



The CLEAN PAPER

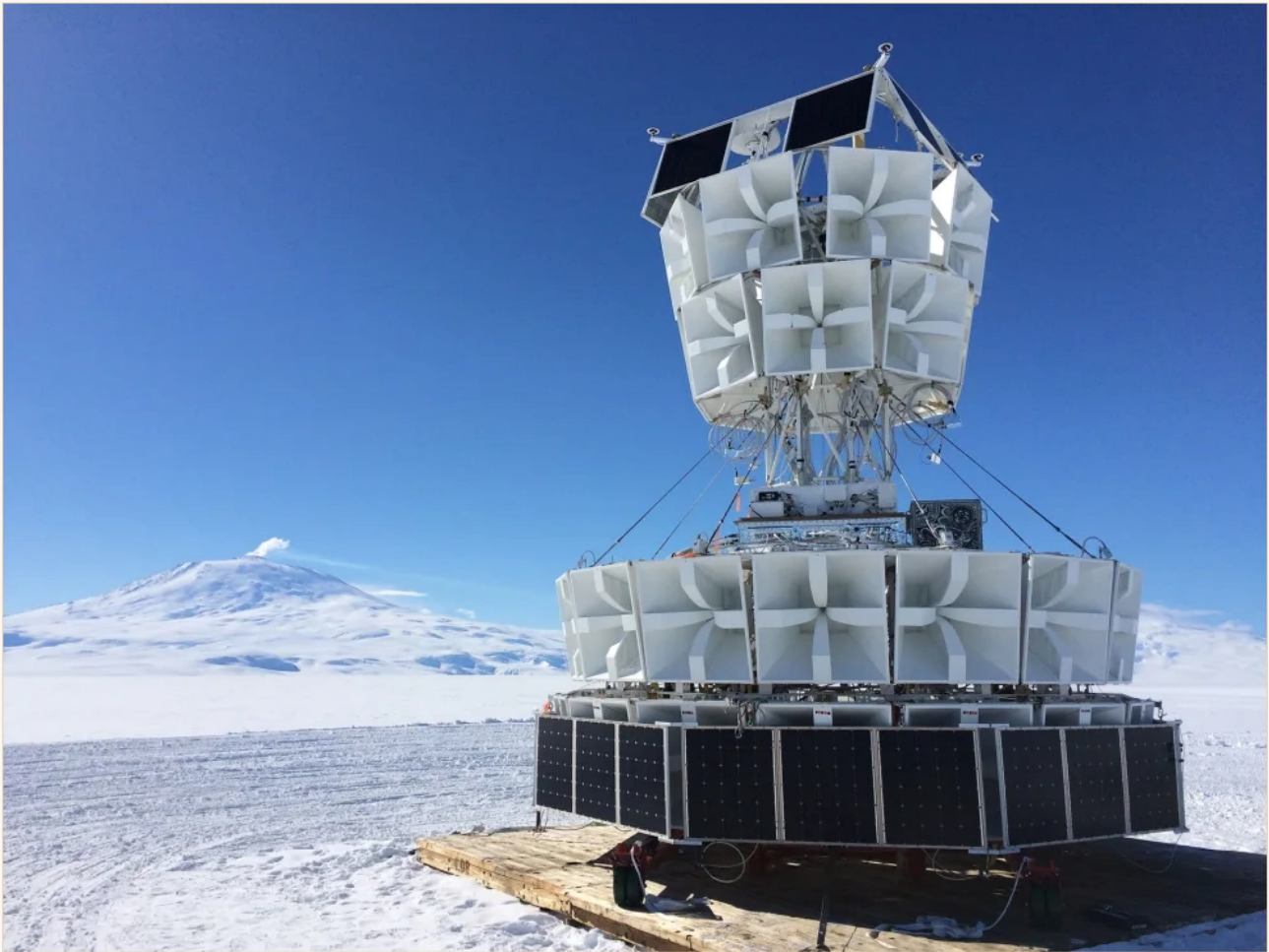
WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Dua pulsa radio anomali di atas Antarktika masih belum terjelaskan — dan penjelasan ‘partikel baru’ makin kehilangan dukungan

Dua pulsa radio tak biasa yang direkam bertahun-tahun lalu oleh eksperimen balon di Antarktika masih belum memiliki penjelasan yang disepakati; pencarian khusus Pierre Auger tidak menemukan hujan partikel yang semestinya menyertainya, sehingga interpretasi eksotis berupa ‘partikel baru’ menjadi jauh kurang mungkin sementara anomalinya sendiri belum terpecahkan.

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)



Ke-48 antena ANITA diarahkan ke bawah, ke es Antarktika, dari gondola setinggi 25 kaki.

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

Balon, es, dan dua pulsa dari bawah

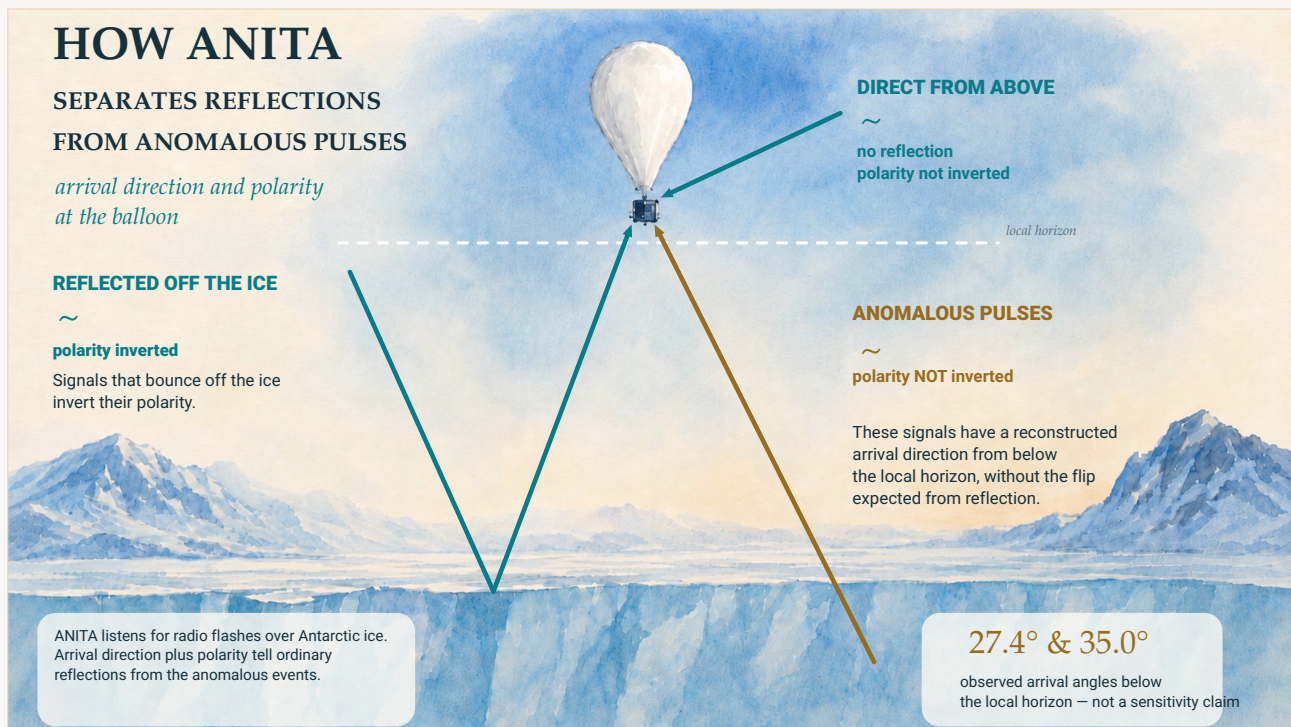
Selama sebagian besar masa operasinya, Antarctic Impulsive Transient Antenna — ANITA — menggantung di bawah balon NASA pada ketinggian sekitar tiga puluh kilometer, lalu melayang selama berminggu-minggu di atas tempat paling sepi di Bumi sambil mendengarkan.

Yang didengarkannya adalah sinyal radio dari ruang angkasa. Ketika partikel berenergi sangat tinggi — sinar kosmik atau neutrino — menabrak udara atau es, partikel itu pecah menjadi hujan partikel-partikel yang lebih kecil, dan hujan tersebut memancarkan kilatan radio singkat. Antarktika hampir ideal untuk menangkapnya: ada kilometer-kilometer es yang bersih dan dingin, yang dilalui gelombang radio hampir seolah-olah es itu kaca, serta nyaris tidak ada apa pun dalam jarak ratusan kilometer yang dapat mengacaukan sinyal. Tugas ANITA adalah menangkap kilatan-kilatan itu dan membaca, dari bentuk serta waktunya, apa yang menghasilkan kilatan tersebut.

Sebagian besar sinyal yang didengarnya berperilaku seperti yang diharapkan. Beberapa kilatan datang langsung dari atas. Jauh lebih banyak yang memantul dari es dan kembali naik ke antena —

dan pantulan ini membawa tanda khas: pantulan membalik gelombang (membalik *polaritas* sinyal), suatu ciri yang dapat dikenali fisikawan dengan cepat. Inilah cara membedakan pantulan dari sinyal langsung.

Dua kali, sesuatu datang dan melanggar pola itu.



Di balon, pulsa yang datang langsung dari atas tiba tanpa pembalikan, sedangkan pulsa yang dipantulkan tiba dengan polaritas terbalik — tanda biasa bahwa sinyal telah memantul dari es. Dua pulsa anomali justru datang dari arah yang *direkonstruksi* curam di bawah cakrawala lokal, tetapi tanpa pembalikan tersebut, padahal pantulan seharusnya membalikkannya. “Dari bawah” menggambarkan arah datang yang direkonstruksi — bukan partikel yang merangkak keluar dari Bumi.

Original hybrid diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Pada satu penerbangan tahun 2006 dan satu lagi pada 2014, ANITA menangkap pulsa dari arah yang curam *di bawah* cakrawala — masing-masing 27,4° dan 35,0° di bawahnya — seolah-olah pulsa itu muncul dari benua, tanpa pembalikan polaritas. Jadi, tampaknya bukan pantulan. Sesuatu seakan benar-benar bergerak naik dari es menuju balon.

Inilah mengapa hal itu hampir terasa seperti skandal fisika. Agar mencapai antenna pada sudut naik securam itu, apa pun yang menghasilkan pulsa harus menembus tubuh planet — enam atau tujuh ribu kilometer batuan padat. Hampir tidak ada partikel yang mampu melakukannya. Satu partikel yang dikenal dapat menembus materi biasa seolah-olah hampir tidak ada apa-apa adalah neutrino, yang dapat melintasi seluruh Bumi dengan sangat sedikit interaksi. Maka gagasan alaminya adalah neutrino bergerak naik melalui batuan, menabrak atom tepat di bawah es, dan menghasilkan hujan partikel yang melesat ke atas, dengan kilatan radio yang kemudian ditangkap ANITA. Masalahnya adalah sebuah ironi: neutrino yang cukup energetik untuk menghasilkan *sinyal ini* justru terlalu mudah dihentikan. Dalam lintasan sepanjang itu melalui batuan, neutrino semestinya terserap berkali-kali. Dan fluks neutrino yang cukup kuat sehingga dua di antaranya masih lolos semestinya muncul

pula di detektor raksasa yang memang dibangun untuk menangkapnya. Tak satu pun penjelasan yang rapi benar-benar menutup persoalan.

Maka dua pulsa itu tetap ada, menolak berperilaku seperti yang seharusnya. Bukan penemuan — dua peristiwa tidak pernah cukup untuk menjadi penemuan — tetapi juga bukan ketiadaan. Sebuah anomali sungguhan: menarik justru karena belum ada yang dapat mengatakan apakah ini retakan dalam Model Standar fisika atau hanya keanehan pada es, antenna, atau perhitungannya.

Di titik inilah jenis pemberitaan tertentu biasanya meraih kata *misterius*, meredupkan lampu, lalu bertanya apa yang mungkin hidup di bawah Antarktika. Jangan tergoda. Pertanyaan ilmiah yang sebenarnya tidak pernah *monster apa yang ada di dalam es*. Pertanyaannya adalah yang sabar dan tidak glamor, tetapi benar-benar mendorong sains maju: **bagaimana kita bisa mengetahuinya?**

Apa yang dilakukan para penulis

Ada cara yang bersih untuk menguji penjelasan yang paling menarik. Jika pulsa ANITA berasal dari fluks nyata dan berulang dari hujan partikel yang bergerak ke atas — baik dari neutrino tau biasa maupun dari partikel baru yang diusulkan — maka detektor yang cukup besar dan memang mengawasi peristiwa seperti itu seharusnya menangkap sebagian di antaranya.

Pierre Auger Observatory di Argentina — detektor sinar kosmik terbesar yang pernah dibangun — berada pada posisi yang baik untuk mencari. Menggunakan Fluorescence Detector-nya, kolaborasi tersebut mencari hujan udara yang bergerak ke atas (datang dari bawah, pada sudut zenit di atas 110° dan energi di atas 0,1 EeV) dalam data dari 2004 hingga 2018. Yang penting, seluruh seleksi ditetapkan *sebelum* kumpulan data lengkap diperiksa — sebuah analisis “buta”, sehingga hasilnya tidak dapat disesuaikan diam-diam ke arah jawaban yang diharapkan.

Apa yang mereka temukan

Setelah analisis dibuka, hanya **satu** peristiwa kandidat yang bertahan — sepenuhnya konsisten dengan 0.27 ± 0.12 peristiwa yang diperkirakan berasal dari sinar kosmik biasa yang sesekali salah direkonstruksi seolah-olah bergerak ke atas. Dengan kata lain, tidak ada sinyal naik yang nyata; hanya latar belakang kecil yang memang diperkirakan.

Kekuatan hasil ini ada pada perbandingannya. Jika pulsa ANITA berasal dari fluks stabil hujan partikel yang bergerak ke atas, Auger seharusnya mencatat **banyak** peristiwa — kira-kira 34 hingga 69 untuk salah satu spektrum energi yang masuk akal, dan setidaknya sekitar 8 bahkan dengan asumsi yang sengaja dibuat konservatif. Yang ditemukan satu, dan itu konsisten dengan latar belakang. Para penulis menyebut hasil ini sebagai “ketidaksesuaian yang kuat” dengan interpretasi hujan yang bergerak ke atas.

Apa arti yang paling mungkin

Ketiadaan deteksi sebesar ini memberi informasi nyata. Jika peristiwa ANITA berasal dari populasi partikel sungguhan yang datang dari arah tersebut — neutrino tau biasa atau partikel baru hipotetis yang diajukan untuk menjelaskannya — paparan panjang Auger seharusnya menangkap jumlah yang cukup besar. Itu tidak terjadi. Hasil ini secara efektif menyingkirkan penjelasan berupa “fluks difus hujan yang bergerak ke atas” — kategori yang mencakup sebagian besar gagasan di luar Model Standar — kecuali jika ada kondisi khusus yang sangat dibuat-buat.

Yang tersisa adalah penjelasan yang *bukan* fluks partikel pembentuk hujan: yang paling sering dibahas adalah efek pantulan atau propagasi yang khas pada es dan geometri dekat cakrawala, atau artefak instrumen maupun analisis. Tak satu pun telah dikonfirmasi. Jadi ringkasan yang jujur adalah: interpretasi yang paling menggairahkan baru saja mendapat pukulan serius, sementara penyebab sebenarnya masih belum diketahui.

Apa yang *tidak* dibuktikan

- Hasil ini **tidak** mengidentifikasi apa sebenarnya dua pulsa tersebut. “Sangat melemahkan fisika baru” bukan berarti “masalahnya selesai.”
- Hasil ini **tidak** mengonfirmasi penyebab biasa. Salah satu kandidat utama — pantulan dari bawah permukaan Antarktika — masih berupa hipotesis, bukan hasil.
- Hasil ini **tidak** mendeteksi apa pun yang secara harfiah “berasal dari bawah es”. Antena ANITA menggantung dari balon *di atas* Antarktika; “dari bawah” menggambarkan arah datang pulsa radio yang direkonstruksi — bukan suara, bukan suara manusia, dan bukan sesuatu yang memancar dari dalam es.
- Hasil ini **tidak** mendukung klaim tentang partikel baru yang telah dikonfirmasi. Versi cerita yang paling sering dibagikan justru bergerak berlawanan dengan bukti.

Seberapa kuat buktinya?

Sedang, dan para penulis menyatakannya seperti itu.

- Ketertarikan terhadap fisika di luar Model Standar pada dasarnya bertumpu pada **dua** peristiwa, dari dua penerbangan ANITA.
- Makalah ini adalah **hasil nol**: kuat untuk menyingkirkan kemungkinan, tetapi tidak dapat mengatakan apa peristiwa tersebut *sebenarnya*.
- Eksklusinya kuantitatif dan kuat (puluhan peristiwa diharapkan, satu peristiwa mirip latar belakang terlihat) — tetapi sasaran yang disingkirkan adalah interpretasi “fluks hujan yang bergerak ke atas”, bukan setiap penyebab yang dapat dibayangkan.
- Penjelasan biasa yang terkemuka (pantulan dekat permukaan) masuk akal tetapi belum terbukti; beberapa alternatif lain (misalnya model radiasi transisi tertentu) telah dilemahkan oleh peker-

jaan lain.

- Tidak ada eksperimen yang secara independen mereproduksi anomali asli.

Ini adalah batasan tajam yang diletakkan di atas teka-teki kecil tetapi keras kepala — bukan sebuah penemuan.

Mengapa ini penting

Penjelasan yang diusulkan pernah menjangkau hingga partikel baru eksotis. Alih-alih mengejar yang paling menggairahkan, bidang ini melakukan pekerjaan yang kurang glamor: menguji gagasan tersebut dengan detektor independen yang jauh lebih besar — dan data berkata tidak. Instrumen penerus yang lebih besar dan lebih sensitif, PUEO, sedang dibangun untuk melihat lagi.

Anomali ini mungkin pada akhirnya ternyata sepenuhnya biasa. Itu tidak akan menjadikannya kegagalan. Mempersempit pengukuran yang tak ter jelaskan sampai ia larut atau memaksa penemuan sungguhan *adalah* pekerjaan sains — dan kisah ini layak diikuti justru karena jawaban jujurnya, untuk saat ini, masih “kami belum tahu.”

Singkatnya

Dua pulsa radio dari penerbangan balon ANITA di Antarktika pada 2006 dan 2014 tampak datang dari sudut curam di bawah cakrawala yang sulit dijelaskan oleh Model Standar. Pencarian khusus pada 2025 menggunakan Pierre Auger Observatory hanya menemukan satu peristiwa kandidat, konsisten dengan latar belakang, padahal puluhan seharusnya terlihat jika pulsa tersebut berasal dari fluks hujan yang bergerak ke atas. Hal ini sangat melemahkan interpretasi eksotis berupa “partikel baru” dan mengarahkan perhatian ke efek pantulan, propagasi, atau instrumen yang khas pada ANITA — tetapi penyebabnya tetap benar-benar tidak diketahui. Bukan partikel baru yang telah dikonfirmasi, dan bukan sinyal misterius dari dalam es.

Penilaian tanpa berlebihan

Apa yang ditunjukkan makalah: Pencarian buta Pierre Auger (2004–2018) terhadap hujan udara yang bergerak ke atas menemukan satu kandidat, konsisten dengan latar belakang sinar kosmik yang diharapkan sebesar 0,27 peristiwa. Jika anomali ANITA berasal dari fluks hujan seperti itu, Auger seharusnya melihat kira-kira 34–69 (atau setidaknya ~8 dengan asumsi konservatif). Ini sangat melemahkan interpretasi hujan yang bergerak ke atas, termasuk skenario “partikel baru” di luar Model Standar.

Apa yang masuk akal tetapi belum terbukti: Efek pantulan atau propagasi radio di dekat es dan

cakrawala, atau artefak instrumen/analisis yang spesifik pada ANITA.

Apa yang tidak ditunjukkan: Bahwa peristiwa tersebut disebabkan partikel baru; bahwa itu sinyal dari bawah es; bahwa ada sesuatu yang paranormal, buatan, atau dapat didengar; bahwa penyebabnya sekarang telah diketahui.

Keterbatasan utama: Ketertarikan terhadap fisika di luar Model Standar bertumpu pada sekitar dua peristiwa; ini adalah hasil nol yang membatasi tetapi tidak dapat mengidentifikasi; eksklusi secara khusus menargetkan interpretasi “fluks hujan”; tidak ada reproduksi independen atas anomali asli.

Seberapa besar keyakinan yang layak dimiliki pembaca umum? Keyakinan tinggi bahwa ini *bukan* partikel baru yang sudah dikonfirmasi dan *bukan* sinyal dari dalam es, serta bahwa interpretasi fluks eksotis kini sangat tidak disukai. Keyakinan rendah tentang penyebab sebenarnya, yang masih terbuka. Sikap yang tepat: rasa ingin tahu terhadap anomali yang belum terpecahkan dan kemungkinan besar pada akhirnya akan memiliki penjelasan 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>