante la descripción de la dinámica del sistema SOC mas simple y conocido: la pila de arena (sandpile) [Kadano et., all. (1989).]. El sandpile está formado por N celdas, sobre las que se deja caer arena con una determinada probabilidad, $p_0 \ll 1$. La cantidad de arena almacenada en cada celda va creciendo hasta que la pendiente en alguna de ellas rebasa un cierto valor crítico Z_c , prefijado de antemano. Entonces, se mueven N_f granos de arena de la celda inestable a la siguiente (ver Fig. 2). Esta, a su vez, puede superar la pendiente crítica al acomodar esta arena, en cuyo caso trasladará también N_f a la siguiente celda. A este proceso se le llama una avalancha, y puede afectar a cualquier número de celdas entre 1 y N . Dejando al sandpile evolucionar de acuerdo a estas reglas, se acaba por alcanzar un estado estacionario en el que la arena que se introduce en el sistema es compensada por las avalanchas que llegan al borde del mismo y echan fuera el excedente, alcanzado lo que se conoce como estado críticamente auto-organizado.

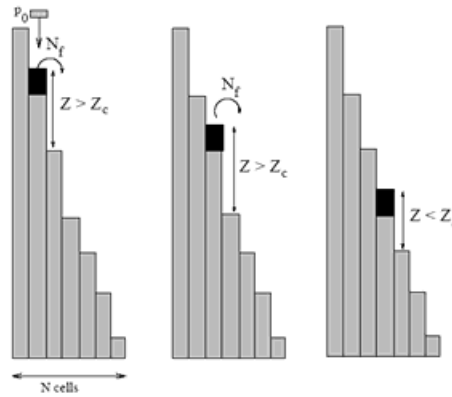


Fig.2- Esquema evolutivo temporal en los estados de equilibrio en la pila de arena, mostrando una avalancha que se propaga dos celdas antes de detenerse.

¿Porque que es crítico y auto-organizado? La criticalidad está relacionada con el hecho de que el sistema tiene propiedades similares a las de un punto crítico durante una transición de fase, así como rasgos de auto-similaridad entre varias escalas ya sean espaciales o temporales y correlaciones que divergen al aumentar de tamaño el sistema. Por ejemplo, dada la función de distribución de probabilidad (o FDP) del tamaño de las avalanchas con las que el sistema compensa el aporte externo de arena. Esta FDP puede ser representada por una expresión del tipo:

(1)

Donde $s_1(N) \gg s_2(N) > 1$ son función del tamaño del sistema, y cumplen que:

(2)

s_1 y s_2 determinan, por tanto, el rango de escalas para las que el sistema es auto-similar ya que, para ellas, la FDP tiene la forma de una ley de potencias con exponente $-k$. Considerando la Ec. 2, es evidente que dicho rango diverge con el tamaño del sistema, y se obtiene que $0 < k < 2$. Esto implica que la varianza de la FDP diverge con el tamaño del sistema, como ocurre en un punto crítico tradicional. Sin embargo, a diferencia de éste último, no depende de parámetros internos que le impidan alcanzar el estado de criticalidad organizada. De ahí el llamarlo auto-organizado.

Materiales y métodos

Las simulaciones realizadas de los procesos de carga-descarga en la magnetosfera fueron hechas con ayuda de un autómatas, usando el paquete de programación mathematica 5.1. Se toma un valor aleatorio de entrada entre 0 y 15, para cuantificar la energía procedente del viento solar dentro del modelo, siendo este el rango de variación modular de la componente B_z . Solo una parte de esta energía logra penetrar la magnetopausa, dependiendo para ello de un coeficiente de reflexión r , cuyo valor depende del signo de la componente B_z del campo magnético interplanetario (CMI). En nuestro modelo se asignan valores para $r = 0\%$ si $B_z \leq 0$ asumiendo que se produce una reconexión magnética total, $r = 30\%$ para $B_z > 0$ ya que se asume que la entrada de energía corresponde a una combinación entre el acoplamiento de tipo viscoso y la contribución de reconexiones magnéticas de corta duración. Parte de esta energía que logra penetrar la magnetosfera es disipada directamente en la ionosfera de altas latitudes vía calor Joule o devuelta al viento solar. Esta fracción de energía pérdida es tomada en consideración en el modelo al definir un parámetro β como una medida de los mecanismos de descarga que ocurren en la magnetosfera e ionosfera de las altas latitudes y por tanto modula la cantidad de energía que se acumula en la cola o se disipa hacia la ionosfera. Al no tener una referencia de algún trabajo anterior donde se contabilice este valor, nosotros haremos un estudio del comportamiento del sistema barriendo todo el espectro de posibles valores que este parámetro pueda tomar, variando desde 0.01 (energía totalmente transferida hacia la cola de la magnetosfera) a un valor próximo a 1 (energía totalmente disipada hacia la ionosfera o devuelta al viento solar). Esquemáticamente este proceso se representa en la Fig.3.

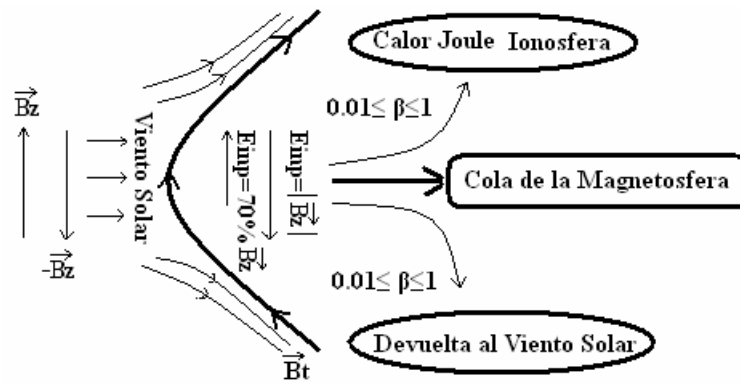


Fig.3- Se representa de forma esquemática el diagrama funcional del modelo. Si se supera el valor umbral de energía en la cola de la magnetosfera ocurren avalanchas explosivas.

Se fijó un valor de energía crítica de volcado o valor de energía umbral para que se produzca el proceso de descarga en $E_c = 3$ siguiendo una metodología matemática similar a la de Kozelov y Kozelova, (2002a). Por tanto, en el caso de que la energía almacenada en la cola de la magnetosfera fuera mayor o igual a tres, entonces ocurre un proceso de descarga. Después de esto, a la energía final se le asigna un número aleatorio entre 0 y 0.5, pues en la magnetocola siempre hay una energía remanente después de la descarga.

Resultados y discusión

En nuestro modelo no se tienen N celdas redistribuidas espacialmente en una matriz como ocurre en el modelo de pila de arena, que hacen posibles la aparición de avalanchas de diferentes tamaños. Aquí se analiza la energía total que se acumula en toda la lámina de plasma y que se tornará inestable cuando se supere un valor de energía crítica E_c que se fijó de antemano. Al suceder esto la energía almacenada en la cola de la magnetosfera instantáneamente se deposita hacia la ionosfera o la devuelve en forma de plasmoides al viento solar [Dungey 1961], ocurriendo lo que se conoce como avalanchas explosivas [Consolini, 1997]. En el posterior paso de tiempo puede que la energía que se acumula en la magnetocola la torne nuevamente inestable haciendo que se dispare otra avalancha explosiva. El número de veces seguidas que ocurra este proceso es lo que llamamos tamaño de las avalanchas. También se contabilizó el tiempo que se demora entre la ocurrencia de una avalancha de determinado tamaño y se inicia otra, esto se conoce como tiempo de espera (Waiting Time).

¿Podremos confirmar fácilmente si nuestro modelo se encuentra realmente en un estado crítico? Desafortunadamente, no existe ningún test que permita asegurar de manera definitiva si un sistema presenta una dinámica SOC. Pero si el sistema es SOC, deberá al menos ser posible detectar algunas de sus propiedades más características. A saber, su auto-similaridad y su criticalidad. Y por supuesto, la visualización de las avalanchas. La prueba más definitiva será construir la FDP de los tamaños de éstas y sus respectivos tiempos de espera (Waiting Time) y comprobar si exhibe leyes de potencias. Por tanto, decimos que un sistema muestra evidencias de SOC si da lugar a leyes de potencias: Las avalanchas de mayores tamaños son mucho menos probable que las más pequeñas y esto es lo que se trata de verificar en este trabajo mediante el estudio del comportamiento de las probabilidades de ocurrencia de avalanchas de diferente magnitud.

Primeramente se realizó un estudio del modelo asumiendo valores negativos de B_z para todo instante de tiempo, generando un número aleatorio entre 0 y 15 y se realizaron 32000 corridas para cada valor de β que se incrementa en pasos de 0.01, desde 0 hasta 1. Este caso es el de máxima reconexión magnética (MaRM) porque el parámetro de reflexión $r = 0\%$ en todo momento y por tanto hay máxima entrada de energía al sistema. Posteriormente, se realizó una simulación de la dinámica del sistema en el caso de reconexión magnética mínima (MiRM), es decir $r = 30\%$ en todo momento, luego existe una mínima entrada de energía al sistema comparado con el caso anterior. Durante MiRM se producen avalanchas porque la magnetosfera es un sistema abierto, que constantemente está interactuando con el viento solar y la ionosfera. Aunque en menor medida, también se puede producir reconexión magnética para $B_z > 0$ [Song et al., 2000], además también están presentes los mecanismos de interacción de tipo viscoso [Axford and Hines, 1961].

Posteriormente suponemos que el valor de energía de entrada al sistema es función de valores reales de la componente B_z de CMI. En este caso tomamos su módulo como energía de entrada [Kozelov and Kozelova, 2002b] y en dependencia del signo se usa uno de los dos valores del parámetro de reflexión r como se mencionó anteriormente. A partir de 20 días de datos reales de viento solar se realizó un análisis semejante al anterior. Aquí tomamos el valor de B_z para 20 nubes magnéticas (NM) durante el período (1995-2001) [Ojeda et., al 2005] y datos de viento solar no perturbados (VS) en el mismo periodo de tiempo.

En la Tabla 1 se pueden ver los resultados del modelo para los cuatro casos analizados. Allí se muestran los valores de la cantidad de avalanchas de tamaños mayores que uno, α es el valor del exponente que se deriva de la función de distribución de probabilidad (o FDP) del tamaño de las avalanchas ($1/f^{\alpha}$). El valor de η representa el exponente que se deriva de la función de distribución de probabilidad (o FDP) del tiempo de espera (Waiting Time) entre avalanchas ($1/f^{\eta}$). La existencia de las avalanchas y de sus respectivas funciones de distribuciones en leyes de potencias hace que el modelo exhiba evidencias de criticidad autoorganizada (SOC) [Chapman et. al. 1998; Freeman et. al. 2000]. Esta simulación reproduce las características que han sido reportadas por otros autores v.g. Chang (2000), y sus respectivas referencias.

Tabla I. Se muestran los resultados del modelo para los cuatro casos analizados de entrada de energía al sistema. Cuando hay menos de 30 avalanchas no se buscan los exponentes de las leyes de potencias porque existen muy pocos puntos.

	β	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.76	0.77	0.78	0.79	0.8	0.9
MaRM	α	1.44	1.64	1.86	2.22	2.30	2.40	3.09	3.47	4.79	5.66	5.52	6.67	7.82	8.10		
	η	1.79	1.71	1.93	2.17	2.18	2.43	3.07	3.22	3.19	4.73	4.28	4.42	4.65	4.53		
	A_v	4102	4325	4514	4675	4669	4996	5055	4719	3563	2268	1886	1465	1053	566	0	0
MiRM	α	1.76	1.88	2.05	2.36	2.56	3.20	4.10	4.24	7.98							
	η	2.06	1.82	1.91	2.33	2.55	3.19	4.08	5.13	4.64							
	A_v	4796	4906	4929	5002	5051	4833	4312	3066	542	0	0	0	0	0	0	0
NM	α	1.19	1.29	2.70	1.31	1.50	1.69	1.25	0.87	1.56							
	η	2.55	2.64	2.68	2.83	3.03	2.98	3.13	3.02	3.01							
	A_v	382	371	391	336	266	209	220	82	103	16	16	20	11	18	27	4
VS	α	1.50	1.48	1.50	1.40	1.58	1.97	0.93									
	η	2.68	2.70	2.71	2.63	2.63	2.48	2.45									
	A_v	364	338	295	231	181	93	32	12	4	0	0	0	0	0	0	0

Al aumentar el valor del parámetro b las avalanchas en el sistema comienzan a disminuir. Físicamente esto significa que si en el sistema se disipa cada vez más la energía que entra por su frontera, entonces se acumula muy poca energía en la cola de la magnetosfera y por tanto sólo ocurrirán avalanchas o descargas cuando al sistema entren cantidades extremas de energía por sus fronteras que hagan posible superar el valor crítico que se fijó de antemano en la magnetocola. Podemos comparar el caso extremo de MaRM con el caso real de NM, pues existen avalanchas hasta valores en el entorno de $b = 0.8$. Sin embargo para VS y MiRM dejan de ocurrir avalanchas para $b = 0.7$.

Este modelo evidencia que al sistema ingresa energía procedente del viento solar, la cual se acumula en la magnetocola y cada cierto tiempo el sistema se descarga a través de avalanchas explosivas. El hecho que para cada valor de b existan mayores cantidades de avalanchas para NM que para VS se debe a que las Nubes Magnéticas son estructuras magnéticas más estables [Ojeda et., al 2005] las cuales se reconectan con el campo magnético terrestre y hacen posible la mayor entrada de energía al sistema y por tanto aumentan los procesos de descargas a través de la emisión de plasmoides al viento solar y a la disipación joule en la ionosfera de altas latitudes.

Conclusiones

Este modelo muestra invarianza de escala espacial y temporal tanto para parámetros de control incorporados a partir de un generador de números aleatorios como a partir de datos reales del viento solar, esto se muestra al analizar las funciones de distribución de probabilidades. Lo anterior es una evidencia de Criticidad Autoorganizada (SOC) en los procesos de “carga-descarga” que tienen lugar en el sistema Viento Solar-Magnetosfera-Ionosfera.

El modelo genera mayores cantidades de avalanchas relacionadas físicamente con los procesos de liberación de energía ante la presencia de nubes magnéticas que ante un viento solar tranquilo.

La dinámica del viento solar se caracteriza por su turbulencia y carácter intermitente (Freeman et. al., 2000) determinando el estado de la magnetosfera [Chang, 1999], en la cual se producen períodos de acumulaciones de energía hasta determinados umbrales y esta se libera mediante una cascada de procesos de difusión y transporte que son característicos de la actividad dinámica con criticidad autoorganizada según reportan algunos autores. [Consolini, 1997, Chapman et. al. 1998, Chapman and Watkins, 2000] y lo cual mostramos en nuestro modelo.

Referencias

- Akasofu S I., (1981). Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere. *Space Science Reviews* Volume 28, Number 2, pp. 121 – 190.
- Ojeda A., A. Calzadilla, B., Lazo, K., Alazo, S., Savio (2005) Analysis Of Behavior Of Solar Wind Parameters Under Different IMF Conditions Using Two Nonlinear Dynamics Techniques “*Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, EN PRENSA (doi:10.1016/j.jastp. 2004.12.14).
- Axford, W. I., and C. O. Hines. (1961) A unifying theory of high-latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms. *Cn J Phys* 39: 1433.
- Bak, P., C. Tang and K. Wiesenfeld (1987). How nature works. The science of self-organize criticality, Oxford University Press. , *Phys.Rev.Lett* 59, 381
- Baker, D. N., et al.,(1985) The role of heavy ionospheric ions in the localization of substorm disturbances on March 22, 1979:CDAW6, *J. Geophys. Res.*, 90, A2, 1273-1281.
- Chang, T. S. (1999) Self-organized criticality, multi-fractal spectra, sporadic localized reconnections and intermittent turbulence in the magnetotail, *Phys. Plasmas* 6, 4137.
- Chapman, S. C., Waatkins, N. W., Dendy, R. O., Helander, P., and Rowlands, G. (1998). A simple avalanche model as an analogue for magnetospheric activity, *Geophys. Res. Lett.* 25, 2397.
- Consolini, G. (1997). Sadtiple cellular automata and magnetospheric dynamics, in S. Aiello, N. Iucci, G. Sironi, A. Treves and U. Villante (eds.), *Proc. Vol. 58, “Cosmic Physics in the Year 2000”*, SIF, Bologna, Italy.
- Freeman, M. P., Watkins, N. W., and Riley, D. J. (2000b). An SOC-like avalanche distribution observed in aqMHD turbulent cascade in the solar wind, *Phys. Rev. E.*, in press. Kadano L.P., S.R. Nagel, L. Wu and S.M. Zhou, (1989), *Phys.Rev.A* 39, 6524.
- Kozelov B. V. and T. V. Kozelova (2002a) Positive Feedback in the Self-Organizing Model as an Analog for the Magnetosphere–Ionosphere Coupling during a Substorm, *Geomagnetism and Aeronomy*, Vol. 42, No. 4, 2002, pp. 437–444.
- Kozelov. B.V. and T.V.Kozelova. (2002b). Cellular model analogy of the magnetosphere-ionosphere substorm activity driven by solar wind with finite velocity of penetration into magnetosphere, *Physics of the Auroral Phenomena*, *Proc. XXV Annual Seminar*, Apatity, pp.17-20.
- Song, P, T. I. Gombosi., D. L. DeZeeuw, K. G. Powell, C. P. T. Groth. (2000). A model of solar wind-magnetosphere-ionosphere coupling for due northward IMF.
- Wolfram Research, sitio web: www.wolfram.com mathematica 5.0, versión 2003.