

ANALISIS KETERKAITAN SEMBURAN RADIO MATAHARI TIPE II, CME, DAN FLARE DENGAN MENGGUNAKAN PENDEKATAN KINEMATIS

JOHAN MUHAMAD

Bidang Matahari dan Antariksa
Pusat Pemanfaatan Sains Antariksa – LAPAN
e-mail: johan_m@bdg.lapan.go.id

ABSTRAK. Keterkaitan antara flare, CME, dan semburan radio Matahari dianalisis berdasarkan besar kecepatan dan energi kinetiknya. Dengan menggunakan model Newkirk untuk kerapatan elektron di korona, ketinggian gelombang kejut saat semburan radio tipe II terdeteksi dapat ditentukan. Ketinggian ini dibandingkan dengan ketinggian CME hasil pengamatan satelit SOHO untuk kemudian dibuat hubungannya dengan kecepatan penurunan frekuensi semburan radio. Berdasarkan kecepatan perubahan ketinggian gelombang kejut dan CME ini, energi penjarangan partikel dapat diperkirakan dan hasilnya dibandingkan dengan kekuatan flare. Dalam makalah ini, teknik analisis kinematis untuk ketiga peristiwa di Matahari diperkenalkan dan dipergunakan untuk memperkuat dugaan bahwa flare, CME, dan semburan radio tipe II tidak hanya berkaitan secara temporal, tapi juga secara kinematis.

ABSTRACT. *The Association between flare, CME, and solar radio burst was analyzed by comparing the speed and energy of some events. By using Newkirk model for coronal electron density, the height of the first detected signal shock of the type II solar radio burst was determined. The height of the shock was compared with the height of CME from SOHO satellite observation to find its correlation with the solar radio frequency drift. Based on the height shifted, the energy of the particle propagation can be measured and compared with the flare class. In this paper, this new comparison technique was introduced and probed to testify the hypothesis that flare, CME, and type II solar radio burst were not only temporary associated, but also kinematically associated.*

KATA KUNCI: Semburan radio tipe II, flare, CME, gelombang kejut.

KEY WORDS: *Type II Solar radio bursts, flare, CME, shock wave.*

1. Pendahuluan

Flare dan lontaran massa korona (Coronal Mass Ejection / CME) diperkirakan merupakan dua peristiwa yang saling terkait berdasarkan hubungan statistik yang cukup kuat di antara keduanya (Mahrous et al., 2009; Yashiro and Gopalswamy, 2008). Flare sebagai peristiwa yang lebih melibatkan proses termal meradiasikan gelombang elektromagnet pada setiap ledakannya. Sedangkan semburan partikel dan massa dari korona Matahari terlepas melalui peristiwa CME. Kedua peristiwa ini sering terjadi pada waktu yang tidak jauh berbeda. Hal ini menimbulkan munculnya dugaan kuat bahwa kedua peristiwa ini saling terkait. Meskipun begitu, tidak semua flare yang terdeteksi berasosiasi secara temporal kemunculannya dengan CME.

Selain analisis keterkaitan secara temporal, diperlukan adanya analisis terhadap karakteristik fisis dari peristiwa-peristiwa tersebut agar diketahui hubungannya secara lebih meyakinkan. Salah satu bentuk fenomena di Matahari yang diduga berkaitan dengan karakteristik fisis peristiwa lainnya di Matahari adalah semburan radio Matahari tipe II. Semburan radio Matahari tipe II adalah salah satu tipe spektrum frekuensi gelombang radio yang berasal dari Matahari dengan tipe penurunan frekuensi yang lambat. Semburan radio tipe II diyakini merupakan representasi dari laju gelombang kejut (*shock*) dari partikel yang terlempar saat terjadi ledakan di Matahari (Roberts, 1959).

Untuk melihat adanya hubungan fisis antara semburan radio tipe II dan CME, maka penyelidikan mengenai kesamaan atau kesesuaian karakteristik fisis kedua peristiwa tersebut sangatlah diperlukan. Untuk CME, pengamatan visual yang dilakukan oleh LASCO didasarkan atas penjalaran material CME yang diwakili oleh cahaya putih yang tampak menyembur keluar Matahari. Dari penjalaran cahaya putih yang terlihat di kamera LASCO, dapat diperkirakan ketinggian material CME dan kecepatan lontarannya (Brueckner et al., 1995). Sementara itu, semburan radio diindikasikan oleh peningkatan intensitas sinyal radio pada rentang frekuensi tertentu. Dalam rentang waktu tertentu, peningkatan sinyal ini bergeser dari frekuensi tinggi ke frekuensi yang lebih rendah dan disebut sebagai pergeseran frekuensi (*frequency drift*). Kemunculan sinyal dan kecepatan pergeseran frekuensi ini menunjukkan ketinggian dan kecepatan gelombang kejut penghasil semburan radio tipe II (Roberts, 1959; Nelson and Melrose, 1985). Dengan menganalisis kesesuaian kemunculan CME dari koronagraf dan semburan radio tipe II dari spektrograf, hubungan CME dan semburan radio tipe II dapat dibuktikan.

Penentuan hubungan fisis CME dan semburan radio tipe II seringkali didasarkan atas kecepatan CME dan kecepatan gelombang kejut yang masing-masing diturunkan langsung dari koronagraf dan spektrograf (Classen dan Aurass, 2002; Cho et al., 2006). Namun, penurunan kecepatan CME melalui koronagraf LASCO dapat saja tidak cukup merepresentasikan kecepatan CME sebenarnya karena tampilan rekaman LASCO yang hanya dua dimensi. Hal ini menyebabkan faktor geometri struktur CME tidak sempurna karena CME yang mengarah ke kamera LASCO diproyeksikan ke bidang langit atau bidang gambar (Raouafi et al., 2004). Artinya, setiap kali analisis ketinggian CME dilakukan melalui gambar yang berurutan, faktor koreksi geometri semakin menumpuk. Akibatnya, nilai kecepatan CME yang diperoleh menjadi tidak sesuai.

Penentuan keterkaitan dengan menggunakan perbandingan ketinggian, seperti yang akan dijelaskan di makalah ini, bermaksud untuk mempersingkat tahap penentuan kecepatan dan memperbesar tingkat analisis kinematis *shock* dan CME di fase awal kemunculannya. Jika kamera LASCO hanya dapat menganalisis gejala eruptif dari ketinggian 1,5 Rs (jari-jari Matahari), maka penurunan kecepatan dengan analisis *shock*-CME dapat menjangkau hingga ketinggian efektif yang lebih rendah (1 Rs). Dengan begitu, tingkat analisis keterkaitan CME dan semburan radio tipe II terhadap flare juga dapat lebih maksimal. Untuk keterkaitan semburan radio tipe II dengan flare, pendekatan yang digunakan adalah perbandingan energi kinetik berdasarkan kecepatan.

2. Metodologi dan Pemilihan Data

Untuk menghindari terlalu banyaknya faktor koreksi dalam penurunan kecepatan CME dan gelombang kejut, maka teknik yang digunakan di sini adalah melalui penentuan ketinggian awal CME dan gelombang kejut. Dengan membandingkan ketinggian awal gelombang kejut dan ketinggian awal CME, serta mempertimbangkan rentang waktu kemunculan semburan radio tipe II dan CME, maka dapat diperoleh kecepatan penjaralan material yang terlontar dari Matahari (selanjutnya disebut *shock*-CME). Kecepatan *shock*-CME ini dibuat atas anggapan bahwa gelombang kejut (*shock*) menjalar dan tampil pada koronagraf sebagai muka CME yang tampak sebagai cahaya putih. Asumsi ini mengikuti model CME *front* atau *bow-shock* yang menganggap bahwa gelombang kejut muncul bersamaan dengan muka CME (Classen dan Aurass, 2002).

Metode yang digunakan di sini adalah studi kasus dengan menggunakan data semburan radio tipe II yang berasosiasi dengan CME dan flare secara temporal, untuk kemudian mengujinya secara kinematis. Untuk memudahkan analisis yang dilakukan, maka data dipilih untuk nilai-nilai ekstrem pada setiap komponennya. Penyeleksian awal digunakan untuk kejadian yang menimbulkan badai geomagnet besar di Bumi ($Dst \leq 100$) pada rentang waktu tahun 2001 hingga 2007. Pertimbangan ini dilakukan agar dapat mempermudah analisis berikutnya apabila diperlukan. Untuk semburan radio tipe II, dipilih data semburan radio tipe II yang sinyalnya tampak jelas. Sedangkan untuk pertimbangan perbandingan energi yang dilepaskan, data flare yang digunakan dipilih dari peristiwa flare yang memiliki kelas flare X dan M.

Dengan kriteria penyeleksian data tersebut, diperoleh tujuh data peristiwa pasangan semburan radio tipe II, CME, dan flare yang dapat dilihat pada Tabel 2.1. Untuk keperluan penentuan kemunculan awal, maka dipilih data semburan radio dari stasiun HIRAISSO (<http://sunbase.nict.go.jp/solar/denpa/index.html>) karena rentang frekuensinya sangat lebar yaitu 25-2500 MHz, sehingga memungkinkan untuk mengetahui kemunculan gelombang kejut hingga ketinggian yang paling rendah (Kondo, et al., 1994). Sedangkan data CME yang digunakan adalah data CME dari instrumen LASCO yang dipasang di satelit SOHO (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html). Untuk data flare, digunakan data kelas X-flare dari GOES untuk kejadian yang berasosiasi dengan semburan radio tipe II dan CME (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsolar/flareshtml#xray>).

Data yang dipergunakan dari HIRAISO adalah data waktu kemunculan dan frekuensi awal sinyal semburan radio tipe II. Dengan menggunakan persamaan model Newkirk untuk kerapatan elektron (N) di korona, frekuensi dan ketinggian gelombang kejut dari permukaan Matahari (H_{rb}) saat sinyal pertama muncul dapat diperkirakan melalui persamaan (2.1) (Newkirk, 1961):

$$H_{rb} = \frac{4,32}{\log \frac{N}{N_0}} \quad (2.1)$$

Dengan nilai N_0 sebesar 42×10^4 . Nilai ini adalah sepuluh kali lipat nilai konstanta model Newkirk normal untuk keadaan matahari tenang (*1-fold Newkirk model*). Sedangkan di sini digunakan asumsi yang lebih sesuai untuk keadaan kerapatan korona di daerah aktif (*10-fold Newkirk Model*) (Pohjolainen et al., 2008; Mann, et al., 1999)

Selanjutnya, data ketinggian gelombang kejut dibandingkan dengan data ketinggian kemunculan CME (H_{CME}). Dari kedua data ini, selisih ketinggian (ΔH) saat kemunculan gelombang kejut dan CME dapat diketahui. Dengan mengetahui selisih waktu (Δt) kemunculan semburan radio tipe II dan kemunculan CME, maka kecepatan *shock*-CME dapat ditentukan. Kecepatan yang didapatkan ini kemudian dibandingkan dengan kecepatan penurunan frekuensi semburan radio agar dapat dilihat kesesuaiannya. Jika terdapat kesesuaian antara kedua kecepatan ini, maka berarti kecepatan *shock*-CME kemungkinan merupakan proses fisis yang direpresentasikan oleh sinyal semburan radio.

Untuk melakukan analisis keterkaitan *shock*-CME dengan flare, pendekatan perbandingan energi lebih tepat untuk dilakukan. Hal ini dikarenakan klasifikasi flare didasarkan pada banyaknya fluks gelombang elektromagnet yang sampai ke Bumi. Tingkat fluks ini akan sebanding dengan kekuatan flare dan sebanding juga dengan tingkat energi yang dipancarkan oleh suatu peristiwa flare. Energi *shock*-CME ini diturunkan dari kecepatan *shock*-CME dengan menggunakan persamaan energi kinetik. Namun, karena tidak diketahuinya massa material yang terbawa dari sumber gelombang kejut, maka dipergunakan data kerapatan elektron (N) dari persamaan (2.2):

$$N = \left(\frac{f}{8,98} \right)^2 \quad (2.2)$$

Tabel 2.1. Data pilihan untuk peristiwa semburan radio tipe II, CME, dan flare yang berasosiasi secara temporal.

No	Tanggal (dd/mm/ yyyy)	Flare		Semburan Radio Tipe II				CME
		Start	Kelas	Start	End	Frekuensi awal (MHz)	Frekuensi akhir (MHz)	Start
1	06/04/2000	02:18:00	M 1.8	02:22:00	02:30:00	200	40	02:54:00
2	10/04/2001	05:06:00	X 2.3	05:13:00	05:30:00	700	80	05:30:00

No	Tanggal (dd/mm/ yyyy)	Flare		Semburan Radio Tipe II				CME
		Start	Kelas	Start	End	Frekuensi awal (MHz)	Frekuensi akhir (MHz)	Start
3	21/05/2002	21:20:00	M 1.5	21:25:00	21:40:00	200	30	21:50:00
4	17/06/2003	22:27:00	M 6.8	22:40:00	22:55:00	1000	50	23:18:14
5	26/10/2003	05:57:00	X 1.2	06:13:00	06:26:00	2000	500	06:54:30
6	10/11/2004	01:59:00	X 2.5	02:05:00	02:15:00	1500	180	02:26:00
7	14/12/2006	21:07:00	X 1.5	22:05:00	22:13:00	500	80	22:30:00

3. Hasil dan Diskusi

Kerapatan elektron pada persamaan 2.2 dianggap sebanding dengan massa material yang terbawa sehingga besar energi dapat didekati dari persamaan energi kinetik. Energi ini bukanlah energi sebenarnya dan hanya merupakan energi pendekatan (energi ekuivalen). Hasil-hasil perhitungan kecepatan dan energi dari analisis kinematis semburan radio tipe II dan CME dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gradien penurunan frekuensi semburan radio tipe II untuk ketujuh peristiwa terpilih memberikan pola yang hampir serupa dengan laju *shock*-CME yang diturunkan dari ketinggian gelombang kejut dan CME (Gambar 3.1). Nilai yang berbeda tampak pada kejadian tanggal 26/10/2003. Hal ini diduga karena sinyal semburan radio peristiwa tersebut tidak menunjukkan akhir yang jelas sehingga kemungkinan terjadi kesalahan dalam penentuan gradiennya. Namun, untuk kejadian lainnya pola kedua grafik ini sangat mirip meskipun diturunkan dari data yang berbeda. Kesesuaian ini dapat berarti bahwa sinyal semburan radio tipe II berasal dari gelombang kejut dari peristiwa flare yang kemudian tampak beberapa waktu kemudian pada ketinggian yang jauh berbeda sebagai CME dalam gambar LASCO.

Tabel 3.1. Hasil perhitungan ketinggian semburan radio, kecepatan *shock*-CME, dan Energi ekuivalen dari ketujuh peristiwa yang terpilih.

No	Tanggal (dd/mm/yyyy)	Semburan Radio tipe II	CME	Kecepatan <i>shock</i> -CME (km/detik) ³	Pergeseran frekuensi (MHz/menit) ⁴	Energi kinetik ekivalen ⁵
		Ketinggian awal (Rs) ¹	Ketinggian awal (Rs) ²			
1	06/04/2000	1.4	2.81	509	20	1.3 × 10 ¹²
2	10/04/2001	1.03	2.84	1229	36.5	9.2 × 10 ¹⁵
3	21/05/2002	1.4	2.76	628	11.3	2 × 10 ¹⁵
4	17/06/2003	0.97	7.06	1849	63.3	4.2 × 10 ¹⁶
5	26/10/2003	0.85	5.18	1224	115.4	7.4 × 10 ¹⁶
6	10/11/2004	0.9	6.13	2891	132	2.3 × 10 ¹⁷
7	14/12/2006	1.12	3.37	1046	52.5	3.4 × 10 ¹⁵

¹ Ketinggian H_{rb} diturunkan dari persamaan 2.1 (dalam jari-jari Matahari)

² Ketinggian H_{CME} diperoleh dari data satelit SOHO (dalam jari-jari Matahari)

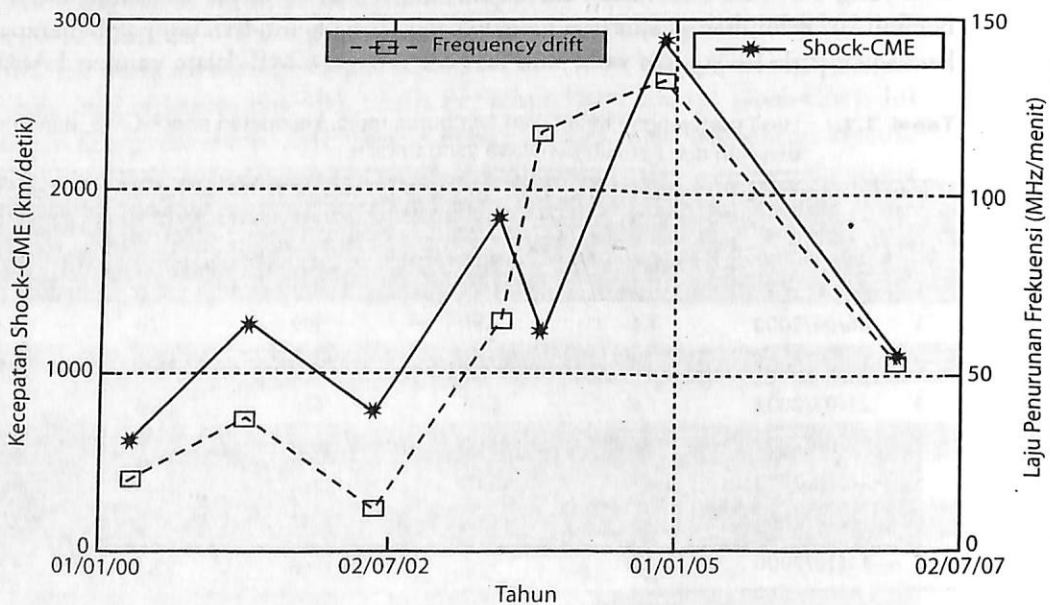
³ Kecepatan diturunkan dari selisih ketinggian dan selisih waktu kemunculan awal semburan radio dan CME.

⁴ Pergeseran frekuensi (*frequency drift*) diperoleh dengan pendekatan linier dari gradien kemiringan perubahan frekuensi.

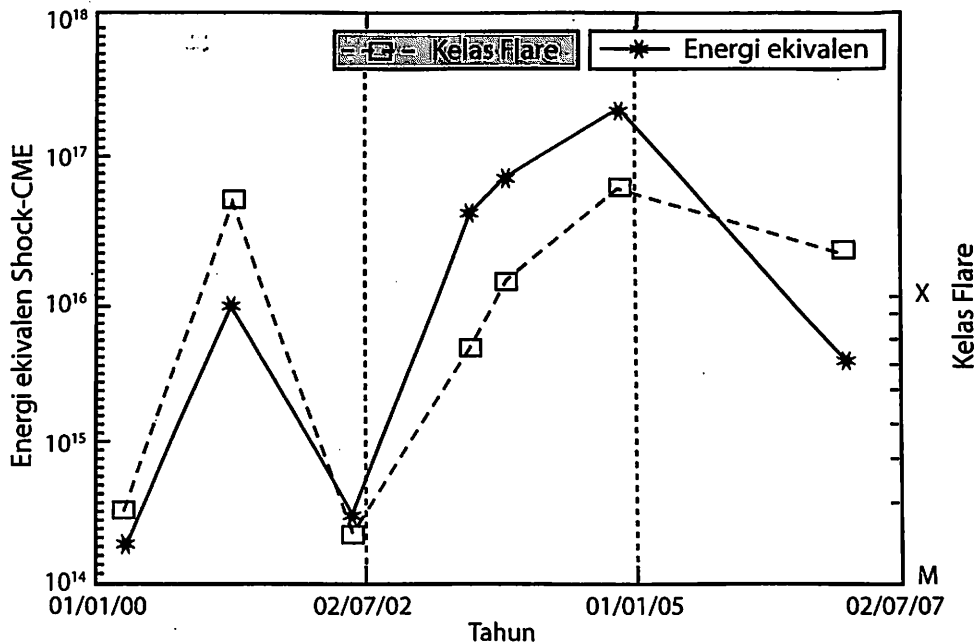
⁵ Energi kinetik ekivalen diturunkan berdasarkan kecepatan *shock-CME* dan kerapatan elektron untuk ketinggian awal gelombang kejut (dalam satuan MJoule/kg cm³).

Untuk penentuan keterkaitan dengan flare, grafik tingkat energi ekivalen dan kelas flare untuk ketujuh kejadian terpilih ditampilkan dalam Gambar 3.2. Dari grafik ini dapat terlihat pola yang serupa meskipun tidak sepenuhnya sama. Secara keseluruhan, hal itu mengindikasikan bahwa energi *shock-CME* kemungkinan besar benar-benar berasosiasi dengan kejadian flare yang mendahuluinya. Analisis kinematika penjaralan dari gelombang kejut di ketinggian korona yang relatif rendah hingga ke CME di ketinggian yang jauh lebih tinggi ini memperkuat asosiasi temporal antara flare, semburan radio tipe II, dan CME.

Mekanisme munculnya semburan radio tipe II dan keterkaitannya dengan flare dan CME dapat dijelaskan sebagai berikut: Flare di kromosfer menyebabkan munculnya gelombang kejut yang diindikasikan oleh munculnya semburan radio tipe II. Gelombang kejut ini kemungkinan memicu terjadinya CME di korona yang ditunjukkan oleh kemunculan CME di kamera LASCO. Kesesuaian grafik untuk parameter-parameter kinematik yang ditunjukkan oleh ketujuh peristiwa terpilih seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.1 dan Gambar 3.2 memperkuat mekanisme tersebut.



Gambar 3.1. Grafik perbandingan kecepatan *shock-CME* dan laju penurunan frekuensi semburan radio tipell untuk tujuh peristiwa terpilih.



Gambar 3.2. Grafik perbandingan energi kinetik ekivalen (dalam MJoule/kg cm³) dan kelas Flare untuk tujuh peristiwa terpilih. Kedua sumbu Y dibuat dalam skala logaritmik.

4. Kesimpulan

Dengan hasil perhitungan dan pengujian terhadap tujuh data terpilih mengenai semburan radio tipe II, CME, dan flare, dapat disimpulkan bahwa selain berasosiasi secara temporal, peristiwa semburan radio tipe II, CME, dan flare juga berasosiasi secara kinematis berdasarkan penurunan kecepatannya dari ketinggian spasial dan energi kinetiknya. Keterkaitan semburan radio tipe II dan CME terlihat dari kesesuaian pola grafik kecepatan untuk peristiwa yang terpilih. Hasil ini juga menunjukkan bahwa gelombang kejut yang direpresentasikan oleh semburan radio tipe II berasal dari proses yang sama dengan CME yang muncul dan terdeteksi beberapa saat kemudian.

Peristiwa flare yang terdeteksi lebih dulu dibandingkan semburan radio tipe II dan CME merupakan bagian penting dari proses awal kejadian ledakan di Matahari yang kemudian mengakibatkan terjadinya semburan radio tipe II dan CME. Besar energi yang dipancarkan oleh suatu flare menentukan tingkat energi gelombang kejut dan laju partikel CME. Hal ini dapat diketahui dari kesesuaian grafik antara kelas flare dan energi kinetik *shock*-CME.

Peninjauan kinematis lebih lanjut terhadap ketiga peristiwa ini perlu dilakukan dengan melibatkan data yang lebih banyak. Adanya model fisis yang baik tentunya sangat diperlukan untuk menghasilkan pemahaman yang lebih baik juga tentang keterkaitan antar peristiwa. Titik berat analisis berikutnya sebaiknya diarahkan pada tantangan untuk menjawab adanya peristiwa yang tidak saling muncul saat salah satu di antara semburan radio tipe II, CME, dan flare terjadi.

Daftar Pustaka

- Brueckner, G. E., Howard, R. A., Koomen, M. J., Korendyke, C. M., Michels., D. J., Moses, J. D., Socker, D. G., Dere, K. P., Lamy, P. L., Llebaria, A., Bout, M. V., Schwenn, R., Simnett, G. M., Bedford, D. K., Eyles, C. J., 1995, *The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO)*, *Solar Physics* 162, p.357-402.
- Cho, K. S., Lee, J., Moon, Y.-J., Dryer, M., Bong, S.-C., Kim, Y.-H., dan Park, Y. D., 2006, *A Study of CME and Type II Shock Kinematics Based on Coronal Density Measurement*, *Astronomy & Astrophysics Manuscript*.
- Classen, H. T., Aurass, H., 2002, *On The Association Between Type II Radio Bursts And CMEs*, *Astronomy & Astrophysics*, 384: 1098-1106.
- Kondo, T., Isobe, T., Igi, S., Watari, S., Tokumaru, M., 1994, *The New Solar Radio Observation System at Hiraiso*, Review of the Communications Research Laboratory, vol. 40, p. 85.
- Mahrous, A., Shaltout, M., Beheary, M. M., Mawad, R., Youssef, M., 2009, *CME-flare Association During the 23rd Solar Cycle*, *Advances in Space Research* Vol. 43, p.1032-1035.
- Mann, G., Jansen, F., MacDowall, R.J., Kaiser, M. L., Stone, R. G., 1999, *A Heliospheric Density Model and type III Radio Burst*, *Astronomy and Astrophysics*, 348, p. 614-620.
- Nelson, G. J., Melrose, D. B., 1985, "Type II Burst" in *Solar Radiophysics*, ed. D. J. McLean and N. R. Labrum, pp. 333-359.
- Newkirk, Gordon, Jr., 1961, *The Solar Corona in Active Regions and The Thermal Origin of The Slowly Varying Component of Solar Radio Radiation*, *Astrophysical Journal*, vol. 133, p. 983.
- Pohjolainen, S., Hori, K., Sakurai, T., 2008, *Radio Burst Associated with Flare and Ejecta in the 13th July 2004 Event*, *Solar Physics*, vol. 253, p.291-303.
- Raouafi, N.-E., Mancuso, S., Kolanki, S.-K., Inhester, B., Mierla, M., Stenborg, G., Delaboudiniere, J. P., Benna, C., 2004, *Shock Wave Driven by an Expanding System of Loops*, *A&A* 424, 1039-1048.
- Roberts, J. A., 1959, *Solar Radio Burst of Spectral Type II*, *Australian J. Physics.*, 12, 327.
- Yashiro, S., Gopalswamy, N., 2008, *Statistical Relationship Between Solar Flares and Coronal Mass Ejections*, *Proceedings of the International Astronomical Union*, 4:233-243 Cambridge University Press.