



PROSES KEMAKNITAN ANGIN SURYA

Oleh Suratno *)

RINGKASAN

Angin surya (solar wind) merupakan angin hidrogen yang keluar dari matahari menghembus ke ruang antar planit. Sepanjang perjalanan keluar dari matahari angin surya terionisasi dan membawa medan magnet. Proses ini terjadi karena berlangsungnya medan magnet terperangkap oleh medium yang terionisasi tersebut.

1. PENDAHULUAN

Pada permukaan matahari (fotosfer) merupakan susunan zat-zat dan membentuk gelembung-gelembung gas. Karena perbedaan tekanan yang tinggi dan karena proses perpindahan energi, gelembung-gelembung gas terlempar keluar permukaan membubung ke atas dengan kecepatan sekitar 1000 km sampai 2000 km perdetik. Sebagian besar menjadi dingin dan turun kembali ke permukaan.

Partikel-partikel (hidrogen) dapat terlempar sampai lapisan korona matahari. Korona mempunyai kerapatan yang rendah dan tingkat ionisasi yang tinggi, sehingga hidrogen juga akan terionisasi. Hidrogen terionisasi (proton) ini akan terlempar keluar atmosfer matahari memasuki ruang antar planit sebagai angin surya. Sering disebut angin proton surya (solar wind proton).

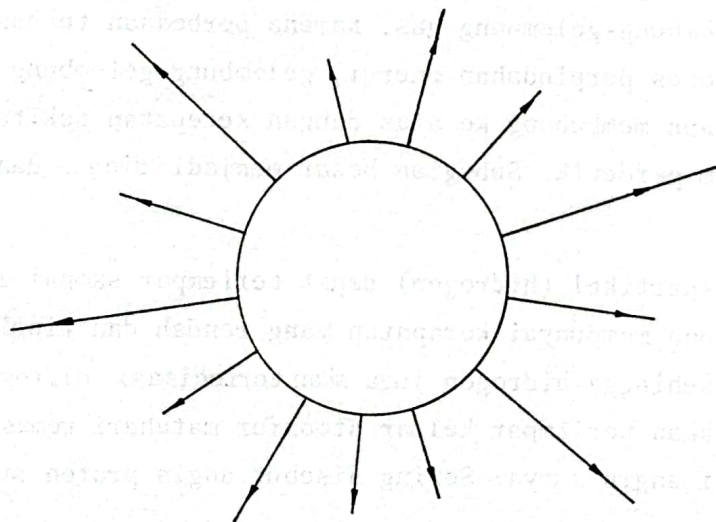
Angin surya dengan kencang menghembus secara (hampir) kontinu menembus sistem surya. Ke ruang antar planit melewati bumi pada kecepatan 400 km/det. Gejala yang nampak pada atmosfer bumi adalah adanya aurora

*) Staf Kelompok Penelitian Matahari

terutama di daerah kutub bumi. Rapat fluks aliran partikel daripada angin surya bervariasi sesuai dengan aktivitas matahari (terutama aktivitas flare).

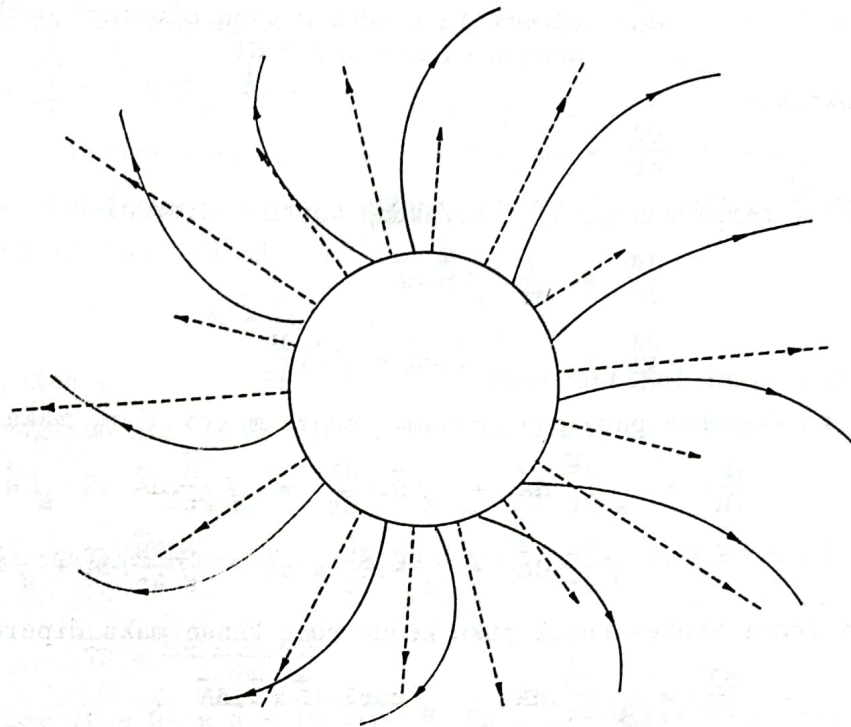
Partikel-partikel terionisasi sepanjang perjalanan di Khromosfer dan/atau korona, selanjutnya keluar dari sistem ini, temperatur turun sampai tingkat yang rendah. Dalam ruang antar planit dengan kerapatan yang rendah, kecil kemungkinannya bergabung kembali proton-proton dan elektron-elektron. Dengan sifat medium (gas) yang terionisasi maka angin surya membawa medan magnet keluar bersamanya. Dari mana medan magnet, pada dasarnya berasal dari medan magnet matahari yang terjerat oleh kelompok gas bermuatan (plasma).

Jika matahari tidak berotasi (periode rotasi ~ 27 hari) medan magnet yang terbawa angin surya dapat digambarkan keluar secara radial ke angkasa. Karena rotasi matahari memaksa garis medan yang lurus menjadi melengkung, hasilnya menjadi berbentuk spiral. (gambar 1-1 dan 1-2). Kekuatan medan magnet pendekatan secara radial, melemah berbanding lurus terhadap penambahan jarak kuadrat dari sumbernya.



Gambar 1-1 :

Gerakan garis-garis medan magnet bila matahari tidak berotasi

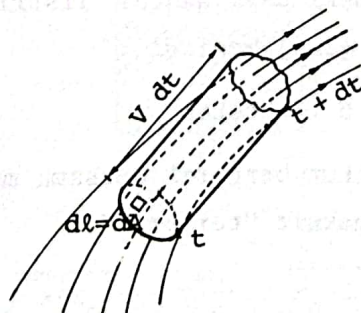


Gambar 1-2 :

Gerakan garis-garis medan magnet berbentuk spiral, sedang gerakan partikel secara radial.

2. MEDAN MAKNIT TERJERAT

Ditinjau fluks magnet \vec{B} yang menembus medium terionisasi (plasma) seluas permukaan S yang berubah karena pergerakan dalam interval waktu dt .



Pada saat t :

$$\text{Fluks : } \phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2-1)$$

$d\vec{A}$: elemen luas muka S yang dibatasi oleh garis ℓ dengan elemen garis $d\vec{\ell}$

Akan dibuktikan :

$$\frac{d\phi}{dt} = 0$$

Diferensiasi persamaan (2-1) terhadap waktu t diperoleh :

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dt} &= \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \\ \frac{d\phi}{dt} &= \int_S \frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \cdot d\vec{A} + \int_S \vec{B} \cdot \frac{d\vec{A}}{dt} \end{aligned} \quad (2-2)$$

Peninjauan dilakukan pada mana plasma secara makro diam, maka berlaku :

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dt} &= \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} + \int_S \vec{B} \cdot \frac{d\vec{A}}{dt} = \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} + \int_S \vec{B} \cdot \frac{d\vec{r} \times d\vec{\ell}}{dt} \\ &= \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} + \int_S \vec{B} \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} \times d\vec{\ell} = \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} + \int_S \vec{B} \cdot (\vec{V} \times d\vec{\ell}) \end{aligned}$$

Digunakan teori Stokes untuk suku kedua ruas kanan maka diperoleh :

$$\frac{d\phi}{dt} = \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} + \int_S \text{curl} (\vec{B} \times \vec{V}) \cdot d\vec{A} \quad (2-3)$$

Digunakan juga persamaan Maxwell :

$$\vec{j} = \sigma (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad \text{atau} \quad \frac{\vec{j}}{\sigma} = \vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}$$

Kemudian diambil curl diperoleh :

$$\text{curl} \left(\frac{\vec{j}}{\sigma} \right) = \text{curl} \vec{E} + \text{curl} (\vec{V} \times \vec{B})$$

Karena : $\text{curl} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ (Maxwell), maka

$$- \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \text{curl} (\vec{V} \times \vec{B}) - \text{curl} \left(\frac{\vec{j}}{\sigma} \right)$$

Persamaan (2-3) menjadi :

$$\frac{d\phi}{dt} = - \left[\int_S \text{curl} (\vec{V} \times \vec{B}) - \int_S \text{curl} \left(\frac{\vec{j}}{\sigma} \right) - \int_S \text{curl} (\vec{V} \times \vec{B}) \right] \cdot d\vec{A} \quad (2-4)$$

Suatu medium yang terionisasi, maka daya hantar listrik σ kecil sekali, sehingga $\vec{j}/\sigma \approx 0$, dan persamaan (2-4) menjadi :

$$\frac{d\phi}{dt} = 0 \quad \text{atau} \quad \phi = \text{tetap}$$

Berarti bahwa garis gaya harus ikut bergerak bersama materi plasma yang bergerak, dikatakan garis gaya magnet "terjerat".

3. TEKANAN MAKNIT DAN TEGANGAN MAKNIT

Persamaan gerak plasma di dalam medan magnet dapat ditulis :

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{j} \times \vec{B} - \vec{\nabla}P + \rho \vec{g} \quad (3-1)$$

Dengan anggapan gerakan plasma berlangsung tetap (steady state), maka elemen massa plasma tidak mendapat percepatan, jadi $\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = 0$. Maka persamaan (3-1) dapat ditulis :

$$0 = \vec{j} \times \vec{B} - \vec{\nabla}P + \rho \vec{g} \quad (3-2)$$

Percepatan gravitasi satu partikel oleh partikel lain sangat kecil, sehingga pengaruh ini dapat diabaikan. Persamaan (3-2), dapat ditulis :

$$\vec{\nabla}P = \vec{j} \times \vec{B} \quad (3-3)$$

Digunakan persamaan (Maxwell) $\text{curl } \vec{B} = 4\pi \vec{j}$, maka persamaan (3-3), menjadi :

$$\vec{\nabla}P = \frac{\text{Curl } \vec{B} \times \vec{B}}{4\pi} \quad (3-4)$$

Uraian vektor $(\vec{\nabla} \times \vec{B}) \times \vec{B} = (\vec{B} \cdot \vec{\nabla})\vec{B} - \frac{1}{2} \vec{\nabla}B^2$, persamaan (3-4) menjadi :

$$\vec{\nabla}P = \frac{(\vec{B} \cdot \vec{\nabla})\vec{B}}{4\pi} - \frac{\vec{\nabla}B^2}{8\pi} \quad (3-5)$$

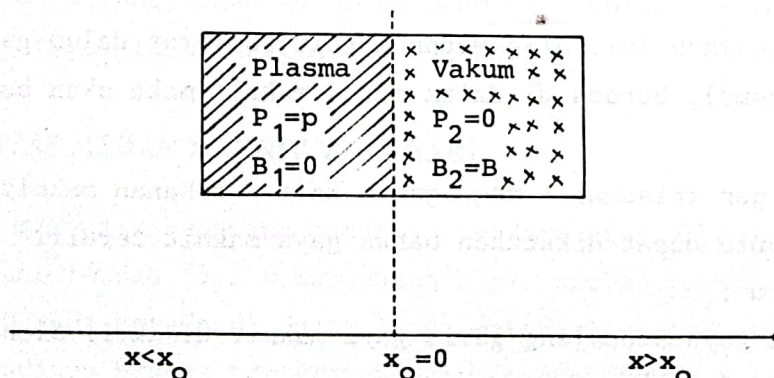
Peninjauan pertama, bila garis gaya dari B lurus dan sejajar maka berlaku $(\vec{B} \cdot \vec{\nabla})\vec{B} = 0$, jadi :

$$\vec{\nabla}P = - \frac{\vec{\nabla}B^2}{8\pi} ; \quad \text{atau} \quad \nabla P + \frac{\nabla B^2}{8\pi} = 0,$$

jika diintegrasikan diperoleh :

$$P + \frac{B^2}{8\pi} = \text{konstan} \quad (3-6)$$

Jika terdapat keadaan yang dapat digambarkan menurut geometri sebagai berikut :



Dapat digunakan persamaan (3-6) :

$$P_1 + \frac{B_1^2}{8\pi} = P_2 + \frac{B_2^2}{8\pi}$$

$$P + 0 = 0 + \frac{B^2}{8\pi}$$

Jadi : $P = \frac{B^2}{8\pi}$ (3-7)

Pernyataan pada persamaan (3-7), diartikan bahwa $\frac{B^2}{8\pi}$ adalah tekanan yang disebut tekanan magnetohidrostatis. Diartikan pula bahwa pada $x = x_0$ (pada garis batas) medan magnet membatasi dirinya dari gas (plasma) dengan menekannya sebesar $\frac{B^2}{8\pi}$. Selanjutnya bila di dalam plasma terdapat medan magnet, maka :

Tekanan gas + tekanan magnet dalam gas = tekanan magnet di luar gas. Jika medan magnet di luargas sangat kuat, maka gas (plasma) akan bersifat menjauhi medan magnet, karena mendapat tekanan magnet tersebut. Kembali pada persamaan (3-5), dan dengan uraian vektor yang dikenakan untuk $(\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B}$, didapat :

$$\nabla P = \frac{\nabla \cdot (\vec{B}\vec{B})}{4\pi} - \vec{B}(\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) - \frac{\vec{\nabla} B^2}{8\pi} \quad (3-8)$$

Dengan persamaan (Maxwell) di mana $\nabla \cdot B = 0$, maka

$$\nabla P = \frac{\vec{\nabla} \cdot (\vec{B} \vec{B})}{4\pi} - \frac{\vec{\nabla} B^2}{8\pi} \quad (3-9)$$

Diintegrasikan, diperoleh :

$$P = \frac{\vec{B} \vec{B}}{4\pi} - \frac{B^2}{8\pi} \quad (3-10)$$

Bila ditinjau besarannya, maka dapat ditulis :

$$P = \frac{B^2}{4\pi} - \frac{B^2}{8\pi} = \frac{B^2}{8\pi} \quad (3-11)$$

$\frac{B^2}{4\pi}$ disebut tegangan magnet sepanjang garis gaya.

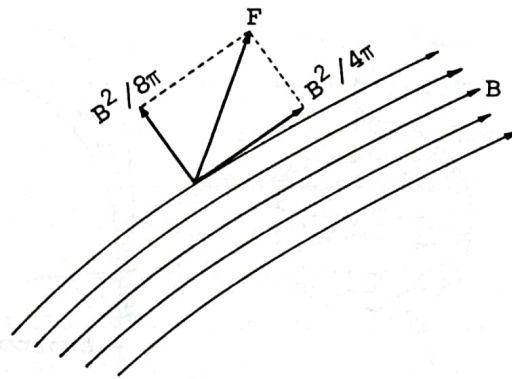
Dari persamaan ini, bila medan magnet terjat dalam gas (plasma) atau gas (plasma), berada di dalam medan magnet maka akan berlaku, bahwa :

Tekanan gas (plasma) = tegangan magnet - tekanan magnet

Keadaan itu pula dapat dikatakan bahwa gaya magnet terdiri atas dua komponen yaitu :

1. Komponen gaya sepanjang garis gaya magnet diwakili oleh tegangan magnet.

2. Komponen gaya tegak lurus medan maknit diwakili oleh tekanan magnetohidrostatik.



Dari besar kedua komponen tadi, maka medan maknit akan lebih mudah ditekan pada arah garis gayanya dibanding dengan arah yang tegak lurus garis gaya. Peninjauan kedua, dikenakan pada persamaan (3-3) dikalikan (secara vektor) dengan \vec{B} , diperoleh :

$$\vec{B} \times (\vec{j} \times \vec{B}) = \vec{B} \times \nabla P \quad (3-12)$$

Uraian vektor ruas kiri, yaitu :

$$\vec{B} \times (\vec{j} \times \vec{B}) = (\vec{B} \cdot \vec{B}) \vec{j} - (\vec{B} \cdot \vec{j}) \vec{B} \quad (3-13)$$

Diambil keadaan sederhana yaitu untuk $\vec{B} \perp \vec{j}$, maka

$$\vec{B} \times (\vec{j} \times \vec{B}) = (\vec{B} \cdot \vec{B}) \vec{j} - 0 = B^2 \vec{j} \quad (3-14)$$

Maka persamaan (3-12) menjadi :

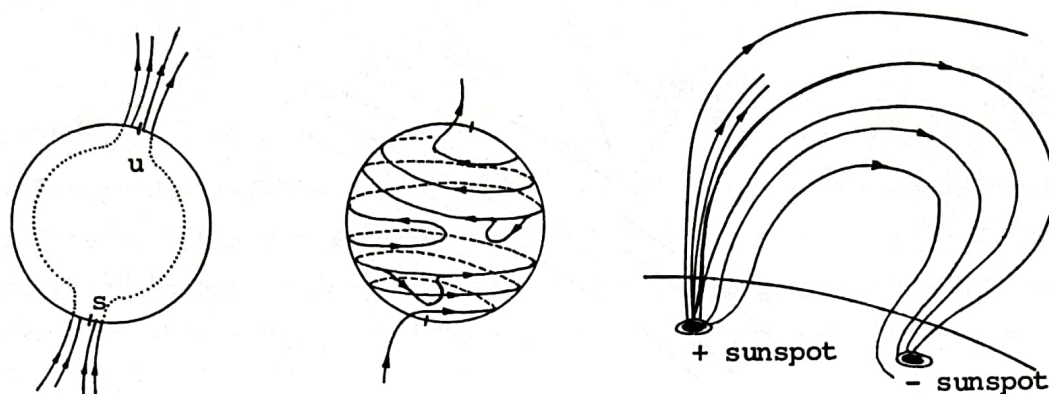
$$B^2 \vec{j} = \vec{B} \times \nabla P, \quad \text{atau} \quad \vec{j} = \frac{\vec{B}}{B^2} \times \nabla P \quad (3-15)$$

Dari persamaan ini menunjukkan bahwa gradient tekanan akan menimbulkan arus yang tegak lurus \vec{B} , atau menimbulkan komponen arus listrik yang tegak lurus dengan medan maknit B.

4. AKTIVITAS MEDAN MAKNIT MATAHARI

Bagian terbesar komponen matahari terdiri atas Hidrogen dengan kepadatan yang rendah (1,5 x kerapatan air). Karena rotasi matahari, maka medan maknit yang berada di dalam badan matahari menjadi terpuntir. Karena terjadinya proses terjeratnya garis gaya maknit oleh gas (plasma).

Proses tersembulnya/keluarnya medan magnet dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 4-1 :

Gambaran proses tersembulnya medan magnet.

Pada keadaan tersebut di daerah sekitar ekuator akan lebih banyak terkumpul garis gaya sehingga medan magnetnya kuat. Ketidakseimbangan antara tekanan gas dengan tekanan magnet berakibat ada dorongan keluar terhadap medan magnet. Garis gaya akan tersembul keluar sampai pada angkasa matahari bagian bawah (khromosfer) dan bahkan sampai di Korona. Akibat dari tersembulnya medan magnet akan terjadi/terbentuk sunspot pada permukaan matahari. Oleh karena itu sunspot pada umumnya merupakan kutub-kutub magnet yang berpasangan. Medan magnet yang tersembul ini sangat kuat dapat mencapai 4000 Gauss dan energi manetik dapat mengakibatkan aktivitas flare. Dan adanya flare akan meningkatkan intensitas angin surya (banyaknya atom hidrogen/cm⁻²det⁻¹) termasuk juga fluks magnet yang terbawa.

5. PERJALANAN ANGIN SURYA

Tanda khas permukaan matahari yaitu adanya specuale, sebagai pancaran partikel panas berukuran kecil. Muncul pada setiap saat sebagai kelap - kelip. Partikel-partikel yang terlempar tersebut terutama adalah atom hidrogen (netral), terjadi karena perbedaan tekanan dan kerapatan yang sangat menyolok antara fotosfer dengan khromosfer/korona. (Tekanan di fotosfer $\sim 0,24$ atmosfer sedang tekanan di korona $\sim 0,06$ atmosfer).

Karena masih terdapat pengaruh gravitasi dari matahari, partikel partikel kembali ke permukaan sedangkan hidrogen yang terlempar jauh dari permukaan (dapat mencapai khromosfer atau korona dalam), mengambang atau terlempar keluar (ke ruang antar planet) sebagai angin.

Di dalam khromosfer dan/atau korona dengan temperatur yang tinggi (10^6 °K) dan dengan kerapatan yang rendah memungkinkan berlangsungnya ionisasi, sehingga atom hidrogen terbagi menjadi proton dan elektron. Dengan demikian medium menjadi bermuatan positif dan bermuatan negatif, tetapi bila ditinjau secara keseluruhan medium ini sebagai netral. Partikel bermuatan ini tetap berhembus keluar dan merupakan angin surya. Membawa atau menjerat medan magnet ke ruang antar planet. Temperaturnya turun dan dengan kerapatan yang rendah maka antara proton-proton dan elektron-elektron kecil kemungkinan untuk bergabung.

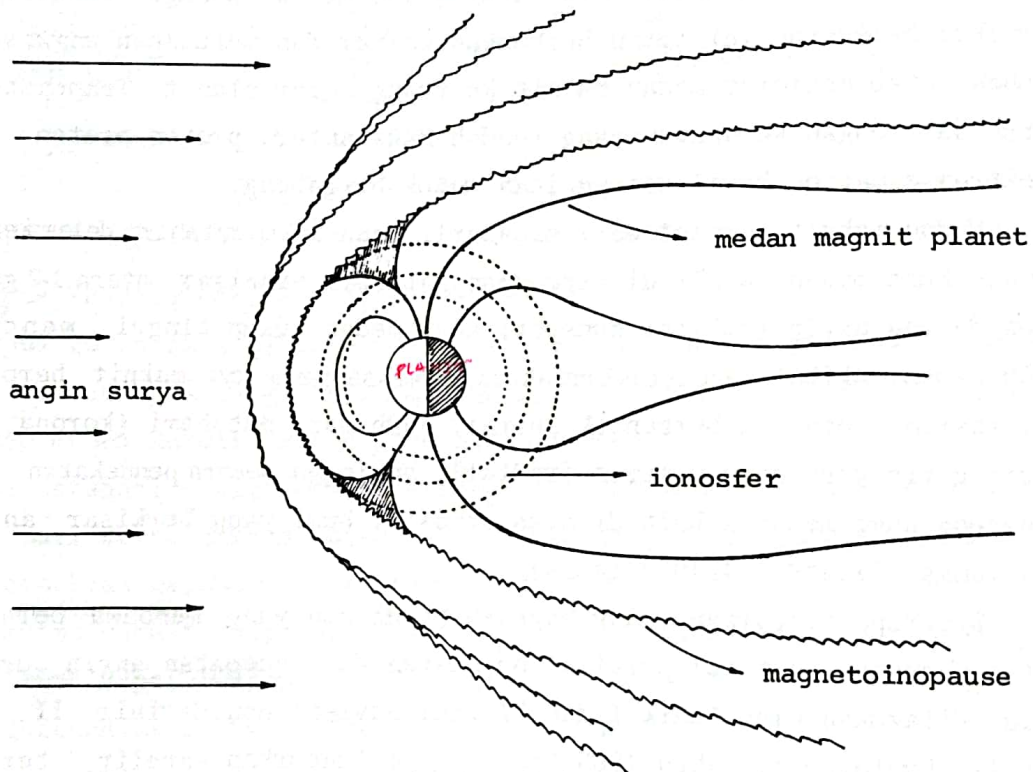
Medan magnet berasal dari matahari, pada waktu matahari dalam keadaan tenang kuat medan magnet di permukaan matahari berkisar antara 1-2 gauss. Pada daerah aktif (sekitar sunspot) kuat medan cukup tinggi mencapai 4000 gauss. Akibat dari rotasi matahari, memaksa garis gaya magnet berputar, dan hasilnya menjadi berbentuk spiral. Jauh dari matahari (korona luar) garis-garis gaya hampir lurus (radial), sehingga secara pendekatan dapat dihitung kuat medan magnet di atas atmosfer bumi yang berkisar antara 3-4 gamma (3×10^{-5} - 4×10^{-5} gauss).

Beberapa kendaraan ruang angkasa telah ada yang membawa peralatan untuk mencatat partikel-partikel bermuatan dan kecepatan angin surya. Telah dilakukan oleh Lunik I dan II (Uni Soviet) dan Mariner II dan satelit Explorer X. Tahun 1985 NASA meluncurkan satelit, terutama untuk Solar Win Experiment).

Mereka menunjukkan bahwa angin surya berhembus sejauh tidak kurang dari 12 AU (\sim mendekati planet Saturnus) dan tidak lebih dari 160 A.U (\sim 4 x jarak planet Pluto). Berhembus secara kontinu dan didekat angkasa bumi berhembus secara lurus, bergerak dengan kecepatan kira-kira 400 km/det. Kadang-kadang pelan dan kadang-kadang kencang. Intensitas rata-rata berkisar antara 2 - 4 x 10^8 proton/cm²det. Pada saat matahari aktif kecepatan maupun fluksnya melonjak sangat tajam sampai dua kali lipat.

Angin surya bergerak dengan kecepatan supersonik dalam perjalanannya mendekati suatu planet.

Bagi planet yang mempunyai medan magnet yang kuat dan lapisan ionosfer yang mantap (misalnya bumi) dan karena angin surya memuat partikel yang terionisasi maka gas (plasma) angin surya tidak mampu menembus langsung ke dalam permukaan planet atau atmosfernya. Karena sifat menjauhi medan magnet kuat, maka angin surya akan terbelok di sekeliling permukaan planet sehingga terbentuk magnetopause, yaitu daerah yang relatif tipis sebagai daerah peralihan antara medan magnet planet dan medan magnet yang terbawa oleh angin surya.



Gambar 5-1 :

Terbentuknya ionopause sebagai akibat angin surya yang tak dapat menembus atmosfer suatu planet.

6. PENUTUP

Perbedaan tekanan yang cukup tinggi antara permukaan matahari dengan atmosfernya dan proses perpindahan energi dari dalam matahari akan menimbulkan lemparan partikel keluar ke ruang antar planet sebagai angin surya.

Terjadinya proses ionisasi di atmosfer matahari berakibat medium

menjadi terionisasi dan berlanjut dengan terjeratnya medan magnet matahari.

Peningkatan aktivitas matahari baik yang berkaitan dengan partikel partikel maupun medan magnetnya berpengaruh terhadap intensitas angin surya.

DAFTAR PUSTAKA

1. E.N. PARKER : "The Solar Wind, Frontiers in Astronomy", W.H. Freeman and Company, San Fransisco, 1964.
2. J.R. SPREITER : "Magnetohydrodynamic and Gasdynamic Aspects of Solar Wind Flow Arround Terrestrial Planets a Critical Review", NASA SP-397, 1976.
3. GEORGE L. WITHBROE : "Activity and Outer Atmosphere of the Sun", Havard Smithsonian Centre for Astrophysics Cambridge, Massachusetts 02138, 1981.
4. V. DOMINGO : "Interplanetary Magnetic Field and Geomagnetic Activity", COSPAR, Space Research, Vol XVIII -p.325 1977.

- - - oo0oo - - -

DISKUSI

1. MASPUL AINI

Tanya : Dapatkah diketahui secara tepat berapa % pertahunnya massa matahari yang terlempar sebagai angin surya ?

Jawab : Secara tepat tidak dapat diketahui tetapi setiap saat ada massa yang terlempar sebagai angin surya, dan lemparan ini meningkat pada saat matahari sedang aktif (terjadi flare).

2. OBAY SOBARI

Tanya : Medan magnet di permukaan bumi antara 2-4 γ . Bagaimana pengaruh lintang tempat terhadap medan magnet tersebut ?

Jawab : Yang dimaksud adalah di atas atmosfer bumi bukan di permukaan bumi. Dan di atas atmosfer bumi rata-rata antara 3 - 4 γ adalah medan magnet yang terbawa oleh angin surya.

3. DJUANDA P.

Tanya : Pada pembahasan ini dengan anggapan bahwa plasma steady-state ($dv/dt = 0$). Seberapa jauh perbedaan teoritis dan hasil pengukuran (kalau sudah ada) ?

Jawab : Diambil contoh misalnya kuat medan magnet di atas atmosfer bumi, secara teori dan dari hasil pengukuran yang telah dilakukan oleh negara-negara maju berada pada orde yang sama yaitu antara 3-4 gamma. Tetapi sampai seberapa jauh teori dengan hasil pengukuran tidak dapat disampaikan secara eksak.

4. AGUS SURIPTO

Tanya : Mohon dijelaskan apakah angin surya selalu ada (kontinue) misalnya bila ditinjau dari penyebabnya !

Jawab : Angin surya selalu ada, hanya intensitasnya yang bervariasi tergantung dari aktivitas matahari.

- - - oo0oo - - -