

ASTROFISIKA

# Observasi dan Teori Flare

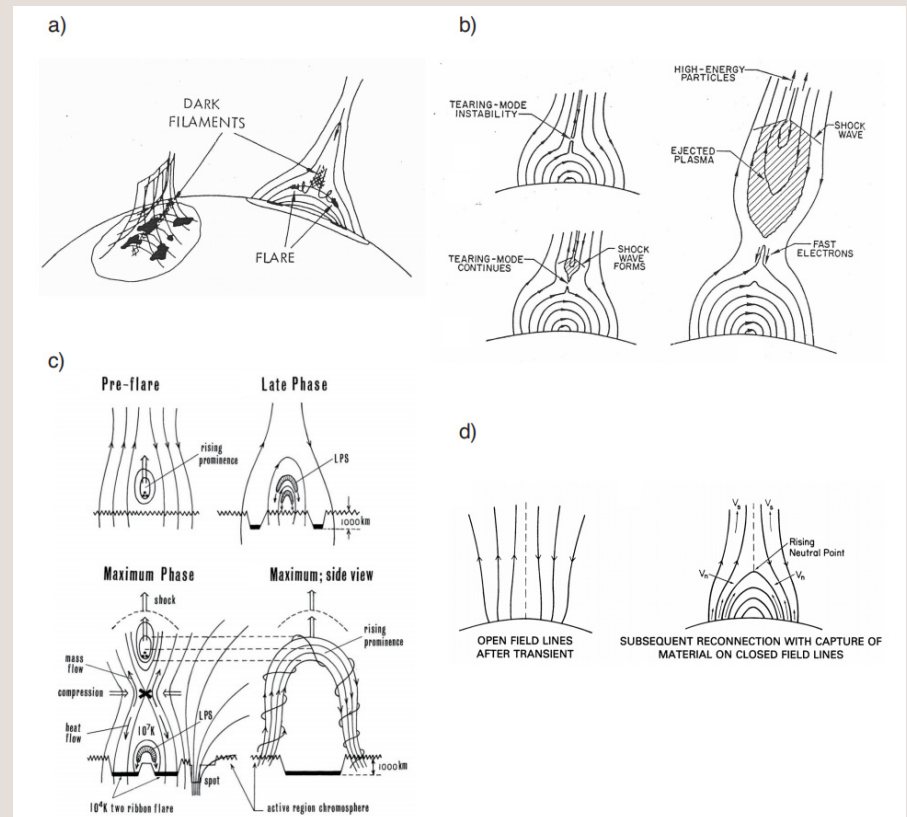
Oleh

M.Z. Nurzaman | Pussainsa LAPAN

**F**lare merupakan fenomena eksplosif di atmosfer Matahari yang penuh dengan plasma termagnetisasi. Flare melepaskan sekitar  $10^{28}$ – $10^{32}$  erg energi dalam berbagai bentuk, seperti energi radiasi, energi kinetik, energi termal, dan nontermal. Sejak pertama kali teramati pada abad ke-19, flare telah menjadi target saintifik paling menarik dalam fisika Matahari. Flare paling kecil mempunyai ketinggian *loop flare* sekitar  $10^4$  km dan yang paling besar sekitar  $10^5$  km. Ukuran tersebut berpengaruh juga terhadap durasi flare ( $10^3$ – $10^4$  s) dan jumlah energi yang dilepaskannya.

Flare dapat teramati dalam rentang panjang gelombang elektromagnetik yang lebar, mulai dari radio, cahaya tampak, sinar-X, hingga sinar gamma. Emisi pada panjang gelombang tersebut berasal dari lapisan atmosfer yang membentang dari kromosfer hingga korona. Untuk kasus ekstrem, bahkan permukaan Matahari (fotosfer) pun dapat merespon adanya flare yang teramati sebagai peningkatan kecerlangan pada cahaya tampak. Flare juga menghasilkan partikel energi tinggi yang menjalar ke ruang antarplanet dan terkadang menimbulkan kerusakan pada lingkungan di sekitar Bumi.

Flare pertama kali teramati tanpa sengaja pada panjang gelombang cahaya tampak oleh Carrington dan Hodgson pada tahun 1859. Setelah dikembangkannya



**Gambar 1.** Model flare berdasarkan rekoneksi magnetik. Garis medan magnet digambarkan oleh garis berpanah. (a) Carmichael (1964), (b) Sturrock (1966), (c) Hirayama (1974), (d) Kopp dan Pneuman (1976)

spektroheliograf dan ditemukannya filter H-alfa, flare dapat diamati pada panjang gelombang H-alfa. Sebuah citra flare menggunakan filter H-alfa monokromatik sering menunjukkan pola dua pita (*ribbon*) terang yang indah dan jarak antarpita ini akan semakin jauh seiring berjalannya waktu. Selama beberapa puluh tahun, flare diyakini merupakan fenomena yang terjadi di kromosfer dan teramati pada panjang gelombang H-alfa. Namun, sejak ditemukannya gelombang radio di korona dan emisi sinar-X dari daerah flare, ternyata flare merupakan fenomena yang juga terjadi di korona.

Pada tahun 1908, Hale menemukan medan magnet di

bintik Matahari. Sejak saat itu, penelitian tentang pengaruh medan magnet terhadap aktivitas Matahari semakin intensif dilakukan. Misi Skylab (1973–1974) berhasil mengungkap hubungan antara daerah terang dalam sinar-X lunak dengan intensitas medan magnet. Saat ini, kita percaya medan magnet merupakan sumber utama dari aktivitas Matahari termasuk flare.

Dari ranah teoritis, para peneliti lebih serius mempelajari peranan medan magnet sebagai sumber flare setelah terungkapnya fakta-fakta sifat flare dari pengamatan. Giovanelli (1946) menemukan bahwa titik netral saat medan magnet mempunyai konfigurasi tipe X dapat menjadi tempat pelepasan energi selama

terjadinya *flare*. Dia juga mengusulkan bahwa arus listrik dapat terdisipasi pada titik netral tersebut. Pada tahun 1949, Hoyle menawarkan ide serupa tentang mekanisme untuk menghasilkan *flare*. Sekarang, fenomena ini lebih dikenal sebagai rekoneksi magnetik. Namun, ada kendala saat menjelaskan skala waktu kejadian *flare* jika hanya mengasumsikan *flare* terjadi karena difusi sederhana dari medan magnet (tidak ada kontribusi dari aliran plasma). Skala waktu difusi medan magnet memakan waktu lebih lama dari skala waktu terjadinya *flare* di korona yang mempunyai temperatur plasma dan skala panjang medan magnet yang tinggi. Untuk memperkecil perbedaan skala waktu tersebut, skala spasial dari area difusi harus diperkecil. Namun, jumlah energi yang dilepaskan selama *flare* tidak dapat dijelaskan oleh model dengan skala spasial kecil.

Beberapa tahun kemudian, Sweet (1958) dan Parker (1957) menawarkan model rekoneksi magnetik yang mempertimbangkan aliran plasma. Model rekoneksi ini dikenal dengan sebutan rekoneksi Sweet-Parker, tetapi model ini juga belum berhasil menjawab skala waktu *flare*. Masalah skala waktu *flare* ini perlahan mulai terjawab oleh Petschek (1964). Petschek mengemukakan ide tentang rekoneksi magnetik cepat dengan melibatkan gelombang kejut di dalam dinamika rekoneksi. Sejak saat itu, rekoneksi magnetik banyak dipercaya menjadi salah satu mekanisme terbaik untuk menjelaskan asal usul terjadinya *flare* meskipun teori fisiknya masih terus dipelajari. Beberapa model klasik asal-usul *flare* berdasarkan rekoneksi magnetik

telah diusulkan oleh Carmichael (1964), Sturrock (1966), Hirayama (1974), dan Kopp dan Pneuman (1976). Semua model tersebut kurang lebih mempunyai asumsi konfigurasi medan magnet dan proses dinamika yang mirip. Model-model tersebut disingkat menjadi model CSHKP (Gambar 1). Model CSHKP ini telah menjadi model standar asal-usul *flare*. Pemahaman fisis model rekoneksi magnetik masih belum sempurna. Oleh karena itu, beberapa peneliti, yakni Akasofu (1984) dan Melrose (1997) mengusulkan model antirekoneksi magnetik untuk menjelaskan asal-usul *flare*. Akan tetapi pengamatan dari luar Bumi seperti Yohkoh, SOHO, TRACE, RHESSI, dan Hinode telah membuktikan bahwa rekoneksi magnetik memang terjadi selama *flare* berlangsung.

Korona merupakan medium yang sangat konduktif sehingga pelepasan arus listrik menjadi tidak efektif. Hal ini mengindikasikan bahwa energi magnetik di korona akan cenderung disimpan daripada dilepaskan. Jika terus disimpan, energi magnetik akan terakumulasi di korona. Salah satu skenario yang diusulkan adalah energi magnetik dilepaskan melalui disipasi arus listrik dalam suatu daerah tipis mirip lembaran yang kerapatannya tinggi. Daerah lembaran tersebut disebut lembar-arus atau *current sheet*. Pelepasan energi magnetik disertai dengan rekoneksi medan magnet yang mengubah energi magnetik menjadi energi termal serta energi kinetik jet plasma. Pada peristiwa ini, diproduksi juga partikel energi tinggi. Hanya partikel tertentu saja yang dipercepat oleh energi elektromagnetik. Rekoneksi

magnetik mengubah topologi garis medan magnet serta mengakibatkan ketidakstabilan gaya. Akibatnya, terjadi perubahan struktur global magnetik. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa *current sheet* terbentuk secara spontan di korona. Medan magnet di korona dapat meregang melalui rekoneksi beruntun sehingga energinya berkurang, mencegah peningkatan monoton energi magnetik di korona.

Energi yang dilepaskan oleh proses rekoneksi berpindah dalam bentuk radiasi, konduksi termal, partikel energi tinggi, dan gumpalan plasma. Konfigurasi medan magnet secara signifikan mempengaruhi perpindahan energi tersebut. Sebagian energi yang dilepaskan berpindah ke bawah mengikuti alur garis medan magnet dalam bentuk konduksi termal dan partikel energi tinggi lalu memanaskan plasma di kromosfer. Proses ini menghasilkan pita H-alfa dan kernel sinar-X keras pada beberapa *flare* besar. Tekanan gas di daerah kromosfer ini juga meningkat sehingga plasmanya mengalir ke atas, ke daerah korona, melawan gaya gravitasi. Peristiwa ini disebut evaporasi kromosferik. Akibatnya, *loop* magnetik penuh dengan plasma panas (*hot plasma*). *Loop* ini teramati pada panjang gelombang sinar-X lunak sehingga sering disebut *loop* sinar-X lunak. Sebagian energi lainnya dilepaskan ke atas sebagai lontaran gumpalan plasma yang disebut *plasmoid*. Selama proses ini, partikel tertentu mengalami percepatan menjadi partikel nontermal berenergi tinggi. Semua proses pelepasan dan perpindahan energi sangat dinamis dan rumit. Oleh karena itu, simulasi numerik

akan sangat berguna untuk mendapatkan model yang lebih baik.

Medan magnet yang merupakan sumber energi *flare* berasal dari bawah fotosfer. Sebelum menampakkan diri di permukaan, medan magnet melewati zona konveksi yang merupakan plasma bertekanan tinggi yang bergerak secara konvektif. Oleh karena itu, medan magnet mungkin saja berbentuk tabung fluks yang memuntir. Saat tabung fluks tersebut muncul ke permukaan Matahari, tekanan gas yang menahannya menurun secara drastis, sehingga medan magnet menyebar secara cepat. Medan magnet yang muncul ke permukaan ini secara perlahan mengisi ruang yang besar di atmosfer Matahari lalu membentuk struktur magnetik. Medan magnet mengalami disipasi energi magnetik karena proses ini. Tidak semua energi mengalami disipasi. Sisanya tetap menjadi energi magnetik yang tersimpan dalam struktur magnetik sebagai medan yang sejajar dengan arus listrik dan tidak menghasilkan gaya Lorentz.

Energi tersebut dinamakan energi bebas. Selain itu, muncul juga distorsi pada struktur magnetik yang terlihat sebagai tabung fluks yang terpuntir dan/atau busur medan magnet yang tergeser. Pembentukan struktur magnetik yang terdistorsi penting untuk dipelajari karena terkait dengan waktu mulai peristiwa *flare*.

Sebelum terjadi *flare*, ada tanda-tanda atau prekursor yang dapat dipelajari. Salah satu prekursor yang penting adalah munculnya daerah magnetik baru dengan konfigurasi bipolar di sekitar bintik. Medan magnet dari daerah baru tersebut dapat berinteraksi dengan medan magnet eksis di korona untuk menghasilkan *flare*. Prekursor lainnya yang sering dipertimbangkan para peneliti adalah proses aktivasi atau erupsi filamen. Filamen terbentuk dari plasma yang relatif lebih dingin ( $T \sim 10^4$  K) lalu mengapung di korona yang berisi plasma yang lebih panas ( $T > 10^6$  K). Di dalam filamen, tekanan magnetik lebih mendominasi daripada tekanan gas karena filamen berada di korona yang merupakan plasma

dengan nilai beta-plasma (rasio tekanan gas terhadap tekanan magnetik) yang rendah. Saat terjadi ketidakseimbangan antara gradien tekanan magnetik, gaya magnetik, dan gaya gravitasi, kondisi di dalam filamen menjadi tidak stabil. Ketidakstabilan ini yang menjadi pemicu erupsi filamen, dan erupsi filamen dapat memicu terjadinya *flare*. Jika kita dapat mempelajari penyebab ketidakseimbangan ketiga gaya tersebut sehingga terjadi erupsi, maka kita dapat memperkirakan kapan terjadinya *flare*.

*Flare* sering dikaitkan dengan fenomena dinamis lainnya di Matahari, seperti erupsi filamen dan pelepasan massa korona atau *coronal mass ejection* (CME). CME merupakan peristiwa erupsi skala besar yang membawa banyak sekali plasma (hingga  $10^{16}$  g) menuju ruang antarplanet. Pada CME tertentu, *loop* magnetik seukuran radius Matahari terlepas dari Matahari dengan kecepatan 30–2500 km/detik, membentuk gelombang kejut pada bagian depan *loop*.

## LINGKUNGAN ANTARIKSA

# Berbagai Kerusakan Akibat Sampah Antariksa, Lalu Apa yang Bisa Dilakukan?

Oleh

A.D. Pangestu | Pussainsa LAPAN

Sampah antariksa atau *space debris* adalah sisa-sisa dari objek buatan manusia yang diluncurkan keluar angkasa (dalam orbit Bumi) yang sudah tidak berfungsi lagi, sehingga menjadi sampah yang perlu ditangani agar tidak mengganggu lingkungan dekat Bumi. Sampah antariksa biasanya berupa sisa wahana antariksa, sisa roket yang

dipakai untuk meluncurkan wahana antariksa, sampah yang berkaitan dengan misi antariksa (peralatan yang dilepaskan ketika proses peluncuran satelit), dan objek yang meledak di luar angkasa. Objek yang mengalami ledakan ini menjadi faktor dominan meningkatnya sampah antariksa di lingkungan dekat Bumi.

Fluks atau jumlah dari sampah antariksa bisa dilihat berdasarkan

ketinggiannya. Di orbit LEO (*Low Earth Orbit*) yakni orbit pada ketinggian 160 km hingga 1000 km di atas Bumi, satelit aktif dan sampah antariksa sangat padat. Sedangkan di ketinggian GEO (*Geostationary Orbit*) dengan ketinggian sekitar 36000 km di atas Bumi, fluks sampah antariksa lebih renggang. Ukurannya juga bervariasi, namun semakin kecil ukurannya, jumlahnya semakin banyak. Sampah antariksa yang