



The CLEAN PAPER

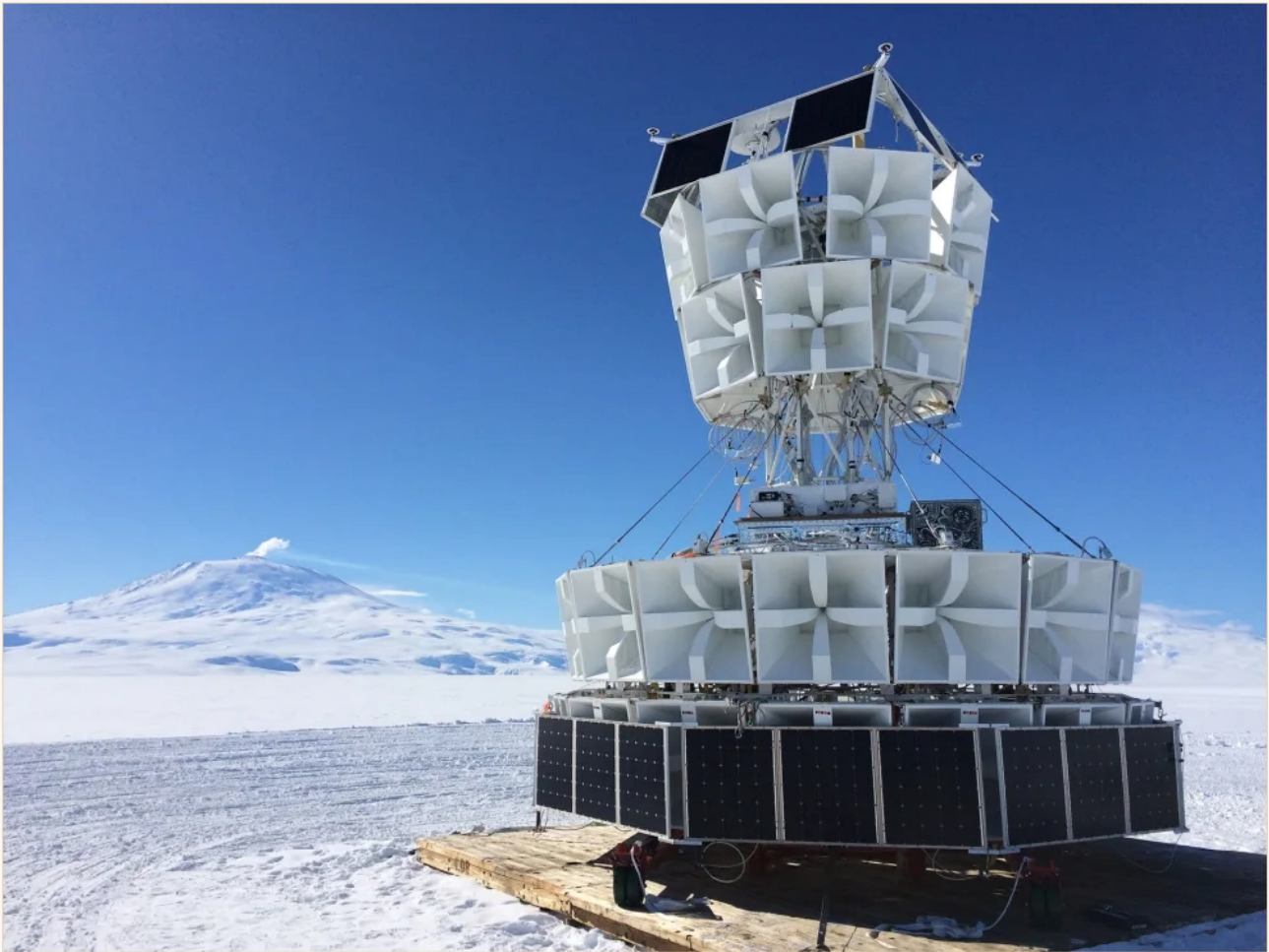
WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

พัลส์วิทยุผิดปกติสองลูกเหนือแอนตาร์กติกายังอธิบายไม่ได้ — และคำอธิบายแบบ “อนุภาคใหม่” กำลังเสียแรงสนับสนุน

พัลส์วิทยุแปลกสองลูกที่การทดลองบนบอลลูนเหนือแอนตาร์กติกาบันทึกไว้หลายปีก่อนยังไม่มีคำอธิบายที่ยอมรับร่วมกัน การค้นหาเฉพาะทางด้วย *Pierre Auger* ไม่พบร่องรอยของพายุอนุภาคที่คำอธิบายนั้นควรทำให้เกิด จึงทำให้การตีความแบบ “อนุภาคใหม่” แปลกประหลาดมีความเป็นไปได้น้อยลงมาก โดยที่ความผิดปกติเดิมยังไม่ถูกไข

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



เสาอากาศ 48 ตัวของ ANITA หันลงไปยังน้ำแข็งแอนตาร์กติกา บนคอนโดลสูงราว 25 ฟุต

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

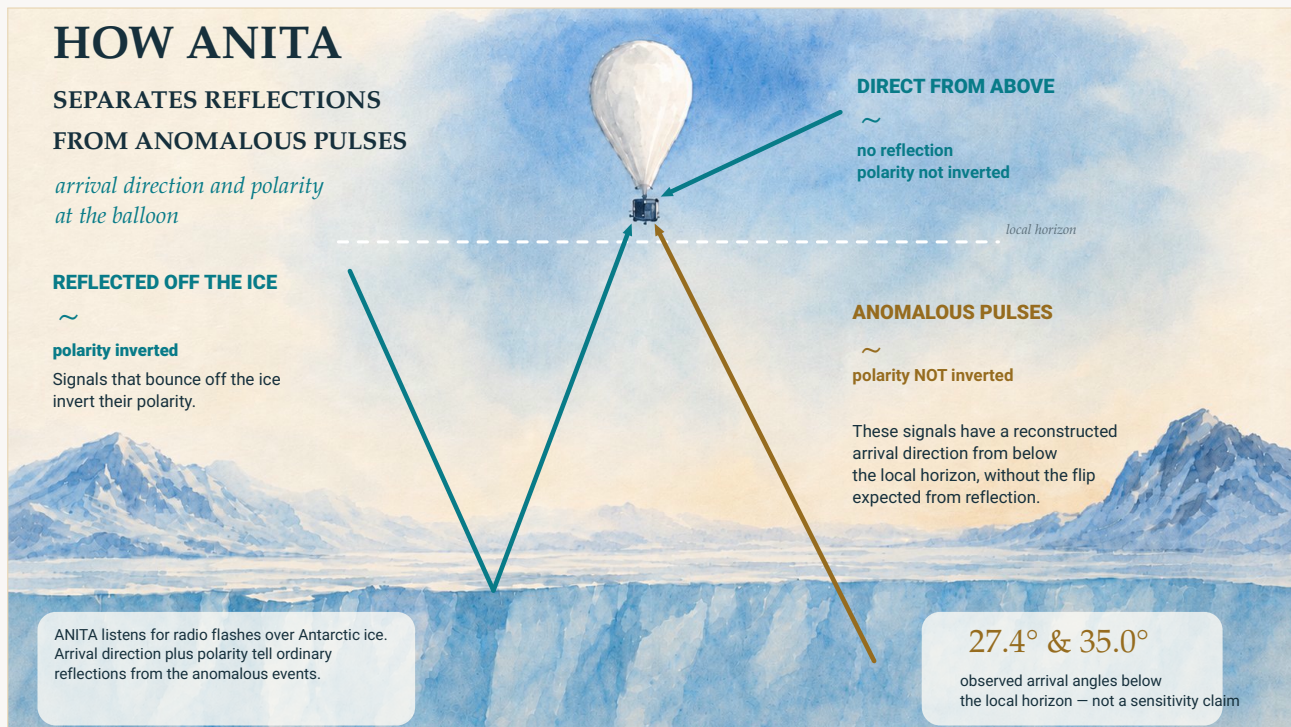
บอลูน น้ำแข็ง และพัลส์สองลูกที่ดูเหมือนมาจากด้านล่าง

ตลอดช่วงเวลาทำงานส่วนใหญ่ Antarctic Impulsive Transient Antenna หรือ ANITA จะห้อยอยู่ใต้บอลูนของ NASA สูงจากพื้นราวสามสิบกิโลเมตร และลอยอยู่นานหลายสัปดาห์เหนือพื้นที่ที่ว่างเปล่าที่สุดแห่งหนึ่งบนโลก คอยฟัง

สิ่งที่มันฟังคือสัญญาณวิทยุจากอวกาศ เมื่ออนุภาคพลังงานสูงมาก — รังสีคอสมิกหรือนิวตริโน — ชนบรรยากาศหรือน้ำแข็ง มันจะแตกเป็นพายุของอนุภาคย่อย และพายุนั้นปล่อยวาวคลื่นวิทยุสั้น ๆ ออกมา แอนตาร์กติกาแทบจะเหมาะที่สุดสำหรับดักจับสัญญาณแบบนี้: มีน้ำแข็งเย็นสะอาดหนาหลายกิโลเมตรที่คลื่นวิทยุผ่านได้เกือบราวกับเป็นแก้ว และแทบไม่มีอะไรในระยะหลายร้อยกิโลเมตรมารบกวนสัญญาณ หน้าที่ของ ANITA คือจับวาวเหล่านั้น แล้วอ่านจากรูปทรงและจังหวะเวลาว่าอะไรเป็นต้นกำเนิด

สัญญาณส่วนใหญ่มีพฤติกรรมเรียบร้อย บางพัลส์มาจากด้านบนตรง ๆ อีกจำนวนมากเฉียดผิวน้ำแข็ง สะท้อนกลับขึ้นไปหาเสาอากาศ — และการสะท้อนมีลายเซ็นชัดเจน: มันกลับคลื่น “คว่ำ” หรือกลับ *ขั้ว* (polarity) ของสัญญาณ นักฟิสิกส์จึงบอกได้ค่อนข้างง่ายว่านี่คือคลื่นสะท้อน ไม่ใช่สัญญาณตรง

แต่มีอยู่สองครั้งที่บางอย่างไม่ยอมทำตามรูปแบบนั้น



ที่บอลลูน ฟลัสส์ที่มาจากด้านบนตรง ๆ จะมาถึงโดยไม่กลับขั้ว ขณะที่ฟลัสส์สะท้อนจะกลับขั้ว — สัญญาณปกติของการเดินทางจากผิวน้ำแข็ง แต่ฟลัสส์ผิดปกติสองลูกกลับมาจากทิศทางที่ *คำนวณย้อนสร้าง (reconstructed)* ว่าอยู่ต่ำกว่าขอบฟ้าเฉพาะที่อย่างชัน โดยไม่มีการกลับขั้ว ทั้งที่ถ้าเป็นการสะท้อนควรกลับขั้ว “มาจากด้านล่าง” ในที่นี้จึงหมายถึงทิศทางมาถึงของสัญญาณที่คำนวณได้ ไม่ได้หมายถึงมีอนุภาคบินออกมาจากโลก

Original hybrid diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

ในการบินครั้งหนึ่งปี 2006 และอีกครั้งปี 2014 ANITA จับฟลัสส์ที่ดูเหมือนมาจาก *ต่ำกว่าขอบฟ้า* อย่างชัน — 27.4° และ 35.0° ใต้ขอบฟ้าตามลำดับ — ราวกับมันพุ่งขึ้นมาจากทวีป แต่ *ไม่* มีการกลับขั้ว ถ้าอย่างนั้นก็ดูไม่เหมือนสัญญาณสะท้อน แต่น่าจะเป็นสิ่งที่เดินทางขึ้นจริง ๆ จากทิศน้ำแข็งไปหาบอลลูน

ตรงนี้เองที่เรื่องเริ่มผิดธรรมดาอย่างมาก ถ้าจะมาถึงเสาอากาศด้วยมุมพุ่งขึ้นชันขนาดนั้น สิ่งที่เราสร้างฟลัสส์ต้องผ่านเนื้อโลกขึ้นมา — ผ่านหินแข็งราวหกถึงเจ็ดพันกิโลเมตร แทบไม่มีอะไรทำได้ อนุภาคที่เราจำว่าทะลุสารธรรมดาได้ง่ายมากคือนิวตริโน ซึ่งสามารถลอดผ่านโลกทั้งใบแทบไม่ชนอะไร ดังนั้นแนวคิดธรรมดาดีคือ นิวตริโนเดินทางขึ้นผ่านหิน ไปชนอะตอมใต้ผิวน้ำแข็ง แล้วสร้างพายุอนุภาคที่พุ่งขึ้นด้านบน คลื่นวิทยุจากพายุนี้จึงถูก ANITA จับได้ แต่ปัญหาคือกลับหักมุม: นิวตริโนที่มีพลังงานสูงพอจะสร้างสัญญาณ *แบบดี* กลับไม่ไปรังสีต่อโลกมากพอ ที่ระยะหินขนาดนั้น มันควรถูกดูดกลืนไปหลายครั้งแล้ว และถ้ามีฟลักซ์นิวตริโนแรงพอให้ยังมีสองตัวทะลุมาได้ เครื่องตรวจจับยักษ์ที่สร้างมาเพื่อจับนิวตริโนแบบนี้ก็ควรจะเห็นอะไรบางอย่างด้วย แต่คำอธิบายเรียบร้อย ๆ ไม่มีอันไหนปิดเรื่องได้สนิท

ฟลัสส์สองลูกจึงค้างอยู่ตรงนั้น ไม่ยอมเข้าพวก ไม่ใช้การค้นพบ — สองเหตุการณ์ไม่เคยพอจะเป็นการค้นพบ — แต่ก็ไม่ใช่ไม่มีอะไรเลย มันคือความผิดปกติจริง ๆ ซึ่งน่าสนใจเพราะยังไม่มีใครบอกได้ว่ามันเป็นรอยร้าวใน Standard Model ของฟิสิกส์ หรือเป็นเพียงลักษณะประหลาดของน้ำแข็ง เสาอากาศ หรือวิธีคำนวณ

นี่คือจุดที่ชาวบางแบบชอบหยิบคำว่า *สึกสึบ* มาปิดไฟให้มืดลง แล้วถามว่าอาจมีอะไรอยู่ใต้แอนตาร์กติกา อย่าเพิ่งไปทางนั้น คำถามจริงไม่เคยเป็น *มีสัตว์ประหลาดอะไรอยู่ในน้ำแข็ง* แต่เป็นคำถามอดทนและไม่น่าตื่นเต้นที่ทำให้วิทยาศาสตร์เดินหน้าได้จริง: **เราจะรู้ได้อย่างไร?**

ผู้วิจัยทำอะไร

มีวิธีค่อนข้างตรงในการทดสอบคำอธิบายที่น่าตื่นตะลึง ถ้าฟลักซ์ของ ANITA มาจากฟลักซ์จริงที่เกิดซ้ำของพายุอนุภาคพุ่งขึ้น — ไม่ว่าจะมาจาก tau-neutrino ตามฟิสิกส์ปกติ หรือจากอนุภาคชนิดใหม่ที่มีคนเสนอ — เครื่องตรวจจับขนาดใหญ่พอที่เฝ้าหาเหตุการณ์แบบเดียวกันก็ควรจับได้ส่วนหนึ่ง

Pierre Auger Observatory ในอาร์เจนตินา — เครื่องตรวจจับรังสีคอสมิกที่ใหญ่ที่สุดที่เคยสร้าง — อยู่ในตำแหน่งเหมาะสมสำหรับตรวจสอบ ทีมความร่วมมือใช้ Fluorescence Detector ค้นหาพายุอนุภาคในบรรยากาศที่พุ่งขึ้นด้านบน (มาถึงจากด้านล่าง ด้วยมุม zenith มากกว่า 110° และพลังงานมากกว่า 0.1 EeV) จากข้อมูลปี 2004 ถึง 2018 ที่สำคัญ เกณฑ์คัดเลือกทั้งหมดถูกกำหนด *ก่อน* เปิดดูชุดข้อมูลเต็ม — เป็นการวิเคราะห์แบบ “แบบปิดปิดข้อมูลกลุ่ม” เพื่อไม่ให้ผู้วิจัยปรับคำตอบไปทางผลที่ตัวเองหวัง

พวกเขาพบอะไร

หลังเปิดข้อมูล มีเหตุการณ์ผู้สมัครเหลือรอด **หนึ่ง** เหตุการณ์ — สอดคล้องอย่างสมบูรณ์กับพื้นหลังที่คาดไว้ 0.27 ± 0.12 เหตุการณ์ จากรังสีคอสมิกธรรมดาที่บางครั้งถูก reconstruction ผิดว่าเป็นพายุพุ่งขึ้น กล่าวอีกอย่างคือ ไม่พบสัญญาณพุ่งขึ้นจริง ๆ มีเพียงพื้นหลังเล็กน้อยตามที่คาด

พลังของผลลัพธ์อยู่ที่การเปรียบเทียบ ถ้าฟลักซ์ ANITA มาจากฟลักซ์จริงของพายุพุ่งขึ้น Auger ควรบันทึกได้ **หลายเหตุการณ์** — ราว 34 ถึง 69 เหตุการณ์สำหรับสเปกตรัมพลังงานที่สมเหตุสมผลแบบหนึ่ง และอย่างน้อยราว 8 เหตุการณ์แม้ใช้สมมติฐานที่จางจืดจางที่สุด แต่พบหนึ่งเหตุการณ์ซึ่งสอดคล้องกับพื้นหลัง ผู้เขียนเรียกผลนี้ว่า “ไม่สอดคล้องอย่างมาก” กับคำอธิบายแบบพายุพุ่งขึ้น

ผลนี้จะหมายความว่าอะไร

การไม่พบสัญญาณระดับนี้มีข้อมูลอยู่มาก ถ้าเหตุการณ์ ANITA มาจากประชากรอนุภาคจริงที่เดินทางจากทิศเหล่านั้น — tau-neutrino ปกติ หรืออนุภาคใหม่สมมติที่เสนอเพื่ออธิบายมัน — การสังเกตการณ์ยาวนานของ Auger ควรจับได้จำนวนไม่น้อย แต่ไม่พบ นั่นทำให้คำอธิบายแบบ “ฟลักซ์กระจายของพายุพุ่งขึ้น” แทบใช้ไม่ได้ — ซึ่งเป็นหมวดที่แนวคิด beyond-the-Standard-Model ส่วนใหญ่ตกอยู่ — เว้นแต่จะตั้งเงื่อนไขพิเศษแบบผืนมาก

สิ่งที่ยังเหลือคือคำอธิบายที่ *ไม่ใช่* ฟลักซ์ของอนุภาคที่ก่อพายุ ที่ถูกพูดถึงมากที่สุดคือผลของการสะท้อนหรือการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่เฉพาะกับน้ำแข็งและเรขาคณิตโกลัซบอลของฟ้า หรือ artifact ของเครื่องมือหรือการวิเคราะห์ ยังไม่มีอันไหนยืนยัน ดังนั้นสรุปที่ข้อสัณยคือ: คำอธิบายที่น่าตื่นตะลึงที่สุดเพื่องานข้อมูลกระแทกแรง แต่สาเหตุจริงยังไม่ทราบ

สิ่งที่ผลนี้ *ไม่ได้* พิสูจน์

- มัน **ไม่ได้** บอกว่าฟลักซ์สองลูกนั้นคืออะไร “ทำให้ฟลักซ์ใหม่มีโอกาสน้อยลงอย่างมาก” ไม่เท่ากับ “แก้ปริศนาแล้ว”
- มัน **ไม่ได้** ยืนยันสาเหตุธรรมดา ผู้สมัครนำ — การสะท้อนจากชั้นใต้ผิวแอนตาร์กติกา — ยังเป็นสมมติฐาน ไม่ใช่ผลยืนยัน
- มัน **ไม่ได้** ตรวจจบบ่ออะไรที่ “มาจากใต้ผืนน้ำแข็ง” ในความหมายตรงตัว เสาอากาศของ ANITA ห้อยจากบอลลูน *เหนือ*

แอนตาร์กติกา; “มาจากด้านล่าง” หมายถึงที่สมาธิของพัลส์วิทยุที่ reconstruction ได้ ไม่ใช่เสียง เสียงพูด หรือสิ่งใดที่เปล่งออกมาจากภายในน้ำแข็ง

- มัน **ไม่ได้** สนับสนุนคำกล่าวว่าพบอนุภาคใหม่แล้ว เรื่องฉบับที่ถูกแชร์กันมากที่สุดกลับชี้สวนทางกับหลักฐาน

หลักฐานแข็งแรงแค่ไหน?

ระดับปานกลาง และควรพูดตามนั้น

- ความสนใจด้าน beyond-the-Standard-Model ตั้งอยู่บนเหตุการณ์หลัก ๆ เพียง **สอง** เหตุการณ์ จากเที่ยวบิน ANITA สอง ครั้ง
- งานนี้เป็น **ผลลบ (null result)**: มีพลังมากในการตัดความเป็นไปได้บางแบบ แต่บอกไม่ได้ว่าเหตุการณ์เดิม *คืออะไร*
- การตัดออกเชิงปริมาณค่อนข้างแรง (คาดหลายสิบเหตุการณ์ แต่เห็นหนึ่งเหตุการณ์คล้ายพื้นหลัง) — แต่เป้าหมายของมันคือคำอธิบาย “ฟลักซ์พายุพุ่งขึ้น” ไม่ใช่ทุกสาเหตุที่จินตนาการได้
- คำอธิบายธรรมชาติที่น่าอยู่ (การสะท้อนโกลัณผิว) เป็นไปได้แต่ยังไม่พิสูจน์; ส่วนทางเลือกบางชนิด เช่น transition-radiation บางโมเดล ถูกงานอื่นลดความเป็นไปได้ลงแล้ว
- ยังไม่มีการทดลองอิสระที่ทำซ้ำความผิดปกติดั้งเดิมได้

นี่คือข้อจำกัดที่คมชัดซึ่งวางทับปริศนาเล็ก ๆ ที่ दौरान — ไม่ใช่การค้นพบ

ทำไมจึงสำคัญ

คำอธิบายที่ถูกเสนอไปไกลถึงอนุภาคใหม่แปลกประหลาด แต่แทนที่จะไล่ตามตัวเลือกที่ตื่นเต้นที่สุด วงการทำสิ่งที่ไม่น่าตื่นเต้นกว่า: ทดสอบแนวคิดกับเครื่องตรวจจับอิสระที่ใหญ่กว่ามาก — และข้อมูลตอบว่าไม่ เครื่องมือรุ่นถัดไปที่ใหญ่และไวกว่า PUEO กำลังถูกสร้างเพื่อมองหาอีกครั้ง

ท้ายที่สุดความผิดปกตินี้อาจมีสาเหตุธรรมดา นั่นก็ไม่ทำให้เรื่องนี้เป็นความล้มเหลว การค่อย ๆ บีบกรอบของคำอธิบายไม่ได้จนมันสลายไปหรือบังคับให้เกิดการค้นพบจริง *คือ* งานของวิทยาศาสตร์ และเรื่องนี้น่าติดตามพอดีเพราะคำตอบที่ข้อสตัยในตอนนี้อย่างเป็น “เราไม่รู้”

สรุป

พัลส์วิทยุสองลูกจากเที่ยวบินบอลลูน ANITA เหนือแอนตาร์กติกาในปี 2006 และ 2014 ดูเหมือนมาจากมุมต่ำกว่าขอบฟ้าที่ชั้นจน Standard Model อธิบายได้ยาก การค้นหาเฉพาะทางของ Pierre Auger Observatory ในปี 2025 พบผู้สมัครเพียงหนึ่งเหตุการณ์ สอดคล้องกับพื้นหลัง ทั้งที่ควรพบหลายสิบเหตุการณ์ถ้าพัลส์เหล่านั้นมาจากฟลักซ์ของพายุอนุภาคพุ่งขึ้น ผลนี้ทำให้คำอธิบายแบบ “อนุภาคใหม่” แปลกประหลาดมีความเป็นไปได้น้อยลงอย่างมาก และชี้ไปทางผลจากการสะท้อน การแพร่กระจาย หรือเครื่องมือที่เฉพาะกับ ANITA มากกว่า — แต่สาเหตุยังไม่ทราบจริง ๆ ไม่ใช่อนุภาคใหม่ที่ยืนยันแล้ว และไม่ใช่อสัญญาณลึกลับจากภายในน้ำแข็ง

ประเมินแบบไม่เกินจริง

งานวิจัยแสดงอะไร: การค้นหาแบบปิดข้อมูลกลุ่ม ของ Pierre Auger (2004–2018) สำหรับพายุอนุภาคในบรรยากาศที่พุ่งขึ้น พบผู้สมัครหนึ่งเหตุการณ์ สอดคล้องกับพื้นหลังรังสีคอสมิกที่คาดไว้ 0.27 เหตุการณ์ ถ้าความผิดปกติของ ANITA มาจากฟลักซ์ของพายุชนิดนั้น Auger ควรเห็นราว 34–69 เหตุการณ์ (หรืออย่างน้อย ~8 ภายใต้สมมติฐานอนุรักษนิยม) จึงทำให้คำอธิบายแบบพายุพุ่งขึ้น รวมถึงฉาก “อนุภาคใหม่” beyond-the-Standard-Model มีความเป็นไปได้น้อยลงอย่างมาก

อะไรที่เป็นไปได้แต่ยังไม่พิสูจน์: ผลการสะท้อนหรือการแพร่คลื่นวิทยุใกล้หน้าแข็งและขอบฟ้า หรือ artifact ของเครื่องมือ/การวิเคราะห์ที่เฉพาะกับ ANITA

งานวิจัยไม่ได้แสดงอะไร: ไม่ได้แสดงว่าเหตุการณ์เกิดจากอนุภาคใหม่; ไม่ได้แสดงว่าเป็นสัญญาณจากใต้ผืนน้ำแข็ง; ไม่ได้เกี่ยวข้องกับสิ่งเหนือธรรมชาติ สิ่งประหลาด หรือสิ่งที่ได้ยิน; และไม่ได้แสดงว่าสาเหตุเป็นที่รู้แล้ว

ข้อจำกัดหลัก: ความสนใจด้าน beyond-the-Standard-Model ตั้งอยู่บน ~2 เหตุการณ์; งานนี้เป็นผลลบที่จำกัดความเป็นไปได้แต่ระบุสาเหตุไม่ได้; การตัดออกเจาะจงคำอธิบายแบบ “shower flux”; และยังไม่มีการทำซ้ำความผิดปกติดั้งเดิมโดยอิสระ

ผู้อ่านทั่วไปควรมั่นใจแค่ไหน? มั่นใจสูงว่านี่ *ไม่ใช่* การยืนยันอนุภาคใหม่ และ *ไม่ใช่* สัญญาณจากภายในน้ำแข็ง และคำอธิบายแบบฟลักซ์อนุภาคแปลกใหม่ถูกลดความเป็นไปได้ลงอย่างมาก แต่ความมั่นใจต่ำต่อสาเหตุจริง ซึ่งยังเปิดอยู่ ทำที่ที่เหมาะสมคือสนใจปริศนาที่ยังไม่แก้ แต่มีแนวโน้มสูงว่าจะลงเอยด้วยสาเหตุธรรมดา

แหล่งข้อมูล

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>