

Sri Suhartini*

RINGKASAN

Di dalam pengamatan angin surya ditemukan adanya gelombang kejut (shock wave) yang menjalar dari matahari ke bumi. Lewatnya gelombang kejut ini menimbulkan perubahan pada besarnya kuat medan magnet dan kerapatan angin surya. Hasil pengamatan yang dilakukan oleh satelit ISSE-2 pada tanggal 26 November 1977 menunjukkan bahwa kuat medan magnet angin surya meningkat dari 7 gama menjadi 15 gama, dan kerapatan elektron dari $9 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ menjadi $25 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ setelah lewatnya gelombang kejut.

ABSTRACT

In the solar wind observation, shock waves are found to be propagating from the sun to the earth. The propagation of these waves cause some changes in the magnitudes of solar wind parameters such as magnetic field strength, and electron density. The results of the observation by ISSE-2 satellite on November 26, 1977 showed that the solar wind magnetic field increased from 7 gammas to 15 gammas and the electron density from $9 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ to $25 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ after the passing of the shock waves.

1. PENDAHULUAN

Pengamatan-pengamatan yang dilakukan dengan berbagai wahana penjajak membuktikan bahwa terdapat aliran plasma dari korona matahari menuju bumi dengan kecepatan supersonik, yang dinamakan angin surya.

Bila terjadi ledakan matahari yang cukup besar (flare), plasma disebarkan dengan kecepatan yang lebih besar dari pada kecepatan plasma angin surya sehingga dapat mengakibatkan terbentuknya gelombang kejut (shock wave). Gelombang kejut ini, bila sampai di atmosfer bumi akan menimbulkan kenaikan intensitas medan magnet secara mendadak, bahkan bisa terjadi badai magnetik yang mengganggu komunikasi radio, jaringan distribusi listrik, jaringan telepon dan komunikasi satelit.

* Peneliti Bidang Dinamika Ionosfer.

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengenali adanya fenomena gelombang kejut dan efeknya pada angin surya, dengan menggunakan data dari satelit ISSE-2 tahun 1977 dan 1978 yang berupa spektrogram hasil pengukuran medan magnet dan medan listrik angin surya.

2. ANGIN SURYA

Adanya materi yang berasal dari matahari dalam ruang antar planet telah diketahui sejak pertengahan pertama abad ini. Sekitar tahun 1950 Biermann menyatakan adanya fluks ion yang berasal dari matahari yang mengalir secara radial untuk menerangkan arah daripada ekor komet yang berlawanan dengan arah matahari.

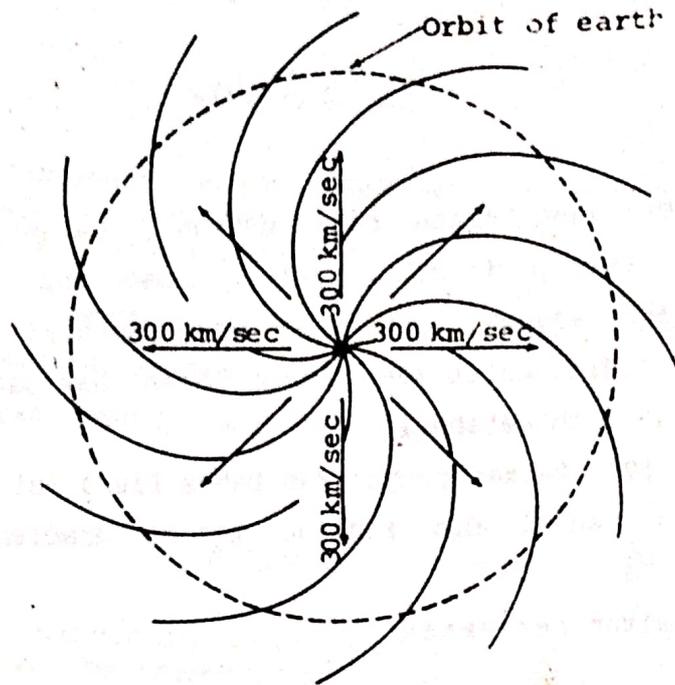
Pada tahun 1958 Parker menyatakan bahwa fluks ini dari korona matahari mengalir secara radial dan kontinu karena gradien tekanan dan gaya gravitasi.

Dengan menyelesaikan persamaan:

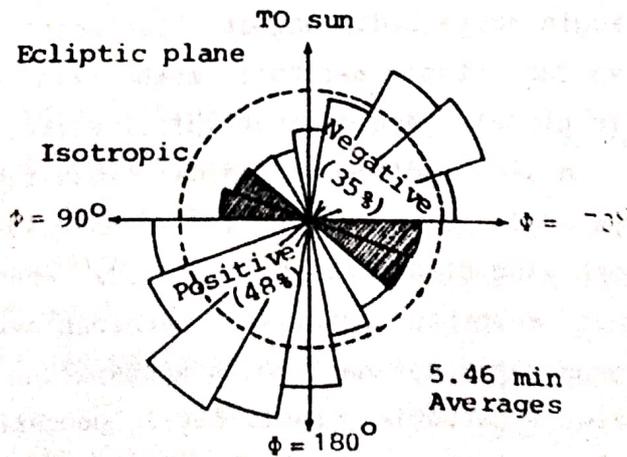
$$\rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = - \frac{dP}{dr} - \rho \frac{G M_{\odot}}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad (2-1)$$

Parker mendapatkan suatu hasil yang dapat diterima secara fisis, bahwa kecepatan plasma matahari adalah supersonik. Aliran ini disebut angin surya. Di dalam angin surya medan magnet "terjerat" di dalam plasma. Arah radial angin surya dan rotasi matahari memberikan struktur spiral pada medan magnet antar planet, yang disebut spiral Parker (gambar 2.1).

Pengukuran 'in-situ' dilakukan pada tahun-tahun berikutnya untuk membuktikan adanya angin surya. Gambar 2.2 menunjukkan histogram arah medan magnet antar planet yang diamati oleh IMP-1 pada tahun 1963. Nampak di sini bahwa medan magnet membentuk sudut 45° terhadap arah matahari - bumi. MARINER-2 dalam pengamatan selama 3 bulan mendapatkan hasil bahwa aliran angin surya selalu supersonik. Hasil-hasil pengamatan ini membuktikan berlakunya model Parker untuk angin surya. Hasil pengukuran berbagai wahana penjelajahan memberikan harga rata-rata parameter angin surya seperti pada tabel 2.1.



Gambar 2.1 : Spiral Parker



Gambar 2.2 : Histogram arah medan magnet antar planet hasil pengamatan IMP-1.

Tabel 2.1 : Harga rata-rata parameter angin surya

Besaran	Harga terukur	Pengamatan
Kecepatan	400 km sec ⁻¹	Vela-3
Kuat medan magnet	6 gamma	IMP-1
Arah medan magnet pada 1 AU terhadap arah matahari-bumi	45°	IMP-1
Kecepatan	5,4 cm ⁻³	Mariner-2
Kerapatan fluks	1-2 x 10 ⁸ cm ⁻² sec ⁻¹	Explorer-10
Temperatur	1.16 x 10 ⁵ °K	—

3. GELOMBANG KEJUT (SHOCK WAVE)

Di dalam pengamatan angin surya ditemukan adanya gelombang kejut yang menjalar dari matahari ke bumi. Bila terjadi ledakan matahari yang cukup besar, plasma disebarkan dengan kecepatan yang lebih besar daripada kecepatan angin surya. Plasma yang bergerak lebih cepat ini akan menimbulkan gelombang di depan yang disebut gelombang kejut (shock wave).

Menjalarnya gelombang kejut ini di ruang antar planet akan menimbulkan perubahan pada parameter-parameter angin surya. Perubahan parameter plasma secara toritis diturunkan dari persamaan-persamaan Rankine-Hugoniot untuk gas dinamis yang terdiri dari persamaan-persamaan kekekalan massa, momentum dan energi serta persamaan Maxwell.

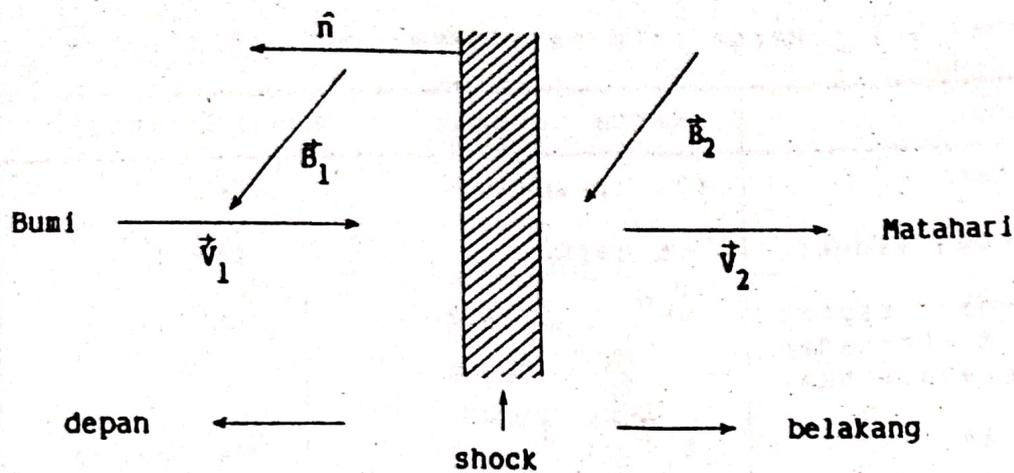
Di dalam koordinat di mana gelombang kejut diam, dianggap bahwa gelombang kejut adalah suatu bidang datar tak terhingga dengan normal bidang ini ke arah bumi (x) sehingga $\partial/\partial y$ dan $\partial/\partial z = 0$. Dianggap juga bahwa aliran angin surya adalah stasioner ($\partial/\partial t = 0$). Gambar 3.1 menunjukkan representasi gelombang kejut di dalam koordinat ini.

Persamaan Rankine-Hugoniot dituliskan sebagai berikut:

a. Persamaan kekekalan massa:

$$\rho_1 v_{1n} = \rho_2 v_{2n} \quad (3-1)$$

\vec{n} adalah arah normal gelombang kejut



Gambar 3.1 : Representasi gelombang kejut di dalam koordinat di mana gelombang kejut diam.

b. Persamaan kekekalan momentum :

$$\rho_1 v_{1n}^2 + p_1 + B_1^2/8\pi = \rho_2 v_{2n}^2 + p_2 + B_2^2/8\pi \quad (3-2)$$

$$\rho_1 v_{1n} \vec{v}_{1t} + B_n \vec{B}_{1t}/4 = \rho_2 v_{2n} \vec{v}_{2t} + B_n \vec{B}_{2t}/4\pi \quad (3-3)$$

di mana :

p = tekanan thermik

$B^2/8\pi$ = tekanan magnetik

$\rho_1 v_{1n}^2$ = fluks normal momentum ke arah tegak lurus permukaan gelombang kejut.

$\rho_1 v_{1n} \vec{v}_{1t}$ = fluks normal momentum ke arah sejajar permukaan gelombang kejut.

B = medan magnet

B_t = medan magnet tangensial

c. Persamaan kekekalan fluks energi :

$$\left(\frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 + \frac{5}{2} p_1 + B_{1t}^2/4\pi \right) v_{1n} - B_n B_{1t}/4\pi v_{1t} =$$

$$\left(\frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 + \frac{5}{2} p_2 + B_{2t}^2/4\pi \right) v_{2n} - B_n B_{2t}/4\pi v_{2t} \quad (3-4)$$

Persamaan ini menyatakan kekekalan fluks energi kinetik dan magnetik. Dari persamaan Maxwell di dapatkan :

$$B_{1n} = B_{2n} = B_n$$

yang menyatakan bahwa medan magnet dalam arah normal terhadap gelombang kejut tidak berubah sebelum dan sesudah lewatnya gelombang tersebut.

4. EKSPERIMEN

4.1. Materi Penelitian.

Dalam penelitian ini dipakai data dari satelit ISEE-2 yang diorbitkan pada tahun 1977. Orbit satelit ditunjukkan dalam gambar 4.1. Dari gambar ini dapat dilihat bahwa:

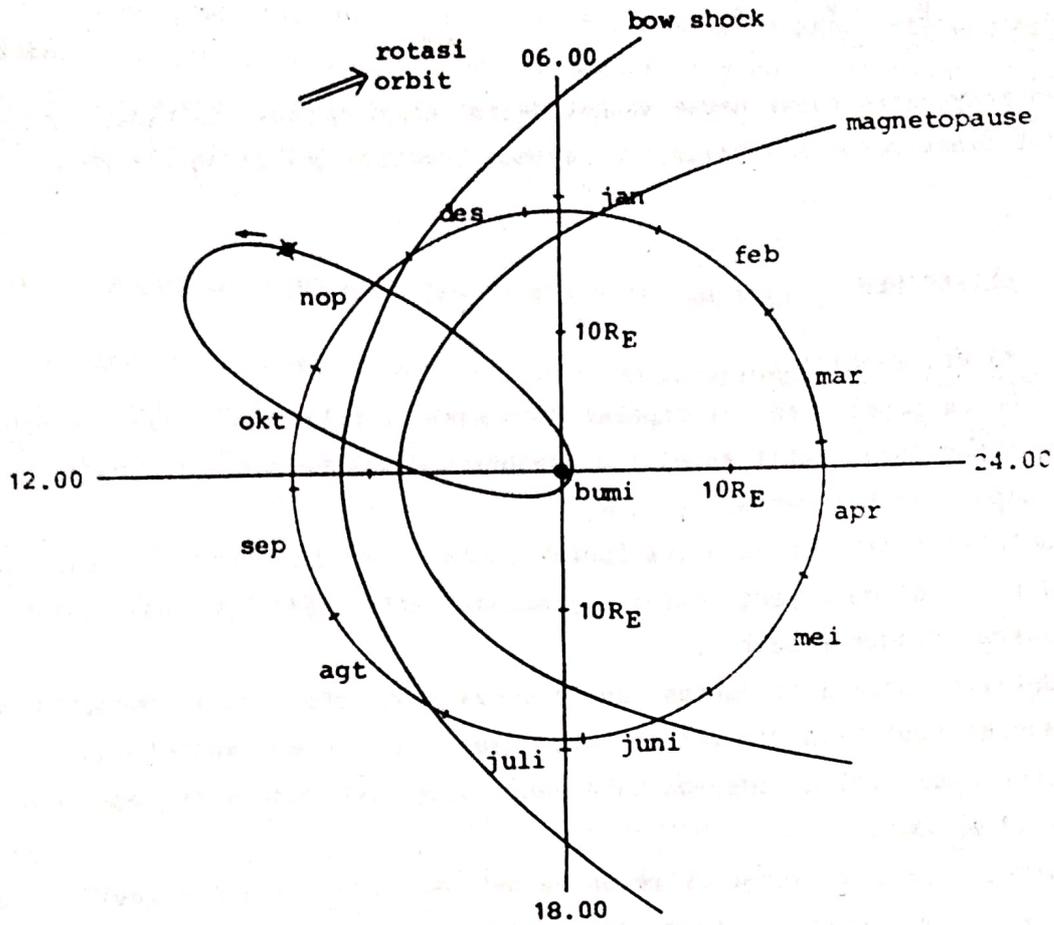
1. Satelit tidak berada dalam daerah angin surya dari bulan Januari sampai Juni. Jadi data yang diteliti adalah data dari periode bulan Juli sampai dengan Desember.
2. Satelit berada di daerah angin surya yang bebas dari pengaruh medan magnet bumi bila dia berada cukup jauh di depan magnetopause. Dalam eksperimen ini di analisa data yang diperoleh pada waktu posisi satelit $> 15 R_E$ bumi.

Satelit ISEE-2 mengukur medan magnet dan medan listrik angin surya. Hasil pengukuran direkam dalam mikrofilm. Medan magnet direkam dalam satuan gamma, arahnya diberikan oleh sudut azimuth dan elevasi (gambar 4.2).

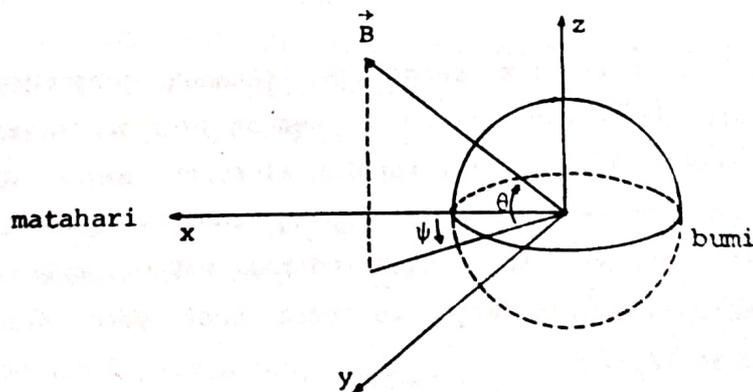
Tipe kedua dari mikrofilm mengandung rekaman pengukuran medan listrik sebagai fungsi waktu dan frekuensi. Dengan melihat rekaman spektrogram ini kita bisa mengetahui variasi kerapatan elektron angin surya karena pada umumnya intensitas medan listrik paling kuat sekitar frekuensi plasma. Posisi satelit ditunjukkan dengan indikasi waktu lokal magnetik (TLM: temp local magnetique) dan jaraknya terhadap bumi yang diukur dalam satuan jari-jari bumi (R_E).

4.2. IDENTIFIKASI GELOMBANG KEJUT

Dalam peredarannya satelit secara periodik melewati magnetosfer. Jarak maksimum satelit terhadap bumi adalah $23 R_E$. Medan magnet akan jauh bertambah besar ketika satelit memasuki magnetosfer (keluar dari angin surya) dan menurun bila keluar dari daerah ini (memasuki daerah angin surya) (gambar 4.3).



Gambar 4.1 : Orbit satelit ISEE-2.

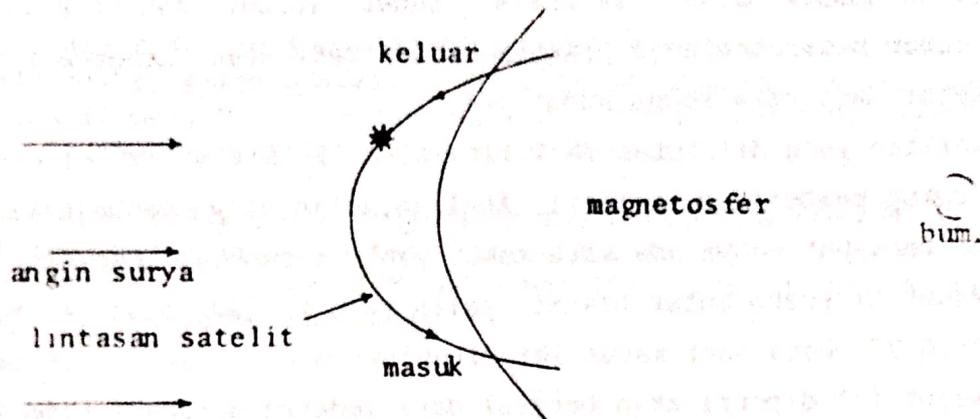


Gambar 4.2 : Sudut azimuth dan elevasi medan magnet angin surya.

Di atmosfer bumi, arah rata-rata medan magnet angin surya adalah 45° terhadap arah matahari-bumi. Dalam gambar 4.4 dapat dilihat bahwa secara teoritis, satelit pada umumnya berada di dalam angin surya 'bebas', dalam arti tidak terganggu oleh elektron-elektron yang dipantulkan oleh 'bow shock' dan menambah besarnya medan magnet antar planet antara jan 12.00 dan

18 00 UT. Dengan demikian data yang dianalisa harus berasal dari pengamatan yang dilakukan pada:

1. Periode antara bulan Juli dan Desember.
2. Jarak satelit $> 15 R_E$ dari bumi.
3. Antara jam 12.00 dan 18.00 UT.



Gambar 4.3 : Lintasan satelit masuk dan keluar daerah magnetosfer.

Dalam mikrofilm arah medan magnet ditunjukkan dengan sudut azimut dan elevasinya. Kalau besarnya sudut-sudut ini mendekati 0° atau 180° hampir pasti bahwa medan magnet yang dilalui satelit terpengaruh oleh medan magnet bumi. Intensitas medan listrik memberikan juga indikasi pengaruh ini. Dalam hal satelit dipengaruhi oleh medan magnet bumi, nampak di dalam mikrofilm bahwa medan listriknya sangat kuat. Kita menganggap bahwa kita berada dalam angin surya yang bebas ketika:

1. Medan magnet lemah (dalam orde beberapa gamma) dan agak stabil.
2. Medan listrik secara umum stabil.

Lewatnya suatu gelombang kejut dapat diidentifikasi dengan perubahan-perubahan besarnya parameter angin surya. Medan magnet dan kerapatan elektron akan meningkat secara mendadak. Jadi kasus yang dicari adalah di mana satelit berada di dalam daerah angin surya bebas dan terdapat diskontinuitas dalam kerapatan dan kuat medan magnet. Arah medan magnet berubah juga bila ada gelombang kejut, sehingga perubahan sudut azimut dan elevasi bisa menunjukkan adanya gelombang kejut.

4.3. HASIL DAN ANALISA

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan data dari tahun 1977 dan 1978. Dari data yang ada ternyata angin surya hampir selalu terganggu oleh medan magnet bumi. Medan magnet sangat bervariasi meskipun satelit berada di dalam daerah yang cukup jauh dari bumi, di mana kita menganggap bahwa angin surya tidak terganggu. Perubahan medan magnet kadang-kadang sangat lemah dan tidak nampak dalam mikrofilm. Sudut azimut dan elevasi juga bervariasi cukup besar sehingga praktis kita tidak bisa mengenali adanya gelombang kejut dari data kedua sudut ini.

Dari analisa yang dilakukan dari kira-kira 150 mikrofilm ditemukan 8 kasus yang cukup memberikan indikasi. Analisa selanjutnya menunjukkan bahwa dari 8 kasus tersebut hanya ada satu kasus yang merupakan rekaman adanya gelombang kejut di ruang antar planet, yaitu yang terjadi pada 26 November 1977 jam 17:10 UT. Data dari kasus ini ditunjukkan pada gambar 4.5 dan 4.6. Gelombang kejut ini diperkirakan berasal dari ledakan matahari tipe 2B yang terjadi pada tanggal 22 November 1977 yang teramati oleh Haute-Provence Observatory, France. Ledakan matahari tersebut mulai teramati pada jam 04:95 UT mencapai maksimum pada jam 10:07 UT dan berakhir pada jam 11:05 UT (Solar-Geophysical Data No. 400, p. 10, 1977).

Besarnya parameter-parameter sebelum dan sesudah lewatnya gelombang kejut ini diberikan pada tabel 4.1.

Tabel 4-1 : Besarnya parameter angin surya sebelum dan sesudah lewatnya gelombang kejut pada tanggal 26 November 1977.

Parameter	sebelum	sesudah
Kuat medan magnet B	7 gamma	15 gamma
Azimut	83°	87°
Elevasi	40°	30°
Kecepatan elektron	$9 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$	$25 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$

5. KESIMPULAN

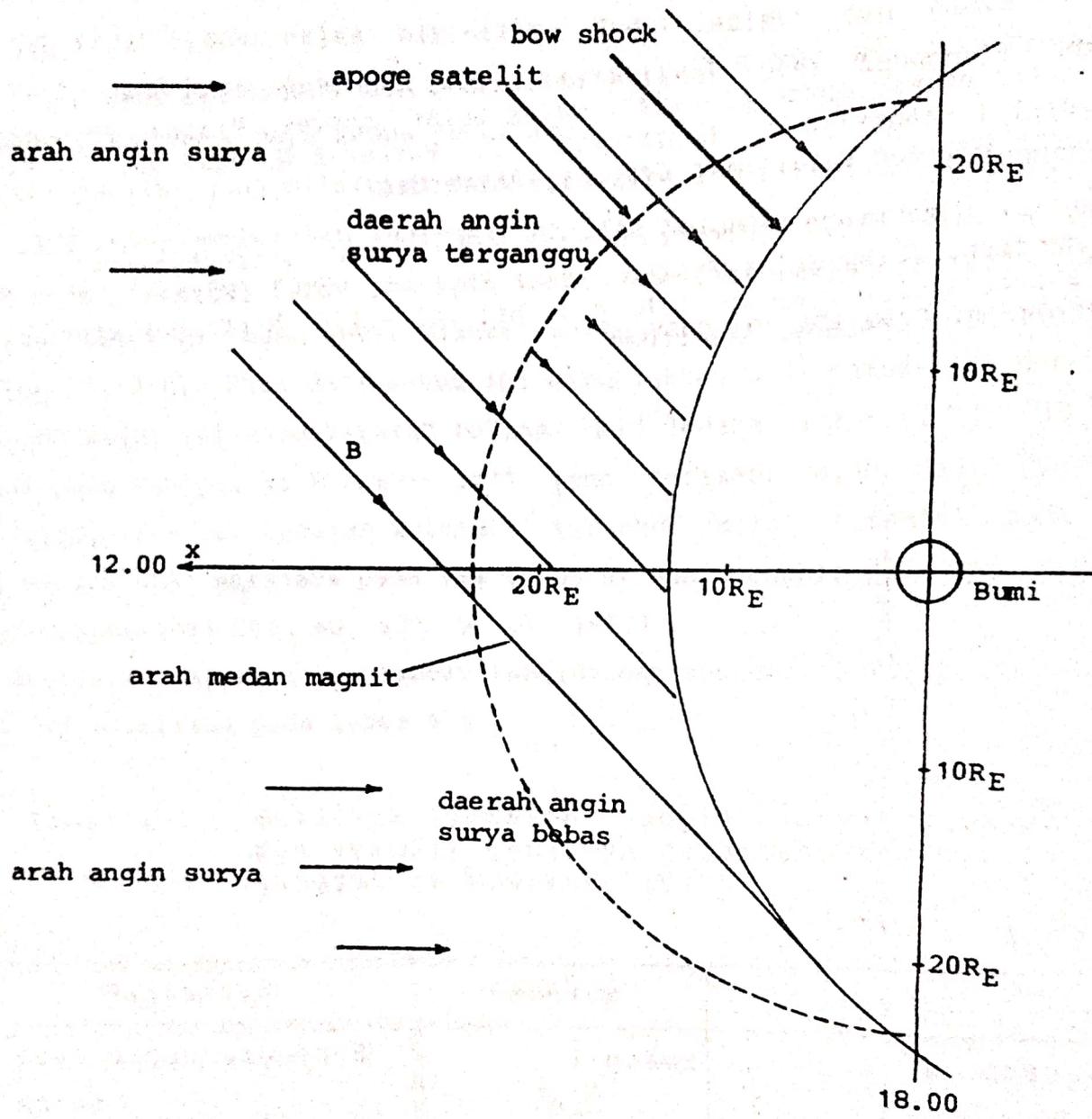
Hasil analisa data satelit ISEE-2 ini menunjukkan bahwa adanya gelombang kejut di ruang antar planet telah menimbulkan perubahan yang

cukup besar pada kerapatan elektron dan medan magnet angin surya.

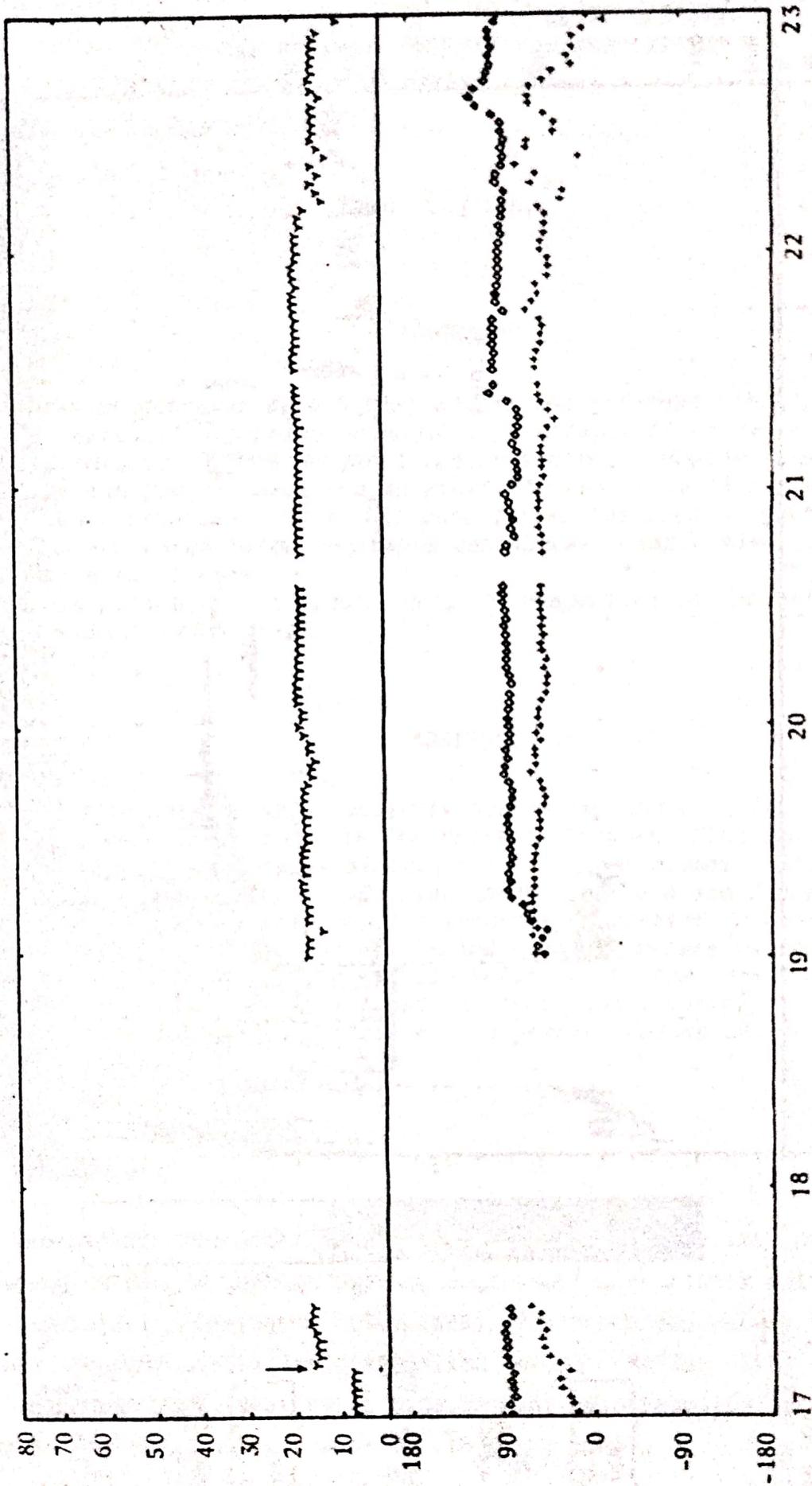
Rekaman data medan listrik dan medan magnet dari satelit ISEE-2 juga menunjukkan bahwa medan magnet bumi masih cukup besar pengaruhnya terhadap angin surya pada jarak antara 15 dan 23 R_E .

DAFTAR PUSTAKA

1. Greenstadt E.W. and R.W. Predricks, (1979), "shock systems in collisionless space plasmas", dalam Solar system Plasma Physics vol. III (Kennel C.F., Lanzerotti L.J., Parker E.N. eds) hal 3 - 44. North Holland Publishing Company, Amsterdam.
2. Holzer T.E. (1979), The Solar wind and related astrophysical phenomena dalam Solar System Plasma Physics, vol. I (Kennel C.F., Lanzerotti L.J., Parker E.N. eds) hal 101 - 176. North Holland Publishing Company, Amsterdam.

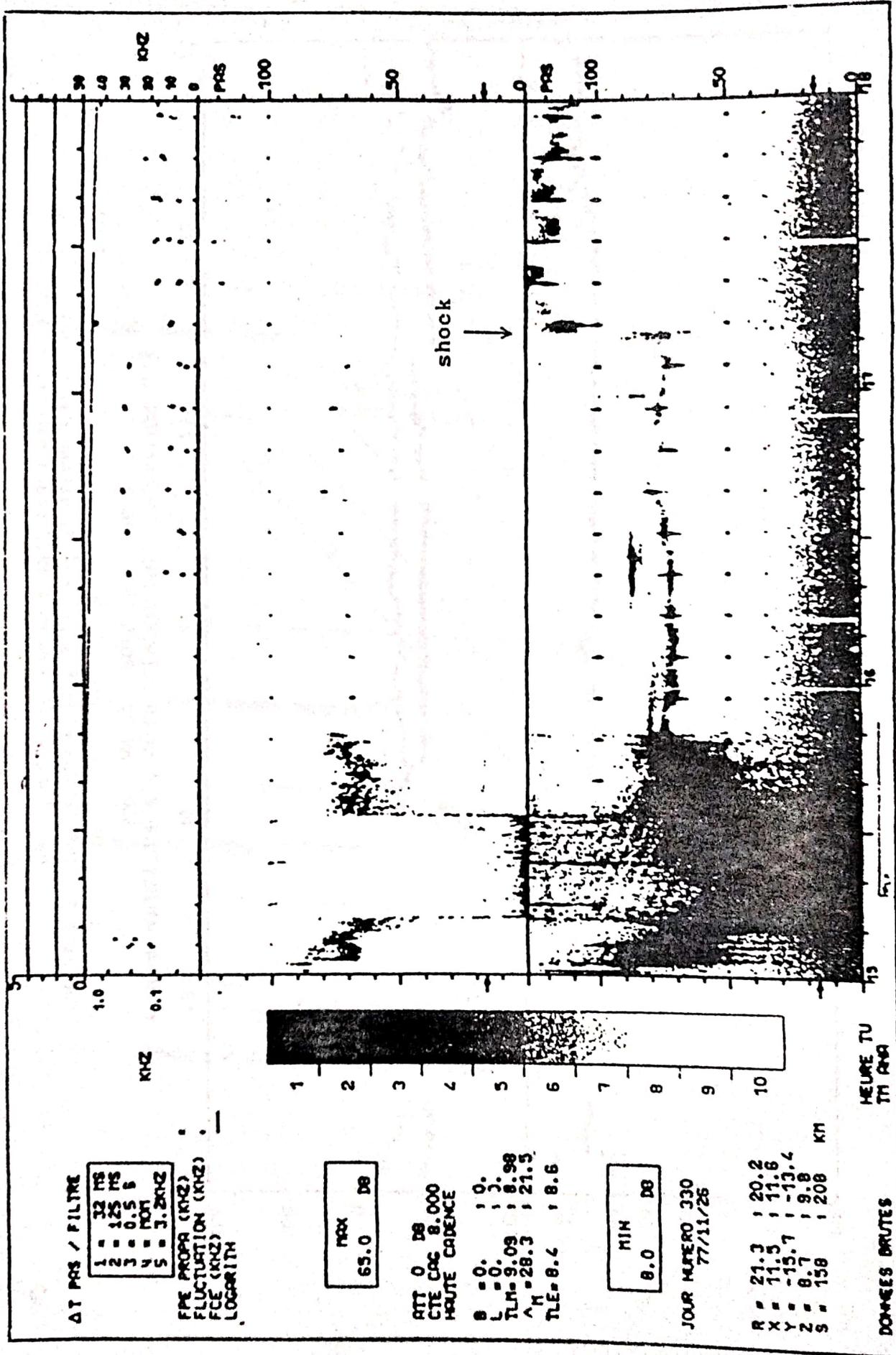


Gambar 4.4 : Daerah Angin Surya bebas dan terganggu.



Y CIAMP MAGNETIQUE: B, θ ANGLE AZIMUTHAL PHI, + ELEVATION TETA
 J 330 AN 77 MOIS 11 .JOUR 26

Gambar 4.5 : Data medan magnet angin surya, azimut dan elevasi pada tanggal 26 November 1977 (data satelit ISEE2).



Gambar 4.6 : Data medan listrik angin surya pada tanggal 26 November 1977 (data satelit ISEE-2).