



The CLEAN PAPER

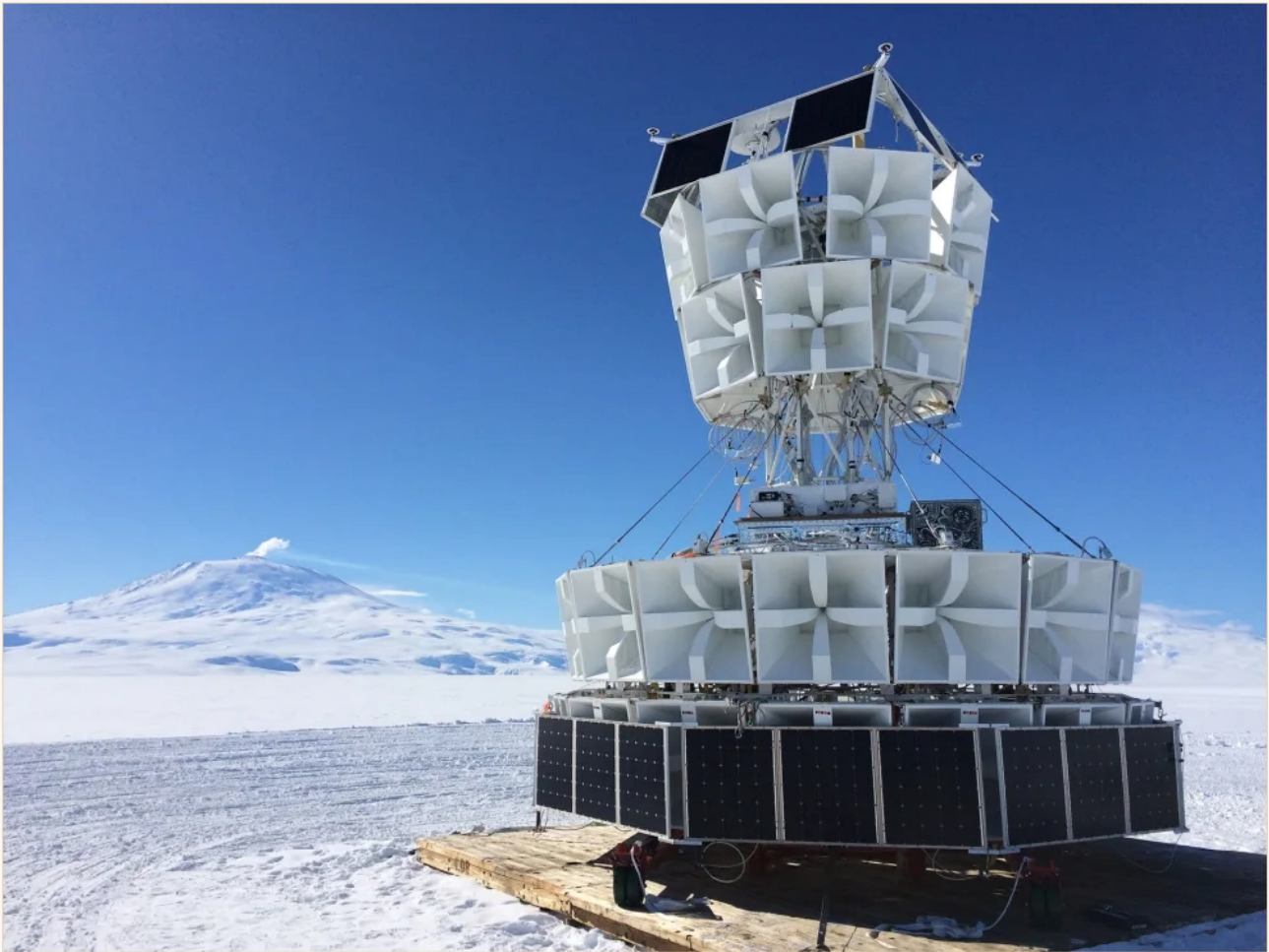
WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

남극 상공에서 잡힌 두 개의 이상 전파 펄스는 여전히 설명되지 않았다—‘새 입자’설명은 설득력을 잃고 있다

수년 전 남극의 풍선 탑재 실험이 기록한 두 개의 이례적인 전파 펄스에는 아직 합의된 설명이 없다. 피에르 오제 관측소의 전용 검색은 그 해석이 맞다면 나와야 할 샤워의 흔적을 찾지 못했고, 이국적인 ‘새 입자’해석의 가능성을 크게 낮췄지만 이상 현상 자체는 여전히 미해결로 남아 있다.

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



ANITA의 48개 안테나는 높이 25 피트의 곤돌라에서 남극 얼음을 향해 아래쪽을 바라본다.

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

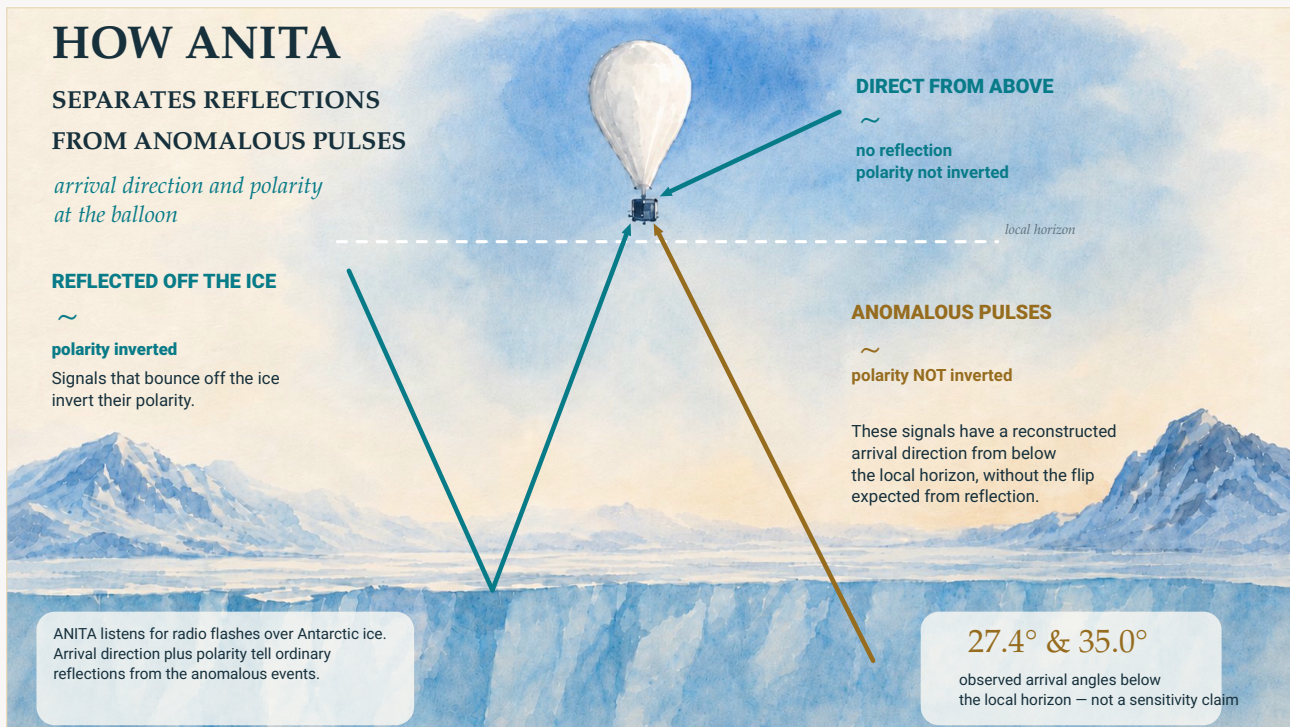
풍선과 얼음, 그리고 아래에서 온 두 개의 펄스

남극 충격성 천이 안테나, 즉 ANITA는 관측 기간의 대부분을 NASA 풍선 아래에 매달린 채 지상 약 30여 km 상공에서 보낸다. 지구에서 가장 텅 빈 곳 가운데 하나인 남극 위를 몇 주씩 떠다니며 귀를 기울인다.

ANITA가 듣는 것은 우주에서 오는 전파 신호다. 우주선이나 중성미자 같은 초고에너지 입자가 공기나 얼음에 부딪히면 더 작은 입자들의 샤워로 쪼개지고, 그 샤워는 아주 짧은 전파 섬광을 낸다. 남극은 이런 신호를 잡기에 거의 이상적인 곳이다. 깨끗하고 차가운 얼음이 수 km 두께로 이어져 전파가 마치 유리를 통과하듯 지나가고, 수백 km에 걸쳐 신호를 어지럽힐 것이 거의 없다. ANITA의 일은 이 섬광을 포착한 뒤 모양과 도달 시간을 읽어 무엇이 만들었는지 추론하는 것이다.

대부분의 신호는 예상대로 행동한다. 어떤 섬광은 위에서 곧장 내려온다. 더 많은 신호는 얼음 표면에 스치듯 닿았다가 안테나 쪽으로 반사되어 올라온다. 그리고 이 반사 신호에는 눈에 띄는 표지가 있다. 반사되면서 파형이 뒤집힌다. 즉 신호의 극성이 반전된다. 물리학자라면 한눈에 알아볼 수 있는 특징이다. 이것이 반사 신호와 직접 들어온 신호를 구분하는 방법이다.

그런데 두 번, 이 규칙을 깨는 신호가 들어왔다.



풍선에서 볼 때 위에서 곧장 온 펄스는 뒤집히지 않은 채 도착하고, 얼음에서 반사된 펄스는 극성이 뒤집혀 도착한다. 이것이 얼음 반사의 전형적인 표지다. 그러나 두 이상 펄스는 재구성된 도달 방향이 국소 지평선보다 훨씬 아래였는데도, 반사였다면 나타나야 할 극성 반전이 없었다. 여기서 “아래에서 왔다”는 말은 그 도달 방향을 뜻할 뿐, 입자가 지구 안에서 기어 올라왔다는 뜻은 아니다.

Original hybrid diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

2006 년 비행에서 한 번, 2014 년 비행에서 또 한 번, ANITA 는 지평선보다 각각 27.4° 와 35.0° 아래인 가파른 아래쪽 방향에서 온 펄스를 포착했다. 마치 남극 대륙 안에서 위로 솟아올라온 것처럼 보였지만, 극성은 반전되지 않았다. 그렇다면 단순한 반사 신호는 아니다. 얼음 쪽에서 풍선을 향해 실제로 위로 이동한 무언가가 만든 신호처럼 보였다.

왜 이것이 거의 충격적인 일인지 보자. 그렇게 가파른 상향 각도로 안테나에 도달하려면, 펄스를 만든 원인은 지구 몸체를 통과해 올라와야 했다. 단단한 암석을 6,000~7,000km 나 지나야 한다. 그런 일을 할 수 있는 것은 거의 없다. 보통 물질을 거의 없는 것처럼 통과하는 것으로 알려진 입자가 하나 있는데, 바로 중성미자다. 중성미자는 지구 전체를 거의 아무 일도 없다는 듯 통과할 수 있다. 그래서 자연스러운 설명은 이렇다. 중성미자가 암석을 뚫고 위로 올라와 얼음 바로 아래에서 원자와 충돌했고, 위쪽으로 질주하는 입자 샤워를 만들었으며, ANITA 가 그 전파 섬광을 잡았다는 것이다. 그런데 문제가 하나 있다. 이 정도 신호를 만들 만큼 에너지가 높은 중성미자는 오히려 너무 잘 막힌다. 그만큼 많은 암석을 지나면 여러 번 흡수되고도 남아야 한다. 게다가 그중 두 개가 살아남아 도달할 정도로 강한 중성미자 흐름이었다면, 바로 그런 입자를 잡기 위해 만든 거대한 검출기들에도 나타났어야 한다. 어느 단순한 설명도 완전히 맞아떨어지지 않았다.

그래서 이 두 펄스는 계속 말썽을 부렸다. 발견이라고 부를 수는 없다. 사건 두 개만으로는 어떤 발견도 확정할 수 없다. 그렇다고 아무것도 아닌 것도 아니다. 진짜 이상 현상이었다. 흥미로운 이유는 바로 아직 누구도 이것이 표준모형의 틈인지, 아니면 얼음이나 안테나 혹은 계산상의 특이점일 뿐인지 말할 수 없었기 때문이다.

이쯤 되면 어떤 종류의 보도는 미스터리라는 단어를 꺼내고 조명을 어둡게 한 뒤 남극 아래에 무엇이 살고 있을지 묻기 시작한다. 그러지 말자. 진짜 질문은 처음부터 얼음 속에 무슨 괴물이 있다가 아니었다. 과학을 실제로 앞으로 움직이는, 느리고 화려하지 않은 질문이었다. **어떻게 알아낼 것인가?**

연구진이 한 일

흥미로운 설명을 시험하는 비교적 직접적인 방법이 있다. ANITA의 펄스가 실제로 반복해서 들어오는 상향 입자 샤워의 흐름에서 비롯됐다면, 그것이 보통의 타우 중성미자든 제안된 새로운 입자든 간에, 충분히 큰 검출기가 바로 그런 사건을 지켜보고 있다면 일부를 포착해야 한다.

아르헨티나의 피에르 오제 관측소는 지금까지 건설된 가장 큰 우주선 검출기로, 이 검증에 적합하다. 공동 연구팀은 형광 검출기를 이용해 2004~2018년 자료에서 상향 대기 샤워를 찾았다. 여기서는 아래에서 들어오는 것으로 재구성되고, 천정각이 110° 를 넘으며, 에너지가 0.1 EeV 이상인 사건을 대상으로 했다. 중요한 점은 전체 자료를 보기 전에 선별 기준을 완전히 고정했다는 것이다. 기대하는 답에 맞춰 분석을 손볼 수 없도록 한 “블라인드” 분석이었다.

무엇을 발견했나

블라인드를 해제한 뒤 살아남은 후보 사건은 **하나**였다. 보통 우주선 사건이 가끔 상향 사건으로 잘못 재구성될 때 예상되는 0.27 ± 0.12 건과 완전히 양립한다. 다시 말해 진짜 상향 신호는 없었다. 예상되는 정도의 배경 사건만 조금 남았다.

결과의 힘은 비교에서 나온다. ANITA 펄스가 일정한 상향 샤워 흐름에서 왔다면 오제 관측소는 **여러 건**을 봤어야 한다. 그럴듯한 한 에너지 스펙트럼을 가정하면 약 34~69 건, 일부러 보수적인 가정을 써도 적어도 약 8 건이다. 실제로는 배경과 양립하는 한 건뿐이었다. 저자들은 이를 상향 샤워 해석과의 “강한 불일치”라고 표현한다.

이것이 아마 뜻하는 것

이 정도 규모의 미검출은 충분히 정보가 된다. ANITA 사건이 실제로 그 방향에서 오는 입자 집단, 즉 보통의 타우 중성미자나 이를 설명하기 위해 제안된 가상의 새 입자에서 비롯됐다면, 오제 관측소의 긴 관측 기간 동안 상당한 수가 포착됐어야 한다. 그렇지 않았다. 인위적으로 특별한 조건을 붙이지 않는 한, 이 결과는 “상향 샤워의 확산성 플럭스” 설명을 사실상 배제한다. 표준모형을 넘어서 설명의 상당수가 바로 이 범주에 들어간다.

남는 것은 샤워를 만드는 입자 흐름이 아닌 설명들이다. 가장 많이 논의되는 것은 얼음과 지평선 가까이의 기하에 특이한 반사 또는 전파 전파 효과, 혹은 기기나 분석상의 인공물이다. 어느 것도 확인되지는 않았다. 따라서 정직한 요약은 이렇다. 가장 흥미진진했던 해석은 큰 타격을 받았지만, 원인은 여전히 모른다.

이것이 증명하지 않는 것

- 두 펄스가 무엇인지 **밝혀낸 것이 아니다**. “새 물리를 강하게 불리하게 만든다”는 말은 “해결됐다”는 뜻이 아니다.
- 평범한 원인이 **확인된 것도 아니다**. 유력한 후보인 남극 표면 아래 층에서의 반사는 여전히 가설이지, 결과가 아니다.
- 문자 그대로 “얼음 밑에서” 무언가를 검출한 것이 **아니다**. ANITA 안테나는 남극 위의 풍선에 매달려 있다. “아래에서”는 전파 펄스의 재구성된 도달 방향을 뜻할 뿐, 소리나 목소리 혹은 얼음 내부에서 방출된 무언가를 뜻하지 않는다.
- 확인된 새 입자가 있다는 주장을 **뒷받침하지 않는다**. 널리 퍼진 이 이야기의 버전은 실제 증거가 가리키는 방향과 정반대다.

근거는 얼마나 탄탄한가?

제한적이며, 논문도 그렇게 말한다.

- 표준모형을 넘어선 물리에 대한 관심은 본질적으로 ANITA 두 번의 비행에서 나온 **두 사건**에 기반한다.
- 이 논문은 **널 결과 (null result)** 다. 가능성을 배제하는 데는 강력하지만, 사건이 무엇인지는 말해주지 못한다.
- 배제력은 정량적이고 강하다. 수십 건을 예상했는데 배경과 비슷한 한 건만 봤다. 다만 겨냥하는 것은 “상향 샤워 플럭스” 해석이지, 상상 가능한 모든 원인이 아니다.
- 유력한 평범한 설명인 근표면 반사는 그럴듯하지만 입증되지 않았다. 일부 다른 설명, 예컨대 특정 전이복사 모델은 다른 연구에서 불리해졌다.
- 어떤 실험도 원래의 이상 현상을 독립적으로 재현하지 못했다.

작지만 끈질긴 퍼즐 위에 매우 날카로운 제약 하나가 추가된 것이다. 발견은 아니다.

왜 중요한가

제안된 설명 가운데는 이국적인 새 입자까지 있었다. 연구자들은 가장 흥미로운 설명을 좇는 대신 덜 화려한 일을 했다. 독립적이고 훨씬 큰 검출기로 그 아이디어를 시험했고, 데이터는 아니라고 답했다. 더 크고 민감한 후속 장비인 PUEO도 다시 살펴보기 위해 건설되고 있다.

이 이상 현상은 결국 평범한 원인으로 밝혀질 수도 있다. 그렇다고 실패가 되는 것은 아니다. 설명되지 않은 측정을 하나씩 좁혀가며, 결국 사라지게 만들거나 진짜 발견을 강요하도록 하는 것 자체가 과학의 일이다. 지금으로서는 정직한 답이 여전히 “모른다” 이기 때문에 오히려 지켜볼 가치가 있다.

핵심 요약

ANITA가 2006 년과 2014 년 남극 풍선 비행에서 기록한 두 전파 펄스는 표준모형으로 설명하기 어려운, 지평선보다 훨씬 아래의 가파른 방향에서 온 것처럼 보인다. 2025 년 피에르 오제 관측소의 전용 검색에서는 상향 샤워 플럭스가 원인이었다면 수십 건이 나와야 했지만, 배경과 양립하는 후보 한 건만 발견됐다. 이는 이국적인 “새 입자” 해석을 강하게 불리하게 만들고, ANITA 에 특이한 반사·전파 전파·기기 효과 쪽을 더 그럴듯하게 만든다. 하지만 원인은 정말로 아직 모른다. 확인된 새 입자도 아니고, 얼음 내부에서 온 수수께끼 신호도 아니다.

과장 없이 보면

논문이 보여주는 것: 2004~2018 년 자료를 사용한 피에르 오제의 블라인드 상향 대기 샤워 검색에서 후보 한 건이 나왔고, 이는 예상되는 우주선 배경 0.27 건과 양립한다. ANITA 이상 현상이 이런 샤워의 플럭스에서 비롯됐다면 오제는 약 34~69 건, 보수적인 가정에서도 적어도 약 8 건을 봐야 한다. 따라서 표준모형 너머의 “새 입자” 시나리오를 포함한 상향 샤워 해석은 강하게 불리해졌다.

그렇듯하지만 입증되지 않은 것: 얼음과 지평선 근처에서 생기는 반사 또는 전파 전파 효과, 혹은 ANITA 에 특이한 기기/분석상의 인공물.

보여주지 않는 것: 사건이 새 입자 때문에 생겼다는 것, 얼음 밑에서 온 신호라는 것, 초자연적·인공적·가칭 현상과 관련 있다는 것, 원인이 이제 밝혀졌다는 것.

주요 한계: 표준모형 너머 물리에 대한 관심은 약 두 사건에 달려 있다. 이번 연구는 원인을 식별하는 것이 아니라 제약을 거는 널 결과다. 배제되는 것은 특히 “샤워 플럭스” 해석이며, 원래 이상 현상은 독립적으로 재현되지 않았다.

일반 독자는 어느 정도 확신해도 되는가? 이것이 확인된 새 입자도 아니고 얼음 내부에서 온 신호도 아니며, 이국적 플럭스 해석이 이제 강하게 불리해졌다는 데에는 높은 확신을 가져도 된다. 실제 원인이 무엇인지에 대해서는 확신이 낮아야 한다. 가장 적절한 태도는, 아마 평범한 원인일 가능성이 큰 미해결 이상 현상에 대한 호기심이다.

출처

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>