



The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Dua denyutan radio aneh di atas Antartika masih belum dapat dijelaskan — dan penjelasan “zarah baharu” semakin kehilangan sokongan

Dua denyutan radio luar biasa yang direkodkan bertahun-tahun lalu oleh eksperimen belon di Antartika masih belum mempunyai penjelasan yang dipersetujui; satu carian khusus oleh Pierre Auger tidak menemui kesan hujan zarah yang sepatutnya terhasil, menjadikan tafsiran eksotik tentang “zarah baharu” jauh kurang berkemungkinan sambil membiarkan anomali itu belum terungkai.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Search for the Anomalous Events Detected by ANITA Using the Pierre Auger Observatory*, Pierre Auger Collaboration, Physical Review Letters 134, 121003 (2025) · DOI: [10.1103/PhysRevLett.134.121003](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.121003)



48 antena ANITA dihalakan ke bawah ke arah ais Antartika pada sebuah gondola setinggi 25 kaki.

Christian Miki / University of Hawai'i at Mānoa fair-use assertion

Belon, ais, dan dua denyutan dari bawah

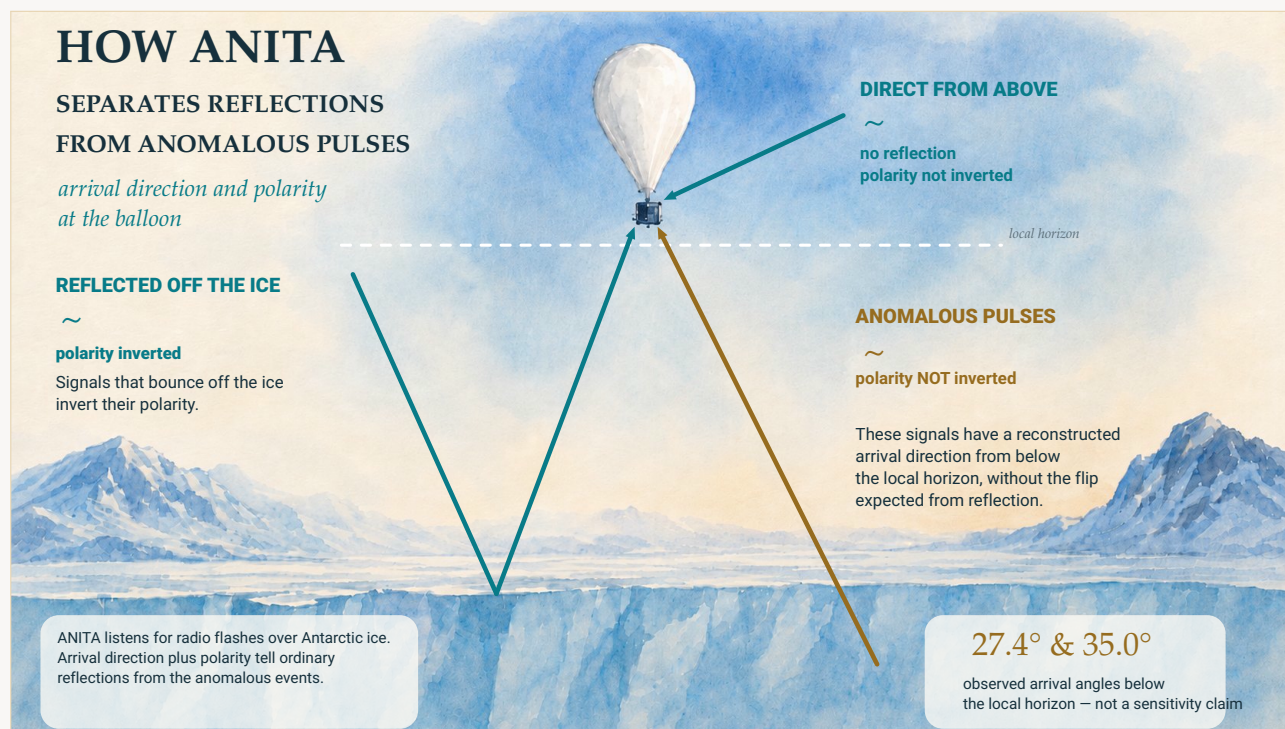
Sepanjang sebahagian besar tempoh operasinya, Antarctic Impulsive Transient Antenna — ANITA — tergantung di bawah belon NASA, pada ketinggian lebih tiga puluh kilometer, dan hanyut selama berminggu-minggu di atas tempat paling sunyi di Bumi sambil mendengar.

Apa yang didengarnya ialah isyarat radio dari angkasa. Apabila zarah bertenaga sangat tinggi — sinar kosmik atau neutrino — menghentam udara atau ais, ia pecah menjadi hujan zarah yang lebih kecil, dan hujan itu memancarkan kilatan radio yang singkat. Antartika hampir ideal untuk menangkapnya: berkilometer-kilometer ais yang bersih dan sejuk, yang boleh dilalui gelombang radio hampir seperti melalui kaca, dan tiada apa-apa untuk beratus-ratus kilometer yang boleh mengacau isyarat. Tugas ANITA ialah menangkap kilatan tersebut dan membaca daripada bentuk serta masanya apa yang menghasilkannya.

Kebanyakan yang didengarnya berkelakuan seperti yang dijangka. Seseengah kilatan tiba terus dari atas. Banyak lagi menyentuh ais pada sudut cetek lalu memantul kembali ke antena — dan pantulan

ini membawa satu petunjuk jelas: pantulan membalikkan gelombang (pembalikan *polariti* isyarat), satu tanda yang boleh dikenali ahli fizik dengan segera. Itulah cara membezakan pantulan daripada isyarat yang datang terus.

Dua kali, sesuatu tiba yang melanggar corak itu.



Pada belon, denyutan yang datang terus dari atas tiba tanpa dibalikkan, manakala denyutan terpantul tiba dengan polaritinya terbalik — tanda biasa pantulan pada ais. Dua denyutan aneh itu sebaliknya tiba dari arah yang *dibina semula* sebagai curam di bawah ufuk tempatan — tetapi tanpa pembalikan tersebut, manakala pantulan sepatutnya membalikkannya. “Dari bawah” menerangkan arah ketibaan yang dibina semula itu — bukan zarah yang memanjat keluar dari Bumi.

Original hybrid diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Dalam satu penerbangan pada 2006 dan satu lagi pada 2014, ANITA menangkap satu denyutan dari arah curam *di bawah* ufuk — masing-masing 27.4° dan 35.0° di bawahnya — seolah-olah ia naik keluar dari benua, tetapi *tanpa* pembalikan. Jadi, bukan pantulan. Sesuatu yang benar-benar bergerak ke atas, keluar dari ais, menuju belon.

Inilah sebabnya perkara itu hampir mengejutkan. Untuk sampai ke antenna pada sudut menaik yang begitu curam, apa sahaja yang menghasilkan denyutan itu perlu datang menembusi badan planet — enam atau tujuh ribu kilometer batuan pepejal. Hampir tiada apa yang mampu melakukannya. Satu zarah yang diketahui boleh melalui bahan biasa seolah-olah bahan itu hampir tiada ialah neutrino, yang boleh merentasi seluruh Bumi hampir tanpa berinteraksi — maka idea yang semula jadi ialah neutrino bergerak naik melalui batuan, menghentam atom tepat di bawah ais, lalu menghasilkan hujan zarah yang meluru ke atas dan memancarkan kilatan radio yang ditangkap ANITA. Masalahnya mempunyai satu kelainan: neutrino yang cukup bertenaga untuk menghasilkan isyarat *sebegini* sebenarnya terlalu mudah untuk dihentikan. Merentasi batuan sebanyak itu, ia sepatutnya diserap berkali-kali. Dan aliran neutrino yang cukup kuat sehingga dua daripadanya masih berjaya menem-

busi Bumi sepatutnya turut muncul dalam pengesan gergasi yang dibina khusus untuk menangkapnya. Tiada satu pun penjelasan yang kemas benar-benar menutup kes ini.

Maka dua denyutan itu terus berada di situ, enggan berkelakuan seperti yang dijangka. Bukan penemuan — dua peristiwa tidak pernah cukup untuk menjadi penemuan — tetapi bukan juga tiada apa-apa. Satu anomali sebenar: menarik tepat kerana belum ada sesiapa yang dapat mengatakan sama ada ia retakan dalam Model Piawai fizik atau sekadar keanehan ais, antenna, atau pengiraan.

Di sinilah jenis liputan tertentu mula menggunakan perkataan *misteri*, meredupkan lampu, lalu bertanya apa yang mungkin hidup di bawah Antartika. Jangan ikut serta. Soalan sebenar tidak pernah berbunyi *raksasa apa yang berada dalam ais?* Ia ialah soalan sabar dan tidak glamor yang benar-benar menggerakkan sains ke hadapan: **bagaimana hendak mengetahuinya?**

Apa yang dilakukan oleh para penulis

Ada cara yang jelas untuk menguji penjelasan yang paling menarik. Jika denyutan ANITA datang daripada fluks sebenar dan berulang bagi hujan zarah yang bergerak ke atas — sama ada daripada tau-neutrino biasa atau daripada zarah baharu yang dicadangkan — maka pengesan yang cukup besar dan memerhati tepat jenis peristiwa itu sepatutnya menangkap sebahagiannya.

Pierre Auger Observatory di Argentina — pengesan sinar kosmik terbesar yang pernah dibina — berada dalam kedudukan yang baik untuk mengujinya. Menggunakan Fluorescence Detector, kolaborasi itu mencari hujan udara yang bergerak ke atas (tiba dari bawah, pada sudut zenit melebihi 110° dan tenaga melebihi 0.1 EeV) dalam data dari 2004 hingga 2018. Yang penting, keseluruhan kriteria pemilihan ditetapkan *sebelum* set data lengkap diperiksa — analisis “buta”, supaya jawapan tidak boleh diubah suai untuk mendekati hasil yang dijangka.

Apa yang mereka temui

Selepas analisis dinyahbuta, **satu** peristiwa calon kekal — sepenuhnya konsisten dengan 0.27 ± 0.12 peristiwa yang dijangka daripada sinar kosmik biasa yang kadang-kadang dibina semula secara salah sebagai bergerak ke atas. Dengan kata lain, tiada isyarat sebenar yang bergerak ke atas; hanya sedikit latar belakang seperti yang memang dijangka.

Kekuatan hasil ini terletak pada perbandingan. Jika denyutan ANITA datang daripada fluks tetap hujan zarah yang bergerak ke atas, Auger sepatutnya merekodkan **banyak** peristiwa — kira-kira 34 hingga 69 untuk satu spektrum tenaga yang munasabah, dan sekurang-kurangnya sekitar 8 walaupun dengan andaian yang sengaja dibuat konservatif. Ia menemui satu, konsisten dengan latar belakang. Para penulis menyifatkannya sebagai “percanggahan kuat” dengan tafsiran hujan zarah yang bergerak ke atas.

Apa yang mungkin dimaksudkan oleh hasil ini

Ketiadaan pengesanan sebesar ini memberikan maklumat. Jika peristiwa ANITA datang daripada populasi zarah sebenar yang tiba dari arah tersebut — tau-neutrino biasa, atau zarah baharu hipotetikal yang dicadangkan untuk menerangkannya — tempoh pemerhatian Auger yang panjang sepatutnya menangkap jumlah yang besar. Ia tidak berlaku. Ini secara berkesan menolak penjelasan “fluks meresap hujan zarah yang bergerak ke atas” — kategori yang merangkumi kebanyakan idea di luar Model Piawai — kecuali jika keadaan khas yang sangat direka-reka berlaku.

Yang masih tinggal ialah penjelasan yang *bukan* fluks zarah yang menghasilkan hujan: yang paling banyak dibincangkan ialah kesan pantulan atau perambatan yang khusus kepada ais dan geometri berhampiran ufuk, atau artifak instrumen atau analisis. Tiada satu pun disahkan. Maka ringkasan yang jujur ialah: tafsiran paling menarik baru sahaja menerima tamparan serius, dan puncanya masih belum diketahui.

Apa yang *tidak* dibuktikan oleh hasil ini

- Ia **tidak** mengenal pasti apakah dua denyutan itu. “Sangat melemahkan fizik baharu” bukan bermaksud “sudah selesai.”
- Ia **tidak** mengesahkan sebab biasa. Satu calon utama — pantulan dari bawah permukaan Antartika — kekal sebagai hipotesis, bukan hasil yang telah dibuktikan.
- Ia **tidak** mengesan apa-apa yang “datang dari bawah ais” secara literal. Antena ANITA tergantung pada belon *di atas* Antartika; “dari bawah” menerangkan arah ketibaan denyutan radio yang dibina semula — bukan bunyi, suara, atau apa-apa yang terpancar dari dalam ais.
- Ia **tidak** menyokong dakwaan tentang zarah baharu yang telah disahkan. Versi cerita yang paling banyak dikongsi sebenarnya menunjuk ke arah bertentangan daripada bukti.

Sejauh mana kukuh buktinya?

Sederhana, dan dinyatakan begitu.

- Minat terhadap penjelasan di luar Model Piawai pada asasnya bertumpu pada **dua** peristiwa daripada dua penerbangan ANITA.
- Kertas ini ialah **hasil nol**: kuat untuk menyingkirkan kemungkinan, tetapi tidak boleh memberitahu apakah sebenarnya peristiwa tersebut.
- Pengecualian itu kuantitatif dan kuat (puluhan peristiwa dijangka, satu peristiwa seperti latar belakang dilihat) — tetapi sasarannya ialah tafsiran “fluks hujan zarah bergerak ke atas”, bukan setiap sebab yang boleh dibayangkan.
- Satu penjelasan biasa yang utama (pantulan berhampiran permukaan) munasabah tetapi belum terbukti; beberapa alternatif (model sinaran peralihan tertentu) telah dilemahkan oleh kajian lain.

- Tiada eksperimen yang secara bebas menghasilkan semula anomali asal.

Ini ialah kekangan tajam yang diletakkan di atas teka-teki kecil tetapi degil — bukan penemuan.

Mengapa ia penting

Penjelasan yang dicadangkan menjangkau sehingga zarah baharu yang eksotik. Daripada mengejar yang paling menarik, bidang ini melakukan kerja yang tidak glamor: menguji idea tersebut menggunakan pengesan bebas yang jauh lebih besar — dan data berkata tidak. Instrumen pengganti yang lebih besar dan lebih sensitif, PUEO, sedang dibina untuk melihat sekali lagi.

Anomali itu mungkin akhirnya mempunyai sebab yang biasa. Itu tidak akan menjadikannya kegagalan. Mengecilkan ruang penjelasan bagi satu ukuran yang belum diterangkan sehingga ia sama ada lenyap atau memaksa penemuan sebenar *itulah* kerjanya — dan ia berbaloi diikuti tepat kerana jawapan jujur, buat masa ini, masih “kami tidak tahu.”

Ringkasan utama

Dua denyutan radio daripada penerbangan belon ANITA di Antartika pada 2006 dan 2014 kelihatan datang dari sudut curam di bawah ufuk yang sukar diterangkan oleh Model Piawai. Satu carian khusus pada 2025 menggunakan Pierre Auger Observatory hanya menemui satu peristiwa calon yang konsisten dengan latar belakang, manakala puluhan peristiwa dijangka jika denyutan itu datang daripada fluks hujan zarah yang bergerak ke atas. Ini sangat melemahkan tafsiran eksotik “zarah baharu” dan sebaliknya menunjuk kepada kesan pantulan, perambatan atau instrumen yang khusus kepada ANITA — tetapi puncanya masih benar-benar belum diketahui. Bukan zarah baharu yang disahkan, dan bukan isyarat misteri dari dalam ais.

Semakan tanpa gembar-gembur

Apa yang ditunjukkan oleh kertas ini: Carian buta Pierre Auger (2004–2018) untuk hujan udara yang bergerak ke atas menemui satu calon, konsisten dengan latar belakang sinar kosmik sebanyak 0.27 peristiwa yang dijangka. Jika anomali ANITA datang daripada fluks hujan seperti itu, Auger sepatutnya melihat kira-kira 34–69 (atau sekurang-kurangnya ~8 dengan andaian konservatif). Ini sangat melemahkan tafsiran hujan zarah bergerak ke atas, termasuk senario “zarah baharu” di luar Model Piawai.

Apa yang munasabah tetapi belum terbukti: Kesan pantulan atau perambatan radio berhampiran ais dan ufuk, atau artifak instrumen/analisis yang khusus kepada ANITA.

Apa yang tidak ditunjukkannya: Bahawa peristiwa itu disebabkan oleh zarah baharu; bahawa ia

ialah isyarat dari bawah ais; bahawa apa-apa unsur paranormal, buatan, atau boleh didengar terlibat; atau bahawa puncanya kini diketahui.

Had utama: Minat terhadap penjelasan di luar Model Piawai bertumpu pada ~dua peristiwa; ini ialah hasil nol yang boleh mengehadkan kemungkinan tetapi tidak mengenal pasti punca; pengecualian menyasarkan secara khusus tafsiran “fluks hujan zarah”; tiada penghasilan semula bebas bagi anomali asal.

Berapa besar keyakinan yang patut ada pada pembaca umum? Keyakinan tinggi bahawa ini *bukan* zarah baharu yang disahkan dan *bukan* isyarat dari dalam ais, serta bahawa tafsiran fluks eksotik kini sangat dilemahkan. Keyakinan rendah tentang punca sebenar, yang masih terbuka. Sikap yang wajar: rasa ingin tahu terhadap anomali belum terungkai yang kemungkinan besar mempunyai sebab biasa.

Sumber

Phys. Rev. Lett. 134, 121003 (2025)

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.121003>

Original ANITA-I event (Gorham et al. 2016)

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.071101>

Original ANITA-III event (Gorham et al. 2018)

<https://arxiv.org/abs/1803.05088>

Subsurface-reflection explanation (Shoemaker et al. 2020)

<https://arxiv.org/abs/1905.02846>

PUEO successor instrument — white paper (2021)

<https://arxiv.org/abs/2010.02892>