



The CLEAN PAPER

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

南极上空的两次异常射电脉冲仍未得到解释——“新粒子”解释正失去支持

几年前由气球搭载的南极实验记录的两次异常射电脉冲仍然没有公认的解释；皮埃尔·奥热天文台的一项专门搜索未发现这些脉冲所暗示的粒子暴雨的任何痕迹，使得奇异的“新粒子”解读远不那么可能，同时让异常仍然未解。

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 根天线朝下，对准南极冰层，安装在一座 25 英尺高的吊舱上。

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

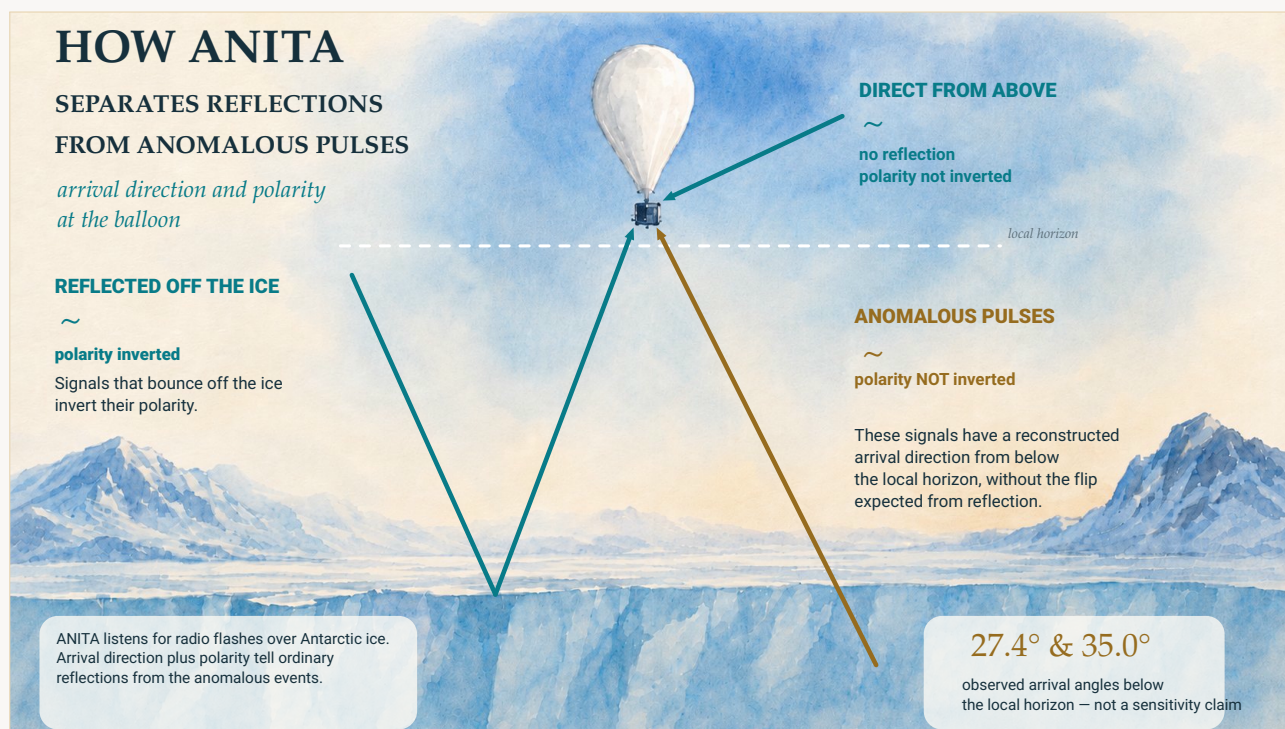
气球、冰层，以及来自下方的两个脉冲

在大部分任务期间，南极瞬态脉冲天线——ANITA——都悬挂在 NASA 气球下方，位于三十多公里的高空，连续数周飞过地球上最荒凉的地方，进行监听。

它监听来自太空的无线电信号。当一个超高能粒子——宇宙射线或中微子——撞上空气或冰层时，会碎裂成一阵更小的粒子，而这阵粒子会发出短暂的无线电闪光。南极几乎是捕捉它们的理想地点：冰层有数公里厚，洁净而寒冷，无线电穿过它时几乎就像穿过玻璃；周围几百公里内也没有多少东西会让信号变得杂乱。ANITA 的任务就是捕捉这些闪光，并根据它们的形状和到达时间，判断是什么造成了它们。

它听到的大多数信号都循规蹈矩。有些闪光直接从上方到达。更多闪光会擦过冰面后反弹回来，向上到达天线——而它们带有一个一眼就能辨认的线索：反弹会让波形上下颠倒，也就是信号的极性发生反转。这是区分反射信号和真实信号的方法。

但有两次，情况打破了这个模式。



在气球处，直接从上方到达的脉冲不会翻转，而反射脉冲到达时极性会翻转——这是信号从冰面反弹的通常迹象。但这两个异常脉冲从当地地平线下方一个很陡的重建方向到达，却没有发生这种翻转；如果是反射，它们本应翻转。“来自下方”描述的是它们的到达方向——并不是说有粒子从地球内部爬出来。

Original hybrid diagram —The Clean Paper CC BY 4.0

在 2006 年的一次飞行和 2014 年的另一次飞行中，ANITA 捕捉到了来自地平线下方很陡方向的脉冲，分别位于地平线以下 27.4° 和 35.0° ——看起来就像是这片大陆内部向上出来的，而且没有发生反转。那就不是反射了。似乎确实有什么东西向上穿过冰层，朝气球传播。

这之所以近乎令人震惊，是因为要以如此陡的向上角度到达天线，产生脉冲的东西必须穿过行星本体——六七千公里的固体岩石。几乎没有什么能做到这一点。已知唯一一种穿过普通物质时几乎视若无物的粒子是中微子；它可以毫无察觉地穿过整个地球。因此，自然的想法是：一个中微子穿过岩石，在冰层正下方撞上一个原子，产生一阵向上飞驰的粒子，而 ANITA 捕捉到了这阵粒子发出的无线电闪光。问题在于，一个转折让这个解释失效了：能产生这个信号的中微子，实际上太容易被阻挡。穿过那么多岩石时，它应该被吸收很多次才对。而且，如果有足够强的中微子流，竟然还有两个中微子穿了过来，那么专门为捕捉这类信号而建造的巨型探测器应该也会看到它们。可整套简洁的解释没有一个真正闭合。

于是，这两个脉冲就这样留在那里，拒绝循规蹈矩。它们不是发现——两个事件从来不能算发现——但也不是什么都没有。它们是真正的异常：之所以有趣，恰恰是因为当时没人能确定，这究竟是物理学标准模型出现裂缝，还是冰层、天线或计算过程中的偶然问题。

事情到了这里，某种类型的报道就会搬出“神秘”这个词，调暗灯光，追问南极下面可能住着什么。请抵制这种冲动。真正的问题从来不是冰里有什么怪物，而是那个耐心、朴素、真正推动科学前进的问题：**怎样才能查清楚？**

作者做了什么

有一种干净利落的方法可以检验那些令人兴奋的解释。如果 ANITA 的脉冲来自一种真实且会反复出现的向上空气簇射通量——无论来源是普通的 tau 中微子，还是某种有人提出的新粒子——那么，一个足够大的探测器只要专门观察这类事件，就应该能捕捉到其中一部分。

位于阿根廷的 皮埃尔·奥格尔观测站——有史以来建造的最大宇宙射线探测器——非常适合进行这项搜索。合作组使用荧光探测器，在 2004 年至 2018 年的数据中搜索向上的空气簇射（从下方到达，天顶角大于 110° ，能量高于 0.1 EeV ）。关键在于，完整的筛选标准是在查看完整数据集之前就确定的——这是一项“盲”分析，因此答案不可能被人为调整到符合期待的结果。

他们发现了什么

解除盲态后，只有一个候选事件存活下来——它与普通宇宙射线偶尔被错误重建为向上事件所预期的 0.27 ± 0.12 个事件完全一致。换句话说，没有真正的向上信号，只有预期中的那一点背景噪声。

这个结果的力度来自比较。如果 ANITA 的脉冲来自稳定的向上簇射通量，Auger 应该记录到许多事件：在一种合理的能谱下，大约应有 34 到 69 个；即使采用刻意保守的假设，也至少应有约 8 个。它只发现了一个，而且与背景一致。作者将此描述为与向上簇射解释存在“强烈不一致”。

这可能意味着什么

这样规模的未探测结果本身就包含信息。如果 ANITA 事件来自一群从这些方向到达的真实粒子——普通的 tau 中微子，或为解释这些事件而提出的假想新粒子——那么 Auger 的长期观测应该捕捉到相当数量的事件。但它没有。这实际上排除了“向上簇射的弥散通量”这一解释——大多数超出标准模型的想法都属于这一类——除非存在人为设计的特殊条件。

剩下的解释不是簇射粒子通量：目前讨论最多的是冰层和近地平线几何形状特有的反射或传播效应，或者仪器或分析伪影。没有一种得到确认。因此，诚实的总结是：最令人兴奋的解释刚刚遭受了严重打击，而原因仍然未知。

这并不证明什么

- 它没有确定这两个脉冲究竟是什么。“强烈不支持新物理”不等于“问题已经解决”。
- 它没有确认某个普通原因。一个主要候选解释——来自南极表面下方的反射——仍然只是一个假设，而不是结果。
- 它没有从字面意义上探测到任何“来自冰层下方”的东西。ANITA 的天线悬挂在南极上方的气球下；“来自下方”描述的是无线电脉冲重建出的到达方向——不是声音、话语，也不是任何从冰层内部发出的东西。

- 它不支持“已经确认新粒子”的说法。这个故事最广泛传播的版本，指向的方向与证据恰恰相反。

证据有多强？

不算强，且应如实表述。

- 对超出标准模型的兴趣，实质上建立在来自两次 ANITA 飞行的**两个**事件之上。
- 这篇论文是一个**零结果**：它排除可能性的能力很强，但无法说明这些事件是什么。
- 排除结果具有定量性且很强（预期有几十个事件，实际看到一个类似背景的事件）——但它针对的是“向上簇射通量”解释，而不是所有可以想象的原因。
- 一个主要的普通解释（近地表反射）看起来合理，但尚未得到证明；一些替代解释（某些过渡辐射模型）已被其他研究认为不太可能。
- 没有任何实验独立复现最初的异常。

这是施加在一个规模很小、却顽固存在的谜题之上的严格约束——不是发现。

为什么这很重要

提出的解释一路延伸到了奇异的新粒子。这个领域没有追逐最令人兴奋的可能性，而是做了件不起眼的事：用一个独立且规模大得多的探测器检验这个想法——数据给出的答案是否定的。一台更大、灵敏度更高的后继仪器 PUEO 正在建造中，将再次开展搜索。

这个异常最终可能只是普通现象。这并不意味着它是失败。把一项无法解释的测量不断收窄，直到它消失，或者迫使我们面对真正的发现，这就是科学工作本身——而它值得关注，正是因为目前诚实的答案仍然是：“我们不知道。”

简明总结

ANITA 在 2006 年和 2014 年南极气球飞行中探测到的两个无线电脉冲，看起来来自地平线下方很陡的角度，标准模型难以解释这一点。2025 年，皮埃尔·奥格尔观测站开展了一项专门搜索，只找到一个与背景一致的候选事件；如果这些脉冲来自向上簇射通量，原本应当看到几十个事件。这强烈削弱了奇异的“新粒子”解释，并指向 ANITA 特有的反射、传播或仪器效应——但真正原因仍然未知。它不是已确认的新粒子，也不是来自冰层内部的神秘信号。

不绕弯检查

论文显示的内容：皮埃尔·奥格尔观测站对 2004–2018 年向上空气簇射开展了盲搜索，发现一个候选事件，与预期的 0.27 个宇宙射线背景事件一致。如果 ANITA 异常来自这类簇射的粒子流，Auger 应该看到约 34–69 个事件（在保守假设下也至少约 ~8 个）。这强烈削弱了向上簇射解释，包括超出标准模型的“新粒子”情景。

合理但尚未证明的内容：冰层和地平线附近的反射或无线电传播效应，或者 ANITA 特有的仪器/分析伪影。

它没有显示的内容：这些事件由新粒子造成；它们是来自冰层下方的信号；其中涉及任何超自然、人工或可听见的东西；或者原因现在已经清楚。

主要限制：对超出标准模型的兴趣建立在约两个事件之上；这是一个能够施加约束、却无法确定事件性质的零结果；排除的对象具体是“簇射通量”解释；没有对最初异常的独立复现。

普通读者应有多大信心？可以高度确信这不是已确认的新粒子，也不是来自冰层内部的信号，并且奇异的粒子流解释如今已受到强烈削弱。对于真正原因的判断则应保持低置信度，因为它仍未揭晓。合适的态度是：对一个尚未解决、但最有可能属于普通现象的异常保持好奇。

来源

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>