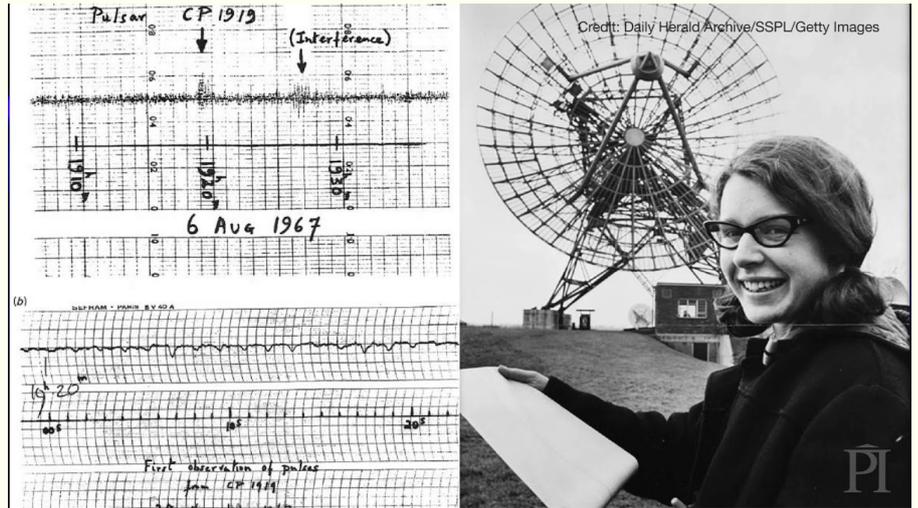


Salah satu penemuan terbesar dalam sejarah astronomi radio adalah kisah penemuan pulsar oleh Jocelyn Bell pada tahun 1967. Di bawah supervisi Anthony Hewish, Bell mengamati suatu objek yang menghasilkan pulsasi kuat dengan kecepatan teratur, sekitar 30 kali per detik. Objek itu kemudian dijuluki LGM-1, dari "Little Green Man" olehnya dan rekan-rekan karena tampak seperti alien. Meskipun demikian, Bell mencurigai bahwa itu adalah fenomena alam yang belum dapat dijelaskan.

Sinyal tersebut ternyata emisi radio dari benda asing yang disebut pulsar. Pulsar merupakan bintang neutron yang padat dari sisa reruntuhan ledakan supernova sebuah bintang masif. Pulsar berotasi dengan cepat, di mana sinyal pulsasi di setiap putaran dapat sampai ke Bumi secara periodik seperti seperti detak jam. Pulsar yang ditemukan berputar pada porosnya 30 kali per detik. Beberapa tahun kemudian, di tahun 1976, penemuan pulsar tersebut dianugerahi nobel fisika, namun malah diberikan pada Anthony Hewish dan rekannya. Bell tidak menyesal karena menghormati supervisornya dan kini telah mengajar di banyak tempat serta menerima banyak penghargaan. Saat ini, telah ditemukan lebih dari 2000 pulsar. Perkembangan sejarah telah



**Gambar 3.** Penemuan Pulsar Oleh Jocelyn Bell dengan teleskop radio di institusinya saat mengambil program doktor. (Sumber: <https://www.space.com/42219-jocelyn-bell-burnell-lecture-webcast.html>)

menuju ke sensitivitas yang lebih tinggi dengan panjang gelombang yang lebih pendek dan resolusi sudut yang lebih tinggi. Ini hal yang baru dalam pandangan astronomi yang memainkan peran utama dalam penelitian dibidang astronomi dan astrofisika. Hampir semua objek langit memancarkan gelombang radio pada tingkat tertentu melalui berbagai proses mekanisme emisi yang ada. Meskipun baru, sebagian besar penemuan penting tentang alam semesta terkini dihasilkan dari pengamatan dengan teleskop radio.

**Pustaka**

[1] Marr, J. M., Snell, R. L., & Kurtz, S. E. (2015). Fundamentals of Radio Astronomy. *Fundamentals*

*of Radio Astronomy.*  
<https://doi.org/10.1201/b20506>

[2] Wilson, T. L. (1997). Tools of radio astronomy. In *Choice Reviews Online* (Vol. 35, Issue 04).  
<https://doi.org/10.5860/choice.35-2078>

[3] Ernie Tretkoff. (2006) This Month in Physics History: February 1968: The Discovery of Pulsars Announced. *APS NEWS* Vol. 15, No. 2

[4] Mike Wall (2018). Pulsar Discoverer Jocelyn Bell Burnell Talks About Her Amazing Find: Watch Live Thursday

**ASTROFISIKA**

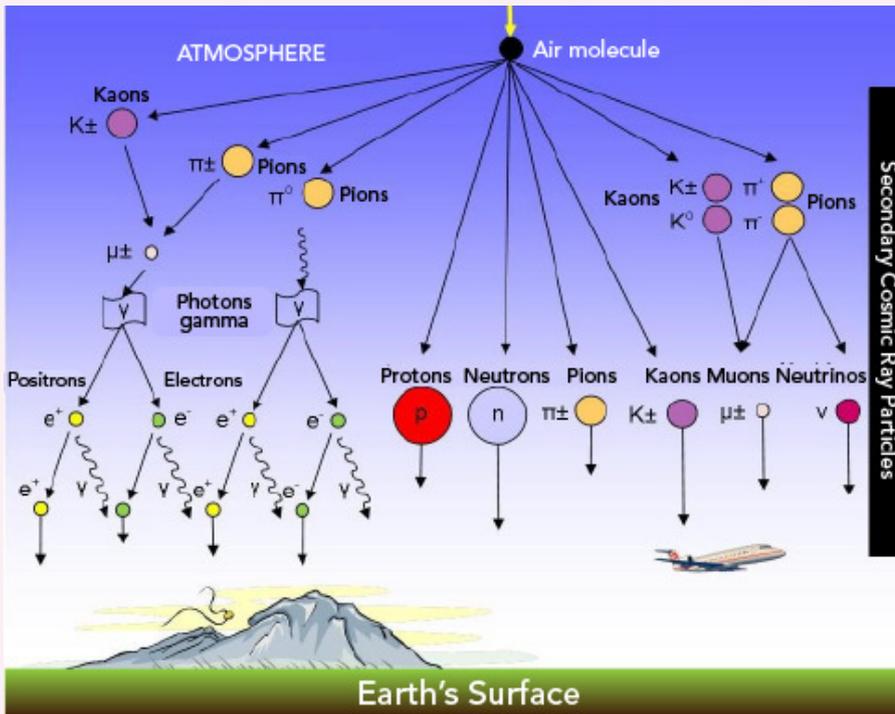
**Radiasi Sinar Kosmik di Bumi**

Oleh  
**R. Kesumaningrum** | Pussainsa OR-PA BRIN

**R**adiasi partikel energetik di Bumi yang berasal dari luar

angkasa dapat bersumber dari sinar kosmik galaksi dan Matahari. Sinar kosmik di Bumi yang berupa proton berenergi tinggi dan nuklei atom yang melintasi ruang angkasa dengan

kecepatan cahaya dapat berasal dari Matahari, luar tata surya dan dari galaksi yang jauh. Radiasi sinar kosmik yang dipancarkan dari Matahari merupakan fluks partikel berenergi tinggi berupa



**Gambar 1.** Ilustrasi interaksi sinar kosmik dengan atmosfer yang menghasilkan partikel sinar kosmik sekunder. (Sumber: What are Cosmic Rays? | Let's Talk Science (letstalkscience.ca))

elektromagnetik. Foton sinar gamma kemudian dapat menghasilkan elektron dan positron dan reaksi terjadi seterusnya (Gambar 1). Partikel sinar kosmik sekunder akan mengionisasi udara di sekitarnya dan diamati bahwa nilai ionisasi maksimum terjadi pada ketinggian sekitar 12–15 km di atas permukaan laut, yang dikenal sebagai Regener–Pfozter maksimum. Di bawah ketinggian tersebut, energi partikel semakin meluruh dari setiap interaksinya, sehingga hanya sebagian kecil dari partikel sinar kosmik sekunder yang mencapai permukaan Bumi.

Radiasi atmosfer terionisasi merupakan sumber utama paparan bagi manusia terhadap radiasi tinggi *linear energy transfer* (LET) dalam penerbangan komersial. Radiasi tinggi LET efektif dalam merusak DNA secara langsung dan menyebabkan kanker atau penurunan kesehatan lainnya yang dapat berakibat pada penurunan karir kru penerbang atau lainnya. Beberapa mekanisme yang dapat mencederai jaringan hidup ketika radiasi ini menyebabkan atom dan molekul terionisasi, terdisosiasi, atau tereksitasi yaitu, produksi radikal bebas, pecahnya ikatan kimia, produksi jaringan kimia baru dan persilangan makromolekul, dan kerusakan molekul yang mengatur proses vital sel seperti *deoxyribonucleic acid* (DNA), *ribonucleic acid* (RNA), dan protein. Meskipun suatu sel dapat memperbaiki kerusakan pada dosis rendah, yaitu yang mengalami paparan ambien dekat permukaan, pada dosis yang lebih tinggi sel tersebut dapat mati. Pada dosis yang sangat tinggi, sel tidak dapat digantikan dengan cepat

*solar particle event* (SEP) atau *proton event* yang dipercepat di korona dan kromosfer saat terjadi peningkatan energi ketika *flare* atau dari gelombang kejut lontaran massa korona (CME), meskipun hanya sekitar 1% CME yang mengakibatkan SEP kuat. Apabila sinar kosmik galaktik (*galactic cosmic rays*) bergantung kepada pola aktivitas Matahari 11 tahunan, GCR tidak akan mengalami perubahan dalam waktu yang singkat (hitungan hari atau minggu), sedangkan fluks SEP dapat secara tiba-tiba mengalami peningkatan karena adanya *flare* kuat dan kemudian dengan cepat menurun dalam beberapa jam hingga satu hari. Pada kasus yang ekstrem, fluks SEP dapat mencapai 100 hingga 1000 kalinya fluks GCR.

Angin Matahari dengan kecepatan 300-800 km/det berkaitan dengan proton berenergi 0,5–3 keV sedangkan proton pada SEP memiliki energi pada rentang ~10 keV hingga

~10 GeV. Peristiwa SEP yang ekstrem dapat mengakibatkan terjadinya peristiwa *ground level enhancement* (GLE). Peristiwa SEP juga dapat mempengaruhi infrastruktur teknologi dan manusia di luar angkasa, juga dapat meradiasi penumpang dan kru penerbang pada penerbangan komersial lintas kutub.

Pengukuran terhadap dosis radiasi yang diterima di Bumi akan dipengaruhi oleh sinar kosmik. Partikel bermuatan sinar kosmik primer yang terdiri atas proton, inti helium, dan inti berat lainnya memasuki atmosfer Bumi teratas (~100 km) dan berinteraksi dengan unsur netral (didominasi oleh  $N_2$  dan  $O_2$ ), menghasilkan partikel sekunder. Partikel sinar kosmik sekunder adalah proton, neutron, pion positif dan negatif, dan kaon positif dan negatif. Pion dan kaon kemudian meluruh menjadi muon dan neutrino. Setelah itu, pion juga meluruh menjadi foton sinar gamma yang merupakan radiasi

dan jaringan hidup gagal berfungsi normal (Kent *et al.*, 2016 dan referensi di dalamnya).

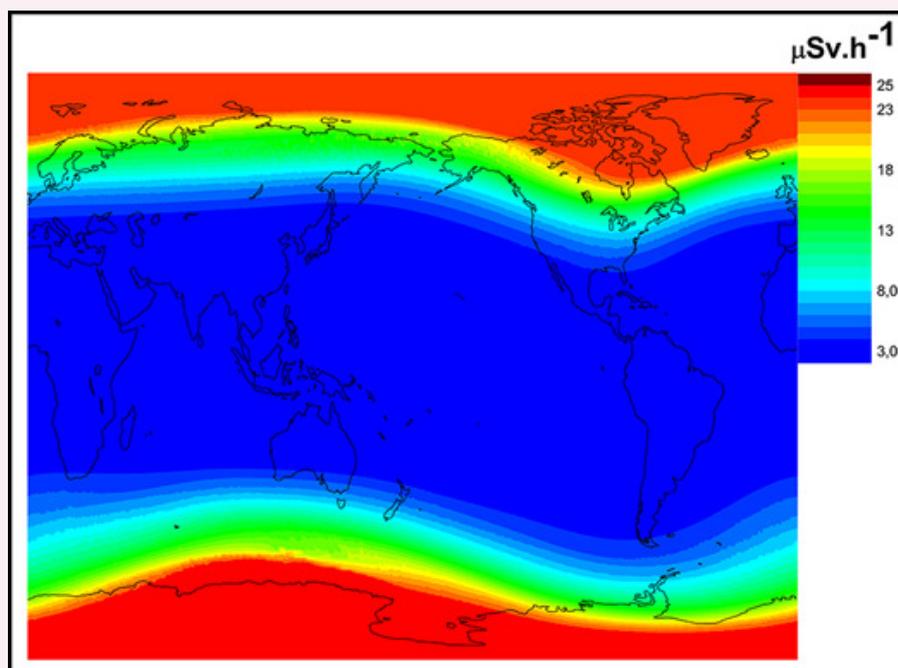
Terdapat dua metode untuk mendeteksi sinar kosmik, yaitu deteksi langsung sinar kosmik primer di ruang angkasa dan di ketinggian dengan instrumen yang dibawa balon. Kedua, deteksi tidak langsung pada partikel sekunder di landas Bumi. Salah satu instrumen yang mengukur sinar kosmik sekunder landas Bumi adalah neutron monitor. Salah satu basis data Neutron Monitor adalah NMDB: *Real-Time Database for high-resolution Neutron Monitor measurements*

(<https://www.nmdb.eu/nest/>). Pada basis data NMDB tersedia hasil pengukuran Neutron Monitor dari 27 stasiun di seluruh dunia. Hasil pengukuran sinar kosmik berupa *count rate*, yang menunjukkan fluks sinar kosmik di atmosfer Bumi. Data sinar kosmik kemudian dikoreksi terhadap kondisi atmosfer lokal, salah satunya terhadap tekanan.

### Pengukuran dosis radiasi sinar kosmik

Sinar kosmik diketahui dapat menembus pesawat penerbangan komersial. Pada ketinggian jelajah umumnya, pilot, awak kabin, dan penumpang menerima dosis 40 hingga 70 kali lebih tinggi dari dosis radiasi alami di permukaan Bumi. Semakin tinggi pesawat terbang, semakin tinggi dosis radiasi yang diterima. Dosis radiasi dinyatakan dengan satuan Sievert (Sv) dan umumnya diukur per satuan waktu per tahun ( $\mu\text{Sv}/a$ ) atau per jam ( $\mu\text{Sv}/h$ ).

Salah satu pengukuran dosis radiasi dalam penerbangan dilakukan Kent *et al.* (2016) yang mengukur dosis radiasi pada



**Gambar 2.** Peta dosis radiasi global pada ketinggian 40.000 kaki (12 kilometer) selama GLE 72 pada 10 September 2017. Satuan  $\mu\text{Sv}.h^{-1}$  artinya microsieverts per jam. (Mishev *et al.* (2018).

lintang magnetik rendah (*Equatorial Pacific*), menengah ( $50^\circ$  dan  $40^\circ$ ), dan tinggi (*Southern West Hemisphere*). Pengukuran dilakukan menggunakan instrumen dosimeter yang dipasang dalam pesawat terbang dan memancarkan sinyal secara *real time* ke permukaan Bumi. Ketika saat pengukuran tidak ada peristiwa *flare*, SEP, atau GLE yang sedang terjadi, maka akan diperoleh batas minimum dosis ambien di daerah ekuator magnetik untuk penerbangan jet bisnis setara dengan  $2 \mu\text{Sv}/h$  pada ketinggian 13,8–14,4 km atau sebesar  $1 \mu\text{Sv}/h$  untuk penerbangan komersial pada ketinggian yang rendah (11 km), sementara pada lintang magnetik tinggi adalah sebesar  $8 \mu\text{Sv}/h$ . Ketika ada peristiwa cuaca antariksa minor, dosis radiasi di lintang magnetik menengah adalah sebesar  $4\text{--}12 \mu\text{Sv}/h$ .

Hasil penelitian pengukuran dosis radiasi lainnya adalah Mishev *et al.* (2018) yang menghitung dosis

radiasi penerbangan saat peristiwa GLE. Peristiwa GLE terjadi ketika partikel SEP dari erupsi Matahari seperti *flare* dan CME mencapai atmosfer Bumi dan menghasilkan neutron sekunder yang terdeteksi sebagai peningkatan intensitas sinar kosmik secara tiba-tiba. Sejak awal pengukuran GLE pada tahun 1940-an, hanya 72 peristiwa yang tercatat, dimana pada tiap siklus Matahari 21 hingga 23, dicatat sekitar 13–16 peristiwa GLE. Mishev *et al.* (2018) menghitung tingkat dosis efektif di lintang tinggi menggunakan pemodelan numerik parameter proton Matahari (SEP) dan data jaringan neutron monitor global.

Dari hasil perhitungan Mishev *et al.* (2018), kontribusi SEP terhadap paparan total sebanding dengan kontribusi dari sinar kosmik galaksi, kecuali di ketinggian rendah. Pada permukaan Bumi, kontribusi SEP terhadap paparan total nilainya kecil karena merupakan spektrum yang lebih lemah daripada GCR.

Pada beberapa ketinggian jelajah pesawat, puncak kontribusi SEP terhadap paparan dosis radiasi ada pada rentang 20–24  $\mu\text{Sv}/\text{h}$  di ketinggian 50.000 kaki (15.200 m), 11–13  $\mu\text{Sv}/\text{h}$  di ketinggian 35.000 kaki (10.670 m), dan 10  $\mu\text{Sv}/\text{h}$  di ketinggian 30.000 kaki (9.100 m) di atas permukaan laut. Sementara perhitungan untuk penerbangan lintas kutub, awak pesawat dan penumpang akan menerima paparan radiasi sebesar 90  $\mu\text{Sv}$  dalam penerbangan Helsinki–Osaka dengan durasi 9 jam 30 menit di ketinggian 40.000 kaki, dan sebesar 110  $\mu\text{Sv}$  dari Helsinki ke New York dengan durasi 8 jam 40 menit di ketinggian yang sama.

Saat terjadi GLE lemah seperti GLE 72 pada tanggal 10 September 2017, batas atas paparan radiasi dalam satu penerbangan adalah sekitar 100  $\mu\text{Sv}$  untuk penerbangan 10 jam di ketinggian 40.000 kaki, dengan kontribusi dari GCR sekitar 60–65  $\mu\text{Sv}$ . Nilai tersebut jauh di bawah rata-rata paparan radiasi tahunan Amerika yakni 1 millisievert. Tetapi hasil pengukuran ini tetap di atas radiasi latar belakang yang biasa dan dapat menimbulkan risiko kesehatan kumulatif bagi awak pesawat dan pilot, yang sudah menerima kira-kira tiga kali lipat dosis radiasi rata-rata tahunan.

Penelitian mengenai pengaruh

SEP dalam dosis radiasi penerbangan juga dilakukan oleh *National Institute of Information and Communications Technology* (NICT), Jepang sebagai satu-satunya lembaga negara di Asia bagi pusat cuaca antariksa pada organisasi penerbangan sipil internasional atau *International Civil Aviation Organization* (ICAO) dan telah memberi layanan sejak 7 November 2019. Sistem yang dikembangkan oleh NICT bersama dengan the *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA), dan the *National Institute of Polar Research* (NIPR) adalah *WARning System for AViation Exposure to Solar energetic particles* (WASAVIES). Sistem tersebut dapat memperkirakan dosis radiasi yang diakibatkan oleh partikel energetik dari *flare* Matahari secara *real time*. Sistem ini juga dapat menghitung dosis radiasi hingga 100 km di atas permukaan tanah pada posisi di mana pun di Bumi dan memonitor dosis radiasi kru penerbang secara *real time*. (<https://www.nict.go.jp/en/press/2019/11/07-1.html>, Sato *et al.*, 2018).

**Pustaka**

[1] W. Kent Tobiska D. Bouwer D. Smart M. Shea J. Bailey L. Didkovsky K. Judge H. Garrett W. Atwell B. Gersey R. Wilkins D. Rice R. Schunk

D. Bell C. Mertens X. Xu M. Wiltberger S. Wiley E. Teets B. Jones S. Hong K. Yoon, 2016, Global real-time dose measurements using the Automated Radiation Measurements for Aerospace Safety (ARMAS) system, Volume14, Issue11, Pages 1053-1080. <https://doi.org/10.1002/2016SW001419>.

[2] Tatsuhiko Sato, Ryuho Kataoka, Daikou Shiota, Yūki Kubo, Mamoru Ishii, Hiroshi Yasuda, Shoko Miyake, In Chun Park, and Yoshizumi Miyoshi, 2018, Real Time and Automatic Analysis Program for WASAVIES: Warning System for Aviation Exposure to Solar Energetic Particle, Volume16, Issue7, July 2018, Pages 924-936, <https://doi.org/10.1029/2018SW001873>.

[3] Mishev A. L. , I. G. Usoskin, 2018, "Assessment of the Radiation Environment at Commercial Jet-Flight Altitudes During GLE 72 on 10 September 2017 Using Neutron Monitor Data." *Space Weather*, 16, 1921–1929. <https://doi.org/10.1029/2018SW001946>.

**ASTROFISIKA**

**Space Physics in a Nutshell**

Oleh

A. Faturahman | Pussainsa OR-PA BRIN

**A**pakah Fisika Antariksa Itu? Menurut definisi beberapa literatur, fisika antariksa (*space*

*physics*, dulu sering disebut sebagai *solar-terrestrial physics*) merupakan kajian yang mempelajari fenomena yang terjadi di lingkungan plasma alami tata surya. Lingkungan antariksa (*space environment*)

didefinisikan sebagai bagian dari lingkungan Bumi, mulai dari atmosfer atas, membentang beberapa puluh kali radius Bumi sampai dengan batas tepi tata surya. Lingkungan antariksa ini diisi oleh materi plasma, partikel