

MATAHARI SEBAGAI SUMBER CUACA ANTARIKSA

Neflia

Peneliti Bidang Matahari dan Antariksa, LAPAN
Neflia103@yahoo.com

RINGKASAN

Kata cuaca antariksa sangat erat hubungannya dengan perubahan yang terjadi pada matahari, magnetosfer, ionosfer dan atmosfer. Matahari sebagai sumber energi di lingkungan antariksa memberikan pengaruh terbesar pada cuaca antariksa. Energi matahari yang sampai ke bumi dapat berasal dari angin matahari, flare dan CME. NOAA telah membuat skala mengenai besarnya energi radiasi, efek pada wahana antariksa dan manusia, frekuensi gangguan selama 1 siklus matahari dan lama waktu gangguan untuk mengetahui kondisi cuaca antariksa saat itu.

1 PENDAHULUAN

Cuaca antariksa merupakan perubahan kondisi matahari, magnetosfer, ionosfer dan atmosfer yang mungkin mempengaruhi *space-borne* atau sistem teknologi landas bumi dan pada kasus yang terparah, membahayakan kehidupan manusia. Cuaca antariksa selalu mengalami perubahan. Matahari sebagai sumber energi di lingkungan antariksa sangat erat hubungannya dengan perubahan cuaca antariksa ini. Energi yang dipancarkan matahari dapat berupa radiasi EM (gelombang radio, infra merah, cahaya, UV, sinar-X) dan partikel bermuatan. Kedua sumber energi ini dapat berasal dari proses flare, pelontaran massa elektron (CME) dan angin matahari. Radiasi dan partikel bermuatan selanjutnya akan berinteraksi dengan medan magnet bumi, ionosfer dan atmosfer, yang dapat mengakibatkan gangguan pada wahana antariksa yang sedang mengorbit dan dapat membahayakan astronot.

Kondisi cuaca antariksa serta efeknya pada lingkungan antariksa merupakan suatu tantangan untuk membuat pemodelan dan prediksi cuaca antariksa. Pengetahuan yang mendalam mengenai aktivitas matahari merupakan dasar pemahaman mengenai cuaca antariksa. Saat ini pemodelan dan prediksi cuaca antariksa di Eropa dan Amerika sudah sangat maju, walaupun belum memiliki keakuratan yang tinggi. Hal ini disebabkan karena peristiwa flare dan CME biasanya terjadi secara spontan.

Dengan tersedianya data matahari dari satelit SOHO dan satelit ACE, seperti citra UV aktivitas matahari yang menunjukkan peristiwa flare dan citra koronograf CME, pemodelan yang lebih akurat dapat dihasilkan. Sebagai salah satu cara untuk mengantisipasi efek aktivitas matahari dan aktivitas geomagnetik pada wahana antariksa dan astronot, NOAA memberikan skala kondisi cuaca antariksa, efeknya pada wahana antariksa dan manusia serta lamanya kondisi cuaca antariksa itu berlangsung. Pemahaman yang lebih mendalam mengenai matahari diharapkan dapat memberikan prediksi awal kondisi cuaca antariksa.

2 MATAHARI SEBAGAI SUMBER CUACA ANTARIKSA

2.1 Angin Matahari

Antariksa antara matahari dan bumi tidaklah vakum melainkan berisi plasma magnetik yang renggang berupa campuran dari proton dan elektron yang dilepaskan matahari. Plasma ini disebut dengan angin matahari. Angin matahari merupakan perluasan (*extension*) korona matahari hingga jarak heliosentrik, yang terjadi akibat perbedaan tekanan yang sangat besar antara plasma yang sangat panas dan dasar korona serta medium antar bintang.

Angin matahari membawa medan magnet ke heliosfer yang disebar hingga planet keluar. Di bawah ini merupakan karakteristik angin matahari yang diperoleh dari pengamatan satelit.

Tabel 2-1: KARAKTERISTIK RATA-RATA ANGIN MATAHARI DI ORBIT BUMI (PROLSS, 2006)

Komposisi	$\approx 96\% \text{ H}^+, 4\% (0-20\%) \text{ He}^{++}, \text{ e}^-$
Kerapatan	$\approx 6 (0,1 - 100) \text{ cm}^{-3}$
Kecepatan	$\approx 470 (170 - 2000) \text{ km/s}$
Fluks proton	$\approx 3 \times 10^{12} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Fluks momentum	$\approx 2 \times 10^{-9} \text{ N/m}^2$
Fluks energi	$\approx 0,5 \text{ mW/m}^2$
Temperatur	$\approx 10^5 (3500 - 5 \times 10^5) \text{ K}$
Kecepatan suara plasma	$\approx 50 \text{ km/s}$
Kecepatan acak	$e \approx 2 \times 10^5 \text{ km/s}, p \approx 46 \text{ km/s}$
Energi partikel	$E_p \approx 1,1 \text{ keV (energi aliran)}, E_e \approx 13 \text{ eV (energi termal)}$
Garis edar bebas rata-rata	$\approx 10^8 \text{ km}$
Waktu kolisi Coulomb	$\approx 20 \text{ hari}$

Berdasarkan kecepatannya angin matahari dibagi menjadi dua, yaitu angin matahari berkecepatan tinggi dan angin matahari berkecepatan rendah. Angin matahari berkecepatan tinggi berasal dari lubang korona, bagian gelap korona yang didominasi oleh garis medan. Kecepatan angin ini berkisar antara 400 km/s hingga 800 km/s, kerapatan rata-rata sekitar 3 ion/cm³ pada 1 AU, termasuk di dalamnya total partikel matahari yang hilang, sekitar $1,3 \times 10^{31}$ /s dan fluks partikel rata-rata $2 \times 10^{12} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Temperatur elektron pada jenis angin ini berkisar $1 \times 10^5 \text{ K}$ sedangkan temperatur proton $2 \times 10^5 \text{ K}$ (Kallenrode, 2004).

Angin matahari berkecepatan rendah memiliki kecepatan berkisar antara 250 km/s hingga 400 km/s, dengan kerapatan 8 ion/cm³ pada 1 AU, dan kerapatan fluks sekitar dua kali angin matahari berkecepatan tinggi. Selama matahari minimum, atau angin matahari berasal dari daerah dekat lapisan arus di ekuator heliomagnetik sedangkan selama matahari maksimum angin matahari berkecepatan rendah ini berasal dari daerah aktif di sabuk aliran. Dibandingkan dengan angin matahari berkecepatan tinggi, angin matahari berkecepatan rendah berubah-ubah dan bergolak, sering terdiri dari struktur awan magnet dan *shocks* dalam skala besar. Selain itu temperatur elektron dan ionnya sangat rendah, yaitu sekitar $1 \times 10^3 \text{ K}$ (kallenrode, 2004).

2.2 Flare

Flare matahari merupakan ledakan berkonsentrasi tinggi yang melepaskan energi di

atmosfer matahari yang terlihat sebagai kilatan tiba-tiba dan tak berlangsung lama di suatu daerah di kromosfer. Flare dibedakan berdasarkan energi yang dilepaskan, sesuai dengan efek yang dihasilkan pada lingkungan bumi. Energi total yang dilepaskan oleh flare merentang dari 10^{21} J hingga 10^{25} J selama tiga proses flare, yaitu *preflare*, kilatan (*flash*) dan fase utama. Fase awal (*preflare*) dikarakteristikkan dengan peningkatan emisi *soft x-ray* dan sinar tampak. Fase *flash* dimulai dengan pemanasan plasma korona dan percepatan partikel. Pemanasan plasma menyebabkan peningkatan emisi *soft x-rays* sedangkan percepatan partikel membangkitkan emisi *hard x-ray*, sinar gamma, sinar mikro, sinar UV. Selama fase *flash* terdapat semburan gelombang radio akibat aliran partikel. Luas spasial flare terus meluas hingga flare mencapai intensitas maksimum. Fase utama dikarakteristikkan dengan penurunan secara perlahan menuju ke tingkat *preflare*.

Selama masa proses flare, matahari melepaskan berbagai jenis radiasi, antara lain *soft x-rays*, EUV dan sinar tampak, *hard x-ray*, semburan gelombang mikro, sinar gamma serta beberapa tipe semburan radio (Kallenrode, 2004; Schwenn, 2007). *Soft x-rays* merupakan radiasi plasma flare termal yang mengisyaratkan pemanasan tiba-tiba dari plasma korona hingga temperatur beberapa 10^7 K . Radiasi ini terjadi karena *kontinum bremsstrahlung* dan ion. Selain itu radiasi ini merupakan radiasi paling banyak dipancarkan selama proses flare. Radiasi termal lainnya yang dipancarkan selama masa *preflare*

yaitu sinar tampak dan sinar UV. Emisi UV disebabkan oleh pemanasan pada lapisan transisi flare sedangkan emisi sinar tampak disebabkan oleh pemanasan pada lapisan kromosfer matahari. Emisi sinar tampak yang paling menonjol adalah H α .

Hard x-rays biasanya teramati beberapa menit setelah semburan *soft x-rays* dengan energi dari beberapa keV hingga beberapa MeV. Radiasi ini disebabkan oleh percepatan elektron hingga energi tinggi pada permulaan flare yang kemudian menumbuk atom di lapisan lebih rapat yang terletak lebih rendah dan menghasilkan *continuum bremsstrahlung* dalam bentuk *hard x-rays*. Populasi elektron ini juga berkonjugasi dengan medan magnet kromosfer dan menghasilkan radiasi *gyro-synchrotron* dalam bentuk gelombang mikro. Spektrum semburan gelombang mikro ini berupa pita kontinu yang lebar dengan intensitas puncak beberapa puluh GHz untuk peristiwa flare yang paling hebat.

Percepatan proton selama fase *flash* dengan energi proton melebihi 20 keV dapat membangkitkan emisi sinar gamma. Terdapat paling sedikit 6 proses fisis yang menyumbang pada emisi sinar gamma, antara lain emisi *kontinuum bremsstrahlung* elektron, emisi garis *de-excitation* nuklir, emisi garis neutron, emisi garis penghilang *positron-elektron* pada 0,511 MeV, radiasi *pion-decay* pada >50 MeV (pion dibangkitkan dimanapun proton dipercepat hingga rentang energi 1 GeV), dan pembentukan neutron.

Aliran partikel melalui plasma korona selama fase *flash* juga membangkitkan radiasi berupa semburan radio. Semburan radio matahari merupakan semburan metrik. Panjang gelombang semburan ini dalam rentang meter, sedangkan semburan radio di antariksa antar planet merupakan semburan kilometrik. Semburan radio diklasifikasikan sesuai dengan pergeseran frekuensinya dan kecepatan pergeseran frekuensinya. Tipe semburan radio tersebut antara lain semburan radio tipe I, semburan tipe II, semburan tipe III, semburan tipe IV dan

semburan tipe II kilometrik. Semburan radio tipe I merupakan emisi radio kontinu dari matahari yang pada dasarnya merupakan derau radio matahari normal. Derau ini meningkat pada fase akhir flare.

Semburan radio tipe II terlihat sebagai garis emisi radio yang bergeser dari frekuensi tinggi ke frekuensi rendah dalam spektrum radio. Frekuensi emisi ini menurun dari beberapa ratus MeV hingga sekitar 2 keV atau bahkan lebih kecil dalam masa beberapa puluh menit. Panjang gelombang radiasi ini dalam rentang meter. Diduga semburan radio tipe II disebabkan oleh elektron yang dipercepat di depan *coronal shock* yang menjalar keluar. Penurunan frekuensi berhubungan dengan gerak dari gelombang kejut melalui profil kerapatan radial plasma.

Semburan radio tipe III terjadi di awal fase *flash* berupa emisi gelombang radio dengan frekuensi beberapa MeV yang menurun dengan cepat hingga beberapa keV. Semburan ini dibangkitkan dalam 2 proses, yaitu percepatan elektron di flare matahari hingga energi beberapa keV yang mengalir keluar dari matahari dan membangkitkan osilasi plasma secara lokal, sepanjang perjalanannya dari korona ke heliosfer, dan perubahan osilasi plasma (gelombang langmuir) menjadi radiasi EM dengan interaksi gelombang-gelombang nonlinier.

Semburan radio tipe IV mencakup spektrum kontinu dengan frekuensi di bawah 200 MeV, yaitu dalam rentang panjang gelombang meter. Pada semburan tipe ini tidak terjadi pergeseran frekuensi. Kadang-kadang sumber semburan ini terlihat menjauh dari matahari. Biasanya semburan radio tipe IV menyertai semburan gelombang mikro berenergi tinggi.

Semburan radio kilometrik tipe II terlihat sebagai pergeseran frekuensi garis emisi dari 100 kHz hingga beberapa puluh kHz dalam waktu beberapa hari. Semburan ini disebabkan oleh elektron yang dipercepat di gelombang kejut antar planet dalam perjalanannya dari matahari ke antariksa.

Tabel 2-2: KARAKTERISTIK DASAR CME (BOTHMER DAN DANGLIS, 2006; SCHWENN, 2006)

Kecepatan	300 – 3000 km/s
Massa	10^{10} - 10^{13} kg
Energi kinetik	10^{23} – 10^{24} J
Energi total	10^{27} erg - 10^{33} erg
Lebar angular	$\sim 20^\circ$ - 120°
Frekuensi	~ 1 - ~ 4 (solar minimum – solar maksimum)

2.3 Coronal Mass Ejection (CME)

CME merupakan perubahan yang dapat diamati pada struktur korona yang terjadi pada skala waktu beberapa menit dan beberapa jam dan meliputi pemunculan (dan gerak keluar matahari) ciri yang baru, diskrit, terang dan cahaya putih dari sudut pandang *coronagraph* (Schwenn, 2006).

CME dikarakteristikan dengan kecepatan, lebar angular dan sudut posisi pusat di bidang antariksa (Tabel 2-2).

Kecepatan rata-rata CME 400 km/s, lebar angular rata-rata sekitar 50 derajat, massa total rata-rata $1,4 \times 10^{12}$ kg, dan energi total rata-rata $2,6 \times 10^{30}$ erg (Schwenn, 2006).

CME dengan kecepatan sangat tinggi seringkali membawa awan flux magnet matahari dan plasma dalam skala besar ke antariksa yang dapat menimbulkan magnetisasi aliran plasma. Magnetisasi aliran plasma akibat CME ini biasanya disebut ICME (*interplanetary counterparts of CME*). ICME biasanya merupakan pemicu terjadinya badai geomagnetik.

3 LINGKUNGAN ANTARIKSA

Matahari mempengaruhi lingkungan antariksa dalam berbagai macam cara dan skala waktu yang berbeda. Peristiwa yang terjadi di matahari biasanya menyebabkan gangguan pada hubungan sistem magnetosfer-ionosfer-atmosfer. Radiasi matahari dan partikel bermuatan yang dipancarkan ketika proses flare dan CME bersama-sama dengan angin matahari serta IMF (*Interplanetary magnetic field*) yang dibawa angin matahari menuju bumi memberikan perubahan pada aktivitas geomagnetik, serta perubahan pada ionosfer dan atmosfer.

Angin matahari yang mengalir dari matahari ke bumi akan berinteraksi dengan medan magnetik dan membentuk *bow shock* yang memperlambat, memantulkan dan memanaskan plasma. Pada aliran subsonik pusat kejut (*post-shock subsonic flow*), gradien tekanan menghasilkan pemantulan selanjutnya di sekitar magnetosfer. Tekanan angin matahari pada batas magnetosfer ini menentukan bentuk dan ukuran magnetosfer, sedangkan tekanan tangensial menentukan besarnya aliran energi ke dalam magnetosfer. IMF yang dibawa angin matahari mengendalikan variasi temporal kecepatan rekoneksi yang menimbulkan subbadai magnetosfer. Ketika IMF ke arah selatan selama masa pelontaran massa korona antar planet, terjadi peningkatan energi di plasma magnetosfer yang menimbulkan badai magnetosfer.

Di samping interaksi dengan angin matahari, matahari juga mempengaruhi lingkungan bumi melalui radiasi EM yang mencapai bumi lebih cepat daripada aliran angin matahari. Radiasi yang dipancarkan matahari selama proses flare sebagian besar akan diabsorpsi oleh atmosfer dan menyebabkan terjadinya pemanasan dan pengembangan atmosfer sehingga kerapatan atmosfer meningkat. Peningkatan kerapatan atmosfer merupakan salah satu faktor gangguan yang dialami satelit orbit rendah, karena peningkatan kerapatan atmosfer merupakan salah satu indikator peningkatan hambatan atmosfer.

Sinar-X dan sinar UV dapat menembus atmosfer bumi hingga ketinggian 70 km, bahkan sinar UV dapat menembus lapisan ionosfer hingga ketinggian 25 km. Hal ini dapat membahayakan astronot dan sistem wahana antariksa, walaupun kerusakan langsung dari sinar-X dan

sinar UV tidak banyak dilaporkan. Hal ini kemungkinan disebabkan kecilnya intensitas radiasi tersebut. Sinar-X dan sinar UV memiliki daya penetrasi dan pengionisasi yang tinggi yang dapat menyebabkan ketidakteraturan dan ketidakmerataan partikel di ionosfer. Ketidakteraturan ini merupakan gangguan pada ionosfer. Selain itu gangguan pada lapisan ionosfer juga dapat disebabkan oleh semburan radio yang dapat mengganggu propagasi gelombang HF.

Struktur medan magnet, medan yang bervariasi, kerapatan plasma pada daerah selubung dan kecepatan angin matahari merupakan pemicu yang efektif aktivitas geomagnetik. Sementara medan selatan (*southward field*) ICME cenderung memicu aktivitas arus cincin. Medan dan kerapatan yang lebih bervariasi pada daerah selubung memicu aktivitas pada daerah aurora lintang tinggi. Karena ICME paling sering pada matahari maksimum daripada matahari minimum, ICME memperbesar aktivitas geomagnetik 11 tahun. Hampir sama dengan ICME, tiap struktur angin matahari meliputi medan antar planet sisi selatan berintensitas tinggi yang berlangsung lama memicu aktivitas badai magnet dengan berbagai macam tanda pada sistem magnetosfer-ionosfer.

4 SKALA CUACA ANTARIKSA

NOAA *Space Weather* (www.sec.noaa.gov) memperkenalkan skala untuk mengetahui kondisi cuaca antariksa saat ini dan cuaca antariksa di masa yang akan datang serta kemungkinan efek yang ditimbulkannya pada sistem dan manusia. Skala ini menggambarkan 3 (tiga) tipe gangguan lingkungan antariksa, yaitu badai geomagnetik yang diakibatkan oleh hembusan angin matahari pada bumi yang mengakibatkan gangguan pada Medan geomagnetik, badai radiasi matahari yang diakibatkan oleh peningkatan partikel berenergi yang menyebabkan meningkatnya tingkat radiasi dan *radio blackout* yang diakibatkan oleh emisi dari matahari yang menyebabkan gangguan pada ionosfer. Pada tulisan ini skala yang dibahas

hanya badai matahari. Efek badai matahari yang ditimbulkan pada manusia dan sistem satelit dibagi menjadi 5 kategori, yaitu S1 (*minor*), S2 (*moderate*), S3 (*strong*), S4 (*severe*), dan S5 (*extreme*).

Pada level S1, dengan fluks magnetik 10 MeV operasi satelit dan sistem biologi tidak terganggu. Kemungkinan memberikan pengaruh pada radio HF di daerah kutub. Peristiwa badai radiasi matahari pada level ini diperkirakan 50 kejadian tiap siklus.

Pada level S2, fluks partikel yang diperoleh dari pengamatan berkisar 10^2 MeV. Pada level ini SEU (*single-event upsets*) mungkin terjadi pada sistem satelit. Propagasi HF melalui daerah kutub dan navigasi di lokasi kutub kemungkinan dipengaruhi oleh badai radiasi matahari. Peristiwa badai radiasi matahari pada level ini diperkirakan 25 kejadian tiap siklus.

Pada level S3 fluks ion yang diterima oleh manusia terutama astronot jauh lebih besar, yaitu 10^3 MeV, sehingga astronot diajarkan untuk menghindari bahaya radiasi. Radiasi yang diterima penumpang dan awak pesawat pada lintang tinggi juga rentan terhadap resiko radiasi tingkat rendah (sekitar $1 \times$ rontgen badan). Pada operasi satelit kemungkinan terdapat banyak SEUs, sistem pencitraan yang penuh dengan derau dan pengurangan efisiensi pada solar panel. Selain itu, penurunan propagasi radio HF yang melalui daerah kutub juga terjadi. Peristiwa badai radiasi matahari pada level ini diperkirakan 10 kejadian tiap siklus.

Pada level S4 fluks partikel berkisar 10^4 MeV. Bahaya radiasi bagi astronot tidak dapat diabaikan, sehingga perlu diberikan peringatan. Penumpang dan awak pesawat pada lintang tinggi juga rentan terhadap resiko radiasi ini (sekitar $10 \times$ rontgen badan). Pada operasi satelit kemungkinan mengalami masalah peralatan memori, derau pada sistem pencitraan, masalah pada *star tracker* yang menyebabkan masalah pada orientasi, dan terganggunya efisiensi solar panel. Pada permukaan bumi komunikasi radio HF yang melewati daerah kutub hilang dan *error navigasi* terjadi selama beberapa hari.

Peristiwa badai radiasi matahari pada level ini diperkirakan 3 kejadian tiap siklus.

Pada level S5, fluks partikel yang diperoleh dari pengamatan berkisar 10^5 MeV, bahaya radiasi tinggi tidak dapat dihindari oleh astronot. Penumpang dan awak pesawat pada lintang tinggi juga rentan terhadap resiko radiasi tinggi matahari (sekitar $100 \times$ rontgen badan). Efek pada operasi satelit pada level ini antara lain rusaknya satelit, pengaruh pada memori dapat menyebabkan hilangnya kontrol, derau pada data gambar, *star-tracker* kemungkinan tidak dapat menemukan sumber. Selain itu solar panel kemungkinan juga mengalami kerusakan permanen. Komunikasi HF yang melewati daerah kutub hilang dan sulitnya operasi navigasi akibat *error* posisi. Peristiwa badai radiasi matahari pada level ini tidak selalu terjadi setiap siklus.

5 PREDIKSI AKTIVITAS MATAHARI

Pengaruh cuaca antariksa yang membahayakan terutama efek radiasi matahari terhadap manusia dan kemungkinan kerusakan yang terjadi pada wahana antariksa ketika aktivitas cuaca antariksa sedang meninggi, menyebabkan perlunya dibuat sebuah prediksi cuaca antariksa untuk menanggulangi atau paling tidak mempersiapkan segala sesuatunya. Perubahan kondisi cuaca antariksa diawali dengan perubahan yang terjadi pada aktivitas matahari. Hal ini menunjukkan bahwa prediksi aktivitas matahari merupakan kunci diperolehnya prediksi jangka panjang

Dewasa ini, prediksi aktivitas matahari telah dilakukan dengan menggunakan pengamatan dari satelit Yohkoh dan satelit SOHO. Dari satelit Yohkoh dapat diperoleh citra x-ray matahari yang menunjukkan karakteristik matahari seperti struktur magnetik daerah aktif, lokasi flare dan lubang korona. Sedangkan dari satelit SOHO diperoleh data citra UV aktivitas matahari dan citra koronograf CME ketika me-

ninggalkan matahari. Data-data ini memberikan kesempatan pada peneliti agar dapat membuat prediksi badai matahari. Hingga saat ini kebenaran dan keakuratan badai matahari terutama prediksi kejadian flare dan CME masih sangat rendah. Hal ini disebabkan biasanya Flare dan CME terjadi secara spontan.

Prediksi badai matahari ini hanya merupakan langkah awal dari prediksi cuaca antariksa. Cuaca antariksa bukan hanya dipengaruhi oleh aktivitas matahari, tetapi juga pada aktivitas geomagnet dan gangguan pada ionosfer dan atmosfer bumi.

6 KESIMPULAN

Pengaruh matahari yang sangat besar ke lingkungan antariksa dan sistem satelit, menyebabkan pengetahuan yang mendalam mengenai matahari dan efeknya sangatlah penting. Angin matahari, flare dan CME merupakan peristiwa matahari yang memberikan radiasi paling besar ke lingkungan antariksa. Oleh karena itu prediksi mengenai angin matahari, kejadian flare dan CME merupakan langkah awal untuk membuat prediksi cuaca antariksa yang bukan hanya melibatkan aktivitas matahari, tetapi juga aktivitas geomagnetik, ionosfer dan atmosfer. Saat ini NOAA telah membuat skala efek radiasi matahari pada sistem satelit dan manusia.

DAFTAR RUJUKAN

- Bothmer, V dan Danglis, I, 2007. *Space weather – Physics and Effects*, Praxis publishing Ltd, Chichester, UK.
- Kallenrode, May-Britt, 2004. *Space Physics*, Springer Berlin Heidelberg, New York.
- Prolss, G. M., 2006. *Physics of the earth's space environment*, Springer Berlin Heidelberg, New York.
- Schwenn, R., 2006. *Space Weather: The Solar Perspective*, Max Planck Institute for Solar System Research, Germany.