

Medan magnet di korona Matahari dan keberadaan *switchback* yang terdeteksi oleh PSP (Kredit ilustrasi: UC Berkeley; gambar PSP: NASA/John Hopkins APL)

parameter-parameter angin surya secara langsung pada awal proses pembentukan angin surya.

Sampai saat ini, PSP telah mengungkap setidaknya satu

temuan baru mengenai karakteristik penjalaran angin surya di korona. Berdasarkan pengukuran beberapa parameter angin surya yang dilakukan oleh PSP saat mengorbit di dekat

Matahari, diketahui bahwa medan magnet beserta plasma angin surya yang bersamanya mengalami pembalikan arah secara drastis di korona. Keadaan pembalikan ini disebut sebagai *switchback*.

Adanya *switchback* pada medan magnet Matahari dapat menjadi petunjuk bagi para ilmuwan untuk memahami mekanisme percepatan atau mungkin perlambatan angin surya. Tentunya perlu waktu bagi para ilmuwan di seluruh dunia untuk dapat memahami temuan-temuan baru dari hasil pengukuran PSP yang mungkin akan masih terus bermunculan. Harapannya, suatu saat nanti misteri mekanisme percepatan dan sumber angin surya akan dapat dipecahkan.

LINGKUNGAN ANTARIKSA

Sabuk Radiasi di Antariksa Bumi

Oleh

L.M. Musafar | Pussainsa LAPAN

Magnetosfer Bumi adalah daerah antariksa yang didominasi oleh medan magnet Bumi. Daerah ini memiliki peran penting dalam melindungi Bumi dari potensi kerusakan yang dapat timbul karena pengaruh kelistrikan dari ruang antarplanet akibat keberadaan aliran angin surya yang terus menerus menyelubungi Bumi. Mirip dengan perisai pengaman, magnetosfer bersifat menyerap dan membelokkan aliran plasma angin surya tersebut. Badai cuaca antariksa ekstrem dapat menciptakan radiasi kuat dalam sabuk radiasi Van Allen dan membangkitkan arus listrik kuat. Ada banyak bukti dan penelitian yang mengungkap efek arus

listrik kuat tersebut dan menyebabkan terjadinya kerusakan jaringan kelistrikan di lingkungan Bumi. Jika dampak dari pengaruh yang demikian tidak dicegah maka hal tersebut tentu dapat menimbulkan kerugian besar.

Sabuk radiasi pertama kali ditemukan pada awal era antariksa melalui eksperimen peluncuran Explorer 1 pada tanggal 31 Januari 1958. Sebenarnya, satelit tersebut diluncurkan untuk tujuan menyelidiki sinar kosmis, dan hanya membawa pencacah Geiger sederhana yang dilengkapi *tape recorder* sebagai alat perekam. Pada tahun yang sama juga diluncurkan satelit Explorer 3 dan 4 serta Pioneer 3. Melalui eksperimen tersebut James Van

Allen seorang fisikawan Amerika mendeduksi adanya daerah berbentuk donat besar mengelilingi Bumi. Akibat medan magnet Bumi, partikel bermuatan berenergi tinggi terjebak di dalam suatu daerah dengan rentang lintang tertentu di sekeliling Bumi sehingga membentuk struktur seperti sabuk berbentuk donat. Dalam waktu singkat di awal era antariksa ditemukan adanya dua sabuk radiasi. Sabuk radiasi ini sering disebut sebagai sabuk Van Allen. Sabuk Van Allen yang letaknya lebih jauh dari permukaan Bumi sering disebut sebagai sabuk-radiasi-luar, dan yang lebih dekat disebut sabuk-radiasi-dalam. Sabuk-radiasi-luar berada pada jarak sekitar 13500–58000 km dari permukaan Bumi, sedangkan sabuk-radiasi-dalam terletak pada

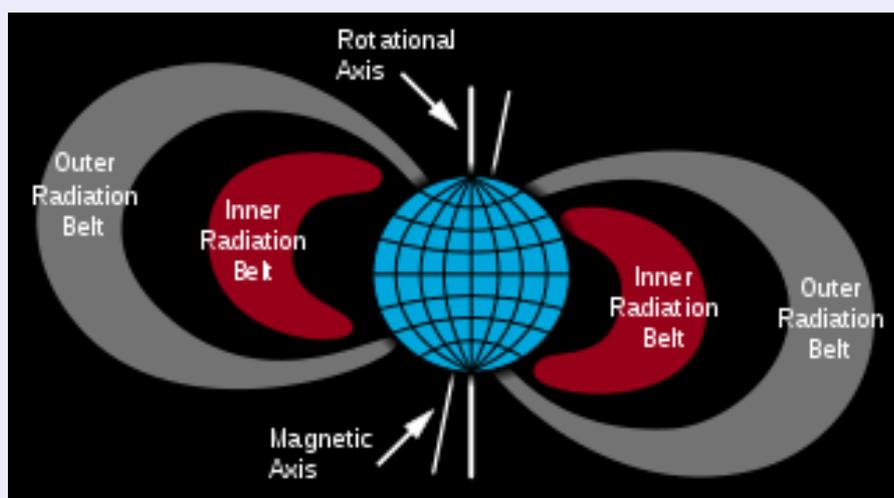
ketinggian sekitar 640–9600 km, lihat Gambar 1.

Ilustrasi sederhana pembentukan sabuk radiasi dapat dipahami sebagai berikut. Ketika partikel bermuatan berada di dalam ruang yang terisi oleh medan magnet maka partikel tersebut akan melakukan gerak dengan mengorbit titik tertentu pada suatu garis gaya medan magnet. Jika medan magnet di dalam ruang tersebut bersifat homogen maka pusat orbit partikel tidak berubah sepanjang waktu.

Perubahan pusat orbit partikel hanya bisa terjadi jika ada medan listrik atau garis gaya medan magnet bersifat lengkung atau terdapat ketidakhomogenan distribusi kuat medan magnet di dalam ruang tersebut. Gerak yang mengakibatkan perubahan pusat orbit ini dikenal sebagai gerak *drift* partikel bermuatan.

Sekalipun tanpa adanya medan eksternal, seperti medan magnet antarplanet, medan magnet Bumi memiliki distribusi latitudinal medan magnet tidak homogen, yaitu medan magnet paling lemah terjadi di sekitar ekuator magnetik dan dalam arah kutub medan magnet menjadi lebih kuat. Ketidakhomogenan ini mengakibatkan geometri garis gaya medan magnet Bumi menjadi lengkung. Jadi, sifat tersebut mengakibatkan partikel bermuatan mengalami gerak *drift* dalam arah latitudinal. Sebuah partikel bermuatan yang pada awalnya melakukan orbit di atas daerah ekuator, secara perlahan berpindah menuju kutub. Jadi, secara keseluruhan geometri lintasan partikel tersebut membentuk sebuah spiral.

Pertanyaan selanjutnya yang muncul jika dikaitkan dengan sifat garis gaya medan magnet Bumi yang berarah keluar



Gambar 1. Ilustrasi sabuk radiasi di antariksa Bumi

atmosfer/ionosfer dari kutub selatan dan masuk menuju Bumi dari kutub utara adalah apakah partikel bermuatan tersebut akan terus mengalami gerak *drift* arah latitudinal hingga mencapai ionosfer/atmosfer kutub?

Jawaban untuk hal ini bergantung pada sudut antara vektor kecepatan partikel dan medan magnet Bumi. Agar partikel bergerak dengan geometri spiral maka tentunya harus ada sebagian energi kinetik partikel yang digunakan untuk menghasilkan gerak *drift* dalam arah latitudinal atau gerak sejajar garis medan magnet, sedangkan energi kinetik dalam arah tegak lurus medan magnet digunakan untuk melakukan gerak melingkar. Proporsi energi kinetik dalam kedua arah tersebut ditentukan oleh besar sudut antara vektor kecepatan partikel dan medan magnet. Ketika partikel bermuatan bergerak ke arah kutub maka partikel tersebut memasuki medan magnet yang lebih kuat, mengakibatkan kecepatan dalam arah sejajar medan magnet menjadi lebih kecil. Jika partikel tersebut mencapai atmosfer/ionosfer kutub sebelum kehabisan energi kinetiknya dalam arah sejajar garis medan, maka partikel itu akan bertumbukan dengan

partikel-partikel atmosfer/ionosfer dan terserap oleh atmosfer/ionosfer kutub. Akan tetapi, jika partikel itu kehabisan energi kinetik dalam arah sejajar medan magnet maka titik ketika energi kinetik partikel tersebut menjadi nol membentuk semacam titik cermin yang dikenal dengan sebuah titik cermin magnetik. Pada titik cermin ini partikel tersebut dipantulkan balik menuju arah ekuator. Dorongan akibat melakukan pantulan pada titik cermin magnet ini menciptakan kecepatan arah sejajar medan magnetik yang kecil. Karena dalam arah menuju ekuator partikel bergerak menuju medan magnet lebih lemah maka perlahan-lahan kecepatan dalam arah sejajar medan magnet menjadi lebih besar hingga mencapai ekuator dan kembali memasuki daerah dengan medan magnet kuat ke arah kutub. Proses ini berulang secara terus-menerus mengakibatkan ada partikel-partikel yang hanya melakukan gerak bolak-balik di antara dua titik cermin magnetik.

Partikel bermuatan dengan gerak bolak-balik di antara dua titik cermin dikatakan terjebak dalam medan magnet Bumi. Pertanyaan selanjutnya, jika partikel

bermuatan itu hanya terjebak pada garis gaya medan magnet tertentu, mengapa geometri partikel terjebak dalam medan magnet berbentuk seperti sebuah donat? Ilustrasi sederhana untuk pertanyaan ini adalah sebagai berikut. Jika medan magnet bersifat homogen dalam arah longitudinal maka partikel akan tetap berada pada meridian yang tetap. Akan tetapi, pada kenyataannya medan magnet Bumi juga tidak bersifat homogen dalam arah longitudinal. Bukti mengenai hal ini adalah lokasi kutub magnetik tidak bertepatan dengan kutub geografik dan garis ekuator magnetik juga tidak berimpit dengan ekuator geografik. Seperti halnya ketidakhomogenan medan magnet dalam arah latitudinal, ketidakhomogenan longitudinal ini juga menciptakan *drift* dalam arah longitudinal. *Drift* longitudinal ini secara perlahan-lahan akan mengakibatkan posisi orbit partikel bermuatan dalam arah longitudinal berubah. Gerak *drift* longitudinal ini terus menerus berlangsung hingga secara perlahan akhirnya sebuah partikel dapat mengelilingi Bumi. Arah perpindahan longitudinal partikel bermuatan bergantung pada jenis muatan partikel tersebut. Partikel bermuatan positif akan mengalami *drift* longitudinal menuju timur sedangkan partikel bermuatan negatif menuju barat.

Dari ilustrasi sederhana ini dapat dikatakan bahwa sebuah kumpulan partikel dengan struktur sabuk secara natural akan terbentuk di antariksa Bumi. Sabuk alamiah ini cenderung bersifat stabil dan terjadi secara permanen. Jika kumpulan partikelnya pada sabuk partikel bermuatan sedikit, akan terlihat

tipis dan mungkin tidak membentuk sabuk sempurna yang mengelilingi Bumi. Kerapatan partikel bermuatan di antariksa Bumi mengalami penurunan terhadap pertambahan jarak dari permukaan Bumi. Jadi sabuk partikel lebih berpeluang terbentuk pada daerah dengan ketinggian rendah dibandingkan daerah berketinggian tinggi. Oleh karena materi di antariksa berada dalam keadaan plasma maka mengikuti sifat plasma, sabuk partikel dapat terbagi berdasarkan jenis partikel penyusunnya. Dewasa ini diketahui terdapat sabuk proton dan elektron. Sabuk ini terbentuk di daerah magnetosfer bagian-dalam yang letaknya pada ketinggian rendah. Keberadaan sabuk proton dan elektron ini terjadi karena komposisi partikel di magnetosfer didominasi oleh proton dan elektron. Jadi hal yang wajar jika terbentuk sabuk proton dan bukan sabuk ion positif lainnya. Ungkapan sabuk-radiasi-luar dan sabuk-radiasi-dalam berkaitan dengan sabuk elektron. Posisi sabuk proton dan sabuk-radiasi-dalam kadang kala hampir berada pada ketinggian yang sama sehingga dapat ditinjau sebagai satu kesatuan.

Ungkapan radiasi dalam sabuk radiasi secara khusus digunakan untuk menyatakan bahwa partikel bermuatan memiliki energi tinggi. Kumpulan partikel dengan energi rendah dapat saja membentuk daerah dengan struktur sabuk, tetapi partikel energi rendah tidak dapat menciptakan radiasi sehingga struktur sabuk yang demikian tidak disebut sebagai sabuk radiasi. Partikel-partikel plasma baik yang bersumber dari ionosfer ataupun *plasmashet* di

magnetotail memiliki energi sangat rendah untuk dapat menciptakan radiasi. Oleh karena sumber utama penyedia partikel bermuatan di magnetosfer adalah kedua daerah tersebut maka diperlukan suatu mekanisme energisasi atau pemanasan agar partikel sumber itu dapat menciptakan radiasi.

Proses energisasi sabuk proton sehingga memenuhi kriteria sebagai sabuk radiasi hampir dipastikan terkait dengan CRAND (*Cosmic Ray Albedo Neutron Decay*). Interaksi antara sinar kosmis yang berasal dari galaksi yang memiliki energi dalam orde giga elektron-volt dengan atom netral di atmosfer-atas dapat menciptakan proton dengan energi dalam rentang puluhan mega elektron-volt hingga giga elektron-volt. Interaksi ini menghasilkan neutron albedo energetik yang selanjutnya meluruh menjadi proton, elektron dan anti-neutrino. Sebagian besar dari energi kosmis galaksi tersebut terserap dan dikonversi menjadi energi proton serta kelebihan energinya dipancarkan dalam bentuk radiasi. Proton yang tercipta ini kemudian melakukan gerak *drift* dalam arah latitudinal dan longitudinal, dan sejumlah di antaranya terjebak di antara dua titik cermin magnetik. Pertanyaan kita adalah, mengapa sabuk radiasi ini hanya menempati daerah lintang rendah? Ilustrasinya adalah sebagai berikut. Pada daerah ketinggian rendah, titik-titik potong garis medan magnet Bumi berada pada daerah lintang rendah. Titik potong ini sering disebut invarian latitudinal garis medan (Gambar 2). Jadi, garis medan magnet akan berada di sekitar atmosfer-atas atau ionosfer. Konsekuensinya, jika

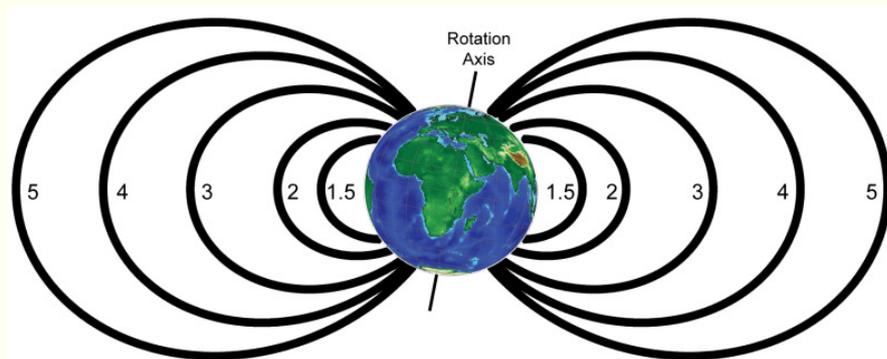
terbentuk titik cermin magnetik maka titik cermin tersebut berada pada daerah lintang rendah. Dengan demikian, sabuk yang terbentuk juga hanya menempati daerah lintang rendah sekitar ekuator magnetik. Proses energisasi khusus juga diperlukan untuk pembentukan sabuk radiasi elektron.

Telah disebutkan bahwa terdapat dua sabuk radiasi elektron yaitu sabuk-radiasi-dalam dan sabuk-radiasi-luar.

Sabuk-radiasi-dalam berada di daerah magnetosfer-dalam, sedangkan sabuk-radiasi-luar berada di magnetosfer-luar. Skenario pembelahan dua sabuk radiasi elektron ini dapat digambarkan sebagai berikut. Andaikan ada partikel bermuatan dengan pusat orbit tetap pada suatu ketinggian tertentu di atmosfer atas/ionosfer. Jika medan magnet pada ketinggian itu tetap maka partikel tersebut akan melakukan orbit pada ketinggian tetap. Akan tetapi, jika medan magnet mengalami perubahan maka ketinggian orbit partikel akan mengalami pergeseran sebagai kompensasi dari energi partikel tersebut.

Ketika medan magnet menjadi lemah maka partikel tersebut akan bergerak dalam arah radial menjauhi Bumi. Telah disebutkan dalam ilustrasi sebelumnya bahwa dalam kenyataannya medan magnet Bumi tidak homogen dan memiliki medan paling lemah di ekuator.

Elektron-elektron yang melakukan gerak spiral antara titik cermin magnetik akan melewati daerah ekuator medan magnetnya lebih rendah. Oleh karena itu, secara alamiah pada saat bergerak mendekati ekuator, elektron-elektron dengan energi lebih tinggi akan mengalami transpor dalam arah radial



Gambar 2. Invarian latitudinal garis medan magnet Bumi

menuju ketinggian lebih tinggi. Dengan berjalannya waktu, secara perlahan sabuk radiasi elektron akan terbelah menjadi dua bagian. Yang memiliki energi lebih tinggi akan menempati garis medan yang memiliki jarak ekuatorial lebih jauh dari permukaan Bumi.

Elektron pada sabuk-radiasi-dalam dapat mempertahankan energinya terhadap hamburan gelombang mode *whistler* atau *hiss* plasmasferis dalam waktu yang lama, bahkan dapat mencapai usia hidup sekitar 1 tahun. Jadi, walaupun proses transpor radial berlangsung lambat namun dengan usia hidup yang demikian panjang memungkinkan proses transpor dapat terjadi terus-menerus untuk mendukung terpeliharanya sabuk-radiasi-luar. Selain mendapat dukungan dari sabuk-radiasi-dalam, populasi elektron sabuk-radiasi-luar dapat berasal dari sumber eksternal pada ketinggian lebih jauh. Misalnya, elektron yang berada pada jarak sekitar 40000 km dari permukaan Bumi yang waktu hidupnya cukup pendek, yaitu orde harian. Selain itu juga terdapat sumber populasi elektron lain pada ketinggian sekitar 20000 km yang memiliki waktu hidup mingguan hingga bulanan. Sumber-sumber ini disertai dengan proses transpor sebagai penyebab utama

terpeliharanya populasi elektron sabuk-radiasi-luar.

Pada kondisi tertentu ketika terjadi persambungan garis medan magnet Bumi dengan medan magnet antarplanet, geometri medan magnet Bumi hingga pada ketinggian tertentu akan memiliki geometri terbuka. Istilah geometri terbuka digunakan untuk menyatakan kondisi ketika hanya salah satu ujung garis medan magnet Bumi berada di Bumi, sedangkan ujung lainnya tersambung dengan garis medan antarplanet. Dalam rentang waktu selama medan magnet Bumi memiliki geometri terbuka, plasma angin surya yang berada pada pada garis medan dengan konfigurasi tersebut akan dipandu menuju kutub-kutub Bumi. Ini berarti bahwa dalam waktu tersebut terjadi peningkatan populasi partikel bermuatan di magnetosfer Bumi karena peristiwa yang mengakibatkan medan magnet Bumi berkonfigurasi terbuka pada umumnya disertai oleh meningkatnya kerapatan angin surya di sekeliling Bumi. Konfigurasi terbuka ini tidak berlangsung lama, dan garis medan magnet Bumi yang terputus akan kembali menutup sehingga mengakibatkan partikel-partikel bermuatan tadi melakukan gerak bolak-balik di dalam medan magnet pada ketinggian tinggi. Sebagian besar

partikel tambahan ini terjebak di dalam titik cermin magnetik karena terjadi perubahan geometri garis medan yang awalnya tidak begitu lengkung pada saat memiliki konfigurasi terbuka dibandingkan saat konfigurasi tertutup. Titik cermin magnetik dari partikel-partikel tambahan ini dapat bervariasi dan hanya dapat mencapai titik cermin pada daerah lintang tengah. Dengan demikian, hal ini mengakibatkan terbentuknya sabuk partikel pada ketinggian tinggi.

Pada saat yang sama ketika terjadi konfigurasi terbuka, medan magnet mengalami pelemahan. Akibat pelemahan ini, elektron pada ketinggian rendah akan mengalami transpor radial menjauhi Bumi. Akibatnya kerapatan elektron mengalami peningkatan dan daerah magnetosfer yang terisi oleh sabuk elektron terlihat menjadi lebih besar dan mengembang. Kondisi ini dapat bertahan hingga beberapa hari bergantung seberapa cepat medan magnet Bumi mengalami pemulihan. Selama proses pemulihan medan magnet Bumi perlahan-lahan mengalami penguatan dan hal ini disertai oleh transpor elektron ke arah Bumi. Peristiwa pelemahan medan magnet selama konfigurasi terbuka ini berkaitan dengan apa yang disebut badai magnet. Jadi, peristiwa mengembang dan mengerutnya ukuran sabuk elektron berkaitan dengan fase ekspansi dan fase pulih badai magnet.

Di antara dua sabuk radiasi elektron terdapat sebuah daerah yang disebut *slot-region*. Pada kondisi tenang, daerah ini hanya sedikit ditempati oleh populasi elektron. Namun, selama badai magnet berlangsung, *slot-region*

terisi oleh elektron dan kembali normal setelah badai magnet berakhir. Peningkatan jumlah partikel pada *slot-region* selama badai magnet tersebut adalah konsekuensi dari peningkatan transpor radial difusif akibat pelemahan medan magnet selama badai.

Sejauh ini hanya dijelaskan bagaimana sabuk elektron terbentuk. Namun, sekali lagi, ungkapan radiasi mengindikasikan bahwa elektron tersebut memiliki energi cukup tinggi sehingga dapat memancarkan radiasi. Umumnya kondisi energi yang harus terpenuhi agar sabuk elektron tersebut memenuhi kriteria sebagai sabuk radiasi adalah elektron dengan energi relativistik. Jadi, harus ada suatu mekanisme percepatan dan pemanasan partikel agar dapat mencapai energi relativistik. Dari mana pun elektron tersebut berasal, mekanisme percepatan atau energisasinya mutlak diperlukan. Sejak awal penemuan sabuk radiasi, penelitian dan pemodelan skenario energisasi dan percepatan elektron untuk membentuk sabuk radiasi telah banyak dilakukan. Berbagai cara seperti mekanisme interaksi gelombang dengan elektron telah dikemukakan untuk menjelaskan bagaimana sabuk-radiasi-luar terbentuk. Hal ini masih merupakan topik hangat yang diperdebatkan oleh para peneliti sabuk radiasi.

Upaya untuk memahami sabuk radiasi sangat penting karena sebagian besar satelit yang digunakan untuk menopang kehidupan manusia mengorbit pada ketinggian sabuk radiasi elektron. Peningkatan energi dan jumlah populasi elektron relativistik di dalamnya dapat

berdampak pada piranti elektronik satelit maupun pesawat antariksa. Oleh karena itu, pemahaman mengenai sifat-sifat sabuk radiasi, kapan sabuk radiasi tersebut mengembang atau mengerut, berapa lama peristiwa itu terjadi, sangat diperlukan untuk mencegah terjadinya kerusakan. Untuk meningkatkan pengetahuan mengenai sabuk radiasi, sejumlah satelit telah diluncurkan untuk merekam fluks partikel pada ketinggian sabuk-radiasi-luar.

Pada tahun 2012, diluncurkan Van Allen Probe dengan tujuan untuk meningkatkan pemahaman dan untuk melengkapi teori yang telah dibangun selama sekitar 50 tahun sejak penemuan sabuk radiasi. Namun, terjadi hal mengejutkan pada awal pengamatan Van Allen Probe. Satelit tersebut mengamati adanya sabuk radiasi baru yang merupakan sabuk radiasi ketiga dan tidak pernah teramati sebelumnya. Penemuan sabuk radiasi ketiga ini bertepatan dengan kejadian badai matahari besar yang menimbulkan tsunami di antariksa Bumi karena pada saat yang bersamaan teramati adanya gelombang ULF besar yang menjadi faktor utama proses energisasi elektron dalam tinjauan interaksi gelombang-partikel. Penemuan ini akhirnya mengharuskan para ilmuwan sains antariksa untuk merevisi kembali teori dan model yang telah dikembangkan sebelumnya. Pertanyaan yang selanjutnya muncul adalah apakah benar ada dua sabuk radiasi elektron ataukah hanya satu saja? Hal ini masih menjadi permasalahan yang belum diketahui jawabannya.