



The CLEAN PAPER

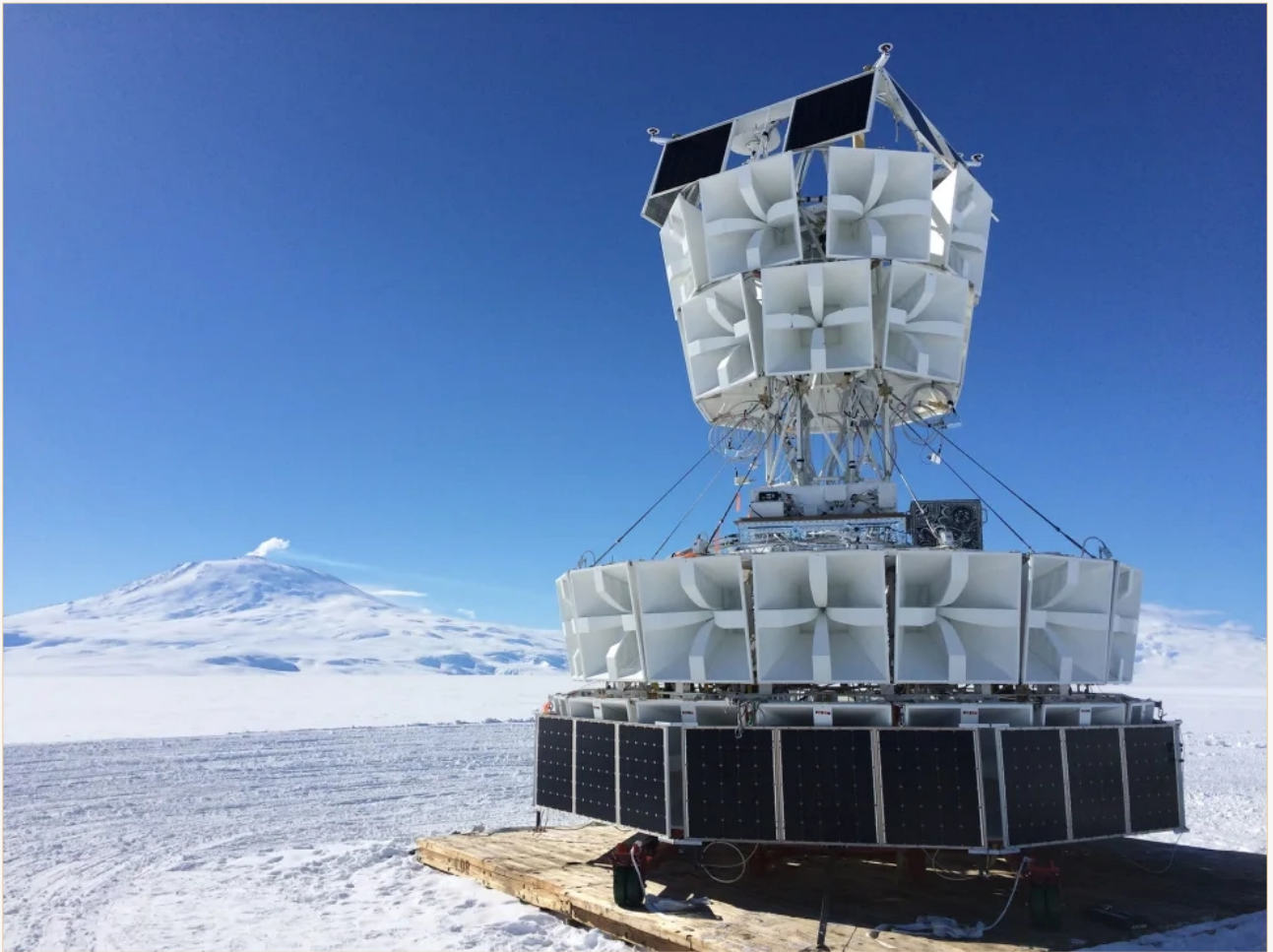
WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

南極上空的兩次異常射電脈衝仍未得到解釋—— 「新粒子」解釋正失去支持

幾年前由氣球搭載的南極實驗記錄的兩次異常射電脈衝仍然沒有公認的解釋；皮埃爾·奧熱天文臺的一項專門搜尋未發現這些脈衝所暗示的粒子暴雨的任何痕跡，使得奇異的「新粒子」解讀遠不那麼可能，同時讓異常仍然未解。

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



ANITA 的 48 支天線朝南極冰層，安裝在一座高 25 英尺的吊艙上。

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

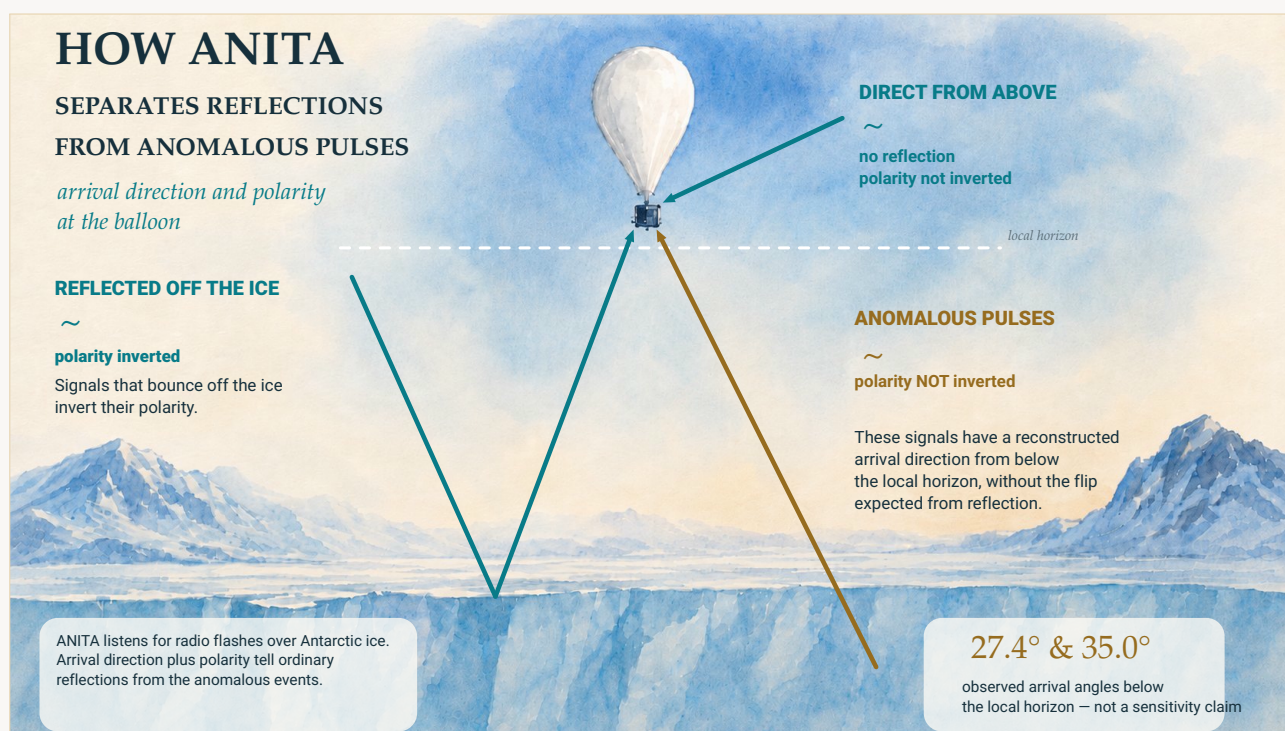
氣球、冰層，以及來自下方的兩個脈衝

在大部分的運作期間，南極脈衝瞬變天線——ANITA——都懸掛在 NASA 氣球下方，位於三十多公里高空，漂浮數週，越過地球上最荒蕪的地方，持續聆聽。

它聆聽的是來自太空的無線電訊號。當一個極高能量的粒子——宇宙射線或中微子——撞上空氣或冰層時，會碎裂成較小粒子的簇射，而這陣簇射會發出短暫的無線電閃光。南極洲幾乎是捕捉這些訊號的理想地點：數公里厚、潔淨而寒冷的冰層，無線電穿過其中時幾乎就像穿過玻璃；數百公里內也沒有任何東西會干擾訊號。ANITA 的工作，就是捕捉這些閃光，從它們的形狀和到達時間判讀究竟是什麼造成了它們。

它聽到的大多數訊號都循規蹈矩。有些閃光直接從上方抵達。更多訊號則掠過冰層後反彈回天線——而這些訊號帶有一個明顯線索：反彈會讓波形上下顛倒（訊號的極性反轉），這是物理學家一眼就能辨認的特徵。這就是分辨反射訊號與直達訊號的方法。

有兩次，抵達的訊號打破了這個模式。



在氣球處，直接從上方抵達的脈衝不會翻轉；反射脈衝抵達時則會極性翻轉——這是冰面反彈的通常跡象。相反地，這兩個異常脈衝抵達時，根據重建出的方向，是從當地地平線下方陡峭的位置而來——但卻沒有這種翻轉；如果是反射，它們本應翻轉。「來自下方」描述的是抵達方向——不是有粒子從地球內部爬出來。

Original hybrid diagram —The Clean Paper CC BY 4.0

在 2006 年的一次飛行和 2014 年的另一次飛行中，ANITA 各捕捉到一個從地平線下方陡峭位置而來的脈衝——分別低於地平線 27.4° 和 35.0°——看起來就像是從大陸內部向上冒出來，卻沒有反轉。因此不是反射，而是某種東西確實向上穿出冰層，朝氣球而來。

這件事之所以近乎令人震驚，原因如下。要以如此陡峭的向上角度抵達天線，產生脈衝的東西就必須穿過行星本體——六、七千公里的固態岩石。幾乎沒有東西做得到。已知唯一能穿過普通物質、彷彿物質幾乎不存在的粒子，就是中微子；它可以毫不受阻地穿過整個地球。因此自然的想法是：一個中微子穿過岩石，在冰層正下方撞上一個原子，產生一陣向上疾奔的粒子簇射，而 ANITA 捕捉到了這道無線電閃光。問題在於其中的轉折：能量足以產生這個訊號的中微子，事實上太容易被阻擋。穿過那麼多岩石後，它應該早已被吸收許多次。若中微子流強到仍有兩個中微子能穿透過來，那麼專門為捕捉這類訊號而建造的巨大探測器也應該已經觀測到它們。可是沒有。那些看似完備的解釋，沒有一個能完全說通。

於是，這兩個脈衝就那樣擺在那裡，拒絕循規蹈矩。這不是發現——兩個事件從來不能算是發現——但也不是毫無意義。這是真正的異常：它之所以有趣，正是因為當時沒有人能說明，這究竟是物理學標準模型出現了裂縫，還只是冰層、天線或計算方式的古怪之處。

這正是某些報導慣於拿出「神秘」一詞、把燈光調暗，然後問南極洲底下可能住著什麼東西的時刻。克制這種誘惑。真正的問題從來不是冰層裡有什麼怪物。真正推動科學前進的問題，是那個耐心而不煽情的問題：要如何查明真相？

作者做了什麼

有一個簡潔的方法可以檢驗那些令人興奮的解釋。如果 ANITA 的脈衝來自真實且反覆出現的向上簇射流——不論是普通的 tau 中微子，還是某種有人提出的新粒子——那麼，一個足夠大型、專門觀測這類事件的探測器，應該能捕捉到其中一部分。

位於阿根廷的 Pierre Auger Observatory——有史以來建造的最大宇宙射線探測器——很適合用來尋找這類訊號。合作團隊利用它的螢光探測器，在涵蓋 2004 至 2018 年的資料中搜尋向上行進的空氣簇射（從下方抵達、天頂角超過 110° 、能量高於 0.1 EeV ）。關鍵在於，完整的篩選條件是在檢視完整資料集之前就已固定——這是一項「盲」分析，因此答案不可能被調整成研究者所希望的結果。

他們發現了什麼

解除盲態後，只有一個候選事件存留下來——它完全符合普通宇宙射線偶爾被錯誤重建成向上行進所造成的 0.27 ± 0.12 個預期背景事件。換句話說，沒有真正的向上行進訊號；只有預期中的那一點背景雜訊。

這項結果的說服力來自比較。如果 ANITA 的脈衝來自穩定的向上簇射流，Auger 應該會記錄到許多事件——在一種合理的能量光譜下，大約 34 至 69 個這類事件；即使採用刻意保守的假設，也至少約有 8 個。它卻只找到一個，且與背景一致。作者將此描述為與向上簇射解釋「強烈不一致」。

這大概意味著什麼

這種規模的未檢出結果提供了重要資訊。如果 ANITA 事件來自一個從那些方向抵達的真實粒子族群——普通的 tau 中微子，或為了解釋它們而提出的假想新粒子——Auger 長時間的觀測應該會捕捉到相當多事件。它沒有。這實際上排除了「向上簇射的瀰漫流」這種解釋——大多數超越標準模型的想法都屬於這一類——除非存在刻意構造的特殊條件。

剩下的是那些不是簇射粒子流的解釋：最常被討論的是冰層和近地平線幾何結構特有的反射或傳播效應，或者儀器或分析上的假象。沒有一項已獲得確認。因此，誠實的總結是：最令人興奮的解釋剛剛受到嚴重打擊，而原因仍然未知。

這項結果沒有證明什麼

- 它**沒有**指出這兩個脈衝究竟是什麼。「強烈不支持新物理」不等於「問題已解決」。
- 它**沒有**確認某個平凡的原因。一個主要候選解釋——來自南極表面下方的反射——仍是假說，不是結果。
- 它**沒有**在任何字面意義上探測到「來自冰層下方」的東西。ANITA 的天線懸掛在南極洲上方的氣球下；「來自下方」描述的是無線電脈衝重建出的抵達方向——不是聲音、話語，也不是從冰層內

部發出的任何東西。

- 它**沒有**支持已確認新粒子的說法。這個故事最廣為流傳的版本，指向的方向與證據相反。

證據有多強？

有限，論文也如此表述。

- 超越標準模型的興趣，基本上建立在來自兩次 ANITA 飛行的**兩個**事件上。
- 這篇論文是**零結果**：它在排除可能性方面很有力，但無法說明事件是什麼。
- 排除結果具有定量性且很強（預期有數十個事件，實際看到一個類似背景的事件）——但它針對的是「向上簇射流」這種解釋，而不是每一種可以想像的原因。
- 一個主要的平凡解釋（近地表反射）很合理但尚未證實；某些替代方案（特定的躍遷輻射模型）已被其他研究認為較不可信。
- 沒有任何實驗獨立重現原始異常。

這是加在一個小而頑固的謎題上的嚴格限制——不是發現。

為什麼重要

提出的解釋一路延伸到奇異的新粒子。這個領域沒有追逐最令人興奮的可能性，而是做了不煽情的事：用一個獨立、規模大得多的探測器檢驗這個想法——資料給出的答案是否定的。一台更大型、靈敏度更高的後繼儀器 PUEO 正在建造中，準備再次尋找。

這個異常最終也許會證明只是平凡現象。那並不代表它是失敗。把一項無法解釋的測量逐步限縮，直到它要麼消解，要麼迫使我們面對真正的發現，就是科學工作——而它值得關注，正因為目前誠實的答案仍然是：「我們不知道。」

重點摘要

ANITA 在 2006 年和 2014 年南極氣球飛行中捕捉到的兩個無線電脈衝，看起來分別來自遠低於地平線的陡峭角度，標準模型難以解釋這種現象。Pierre Auger Observatory 在 2025 年進行的一項專門搜尋只找到一個候選事件，與背景一致；如果這些脈衝來自向上簇射流，原本預期應該有數十個事件。這強烈削弱了奇異的「新粒子」解釋，並將方向指向 ANITA 特有的反射、傳播或儀器效應——但原因確實仍然未知。不是已確認的新粒子，也不是來自冰層內部的神秘訊號。

No-BS check

論文顯示的內容： Pierre Auger 對 2004–2018 年向上行進空氣簇射進行的盲搜尋，找到一個候選事件，與預期的 0.27 個宇宙射線背景事件一致。如果 ANITA 異常來自這類簇射的粒子流，Auger 應該會看到大約 34–69 個事件（或在保守假設下至少約 8 個）。這強烈削弱了向上簇射解釋，包括超越標準模型的「新粒子」情境。

合理但尚未證實的內容： 冰層與地平線附近的反射或無線電傳播效應，或者 ANITA 特有的儀器／分析假象。

它沒有顯示的內容： 事件是由新粒子造成的；事件是來自冰層下方的訊號；其中涉及任何超自然、人工或可聽見的事物；原因現在已經知道。

主要限制： 超越標準模型的興趣建立在約兩個事件上；這是能夠加以限制、卻無法辨認原因的零結果；排除結果特別針對「簇射流」解釋；沒有對原始異常的獨立重現。

一般讀者應該有多大信心？ 可以高度確信這不是已確認的新粒子，也不是來自冰層內部的訊號，而且奇異粒子流解釋如今已受到強烈削弱。至於真正原因，信心應該很低，因為它仍未解決。合適的態度是：對一個尚未解開、但最可能很平凡的異常保持好奇。

來源

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>