



The CLEAN PAPER

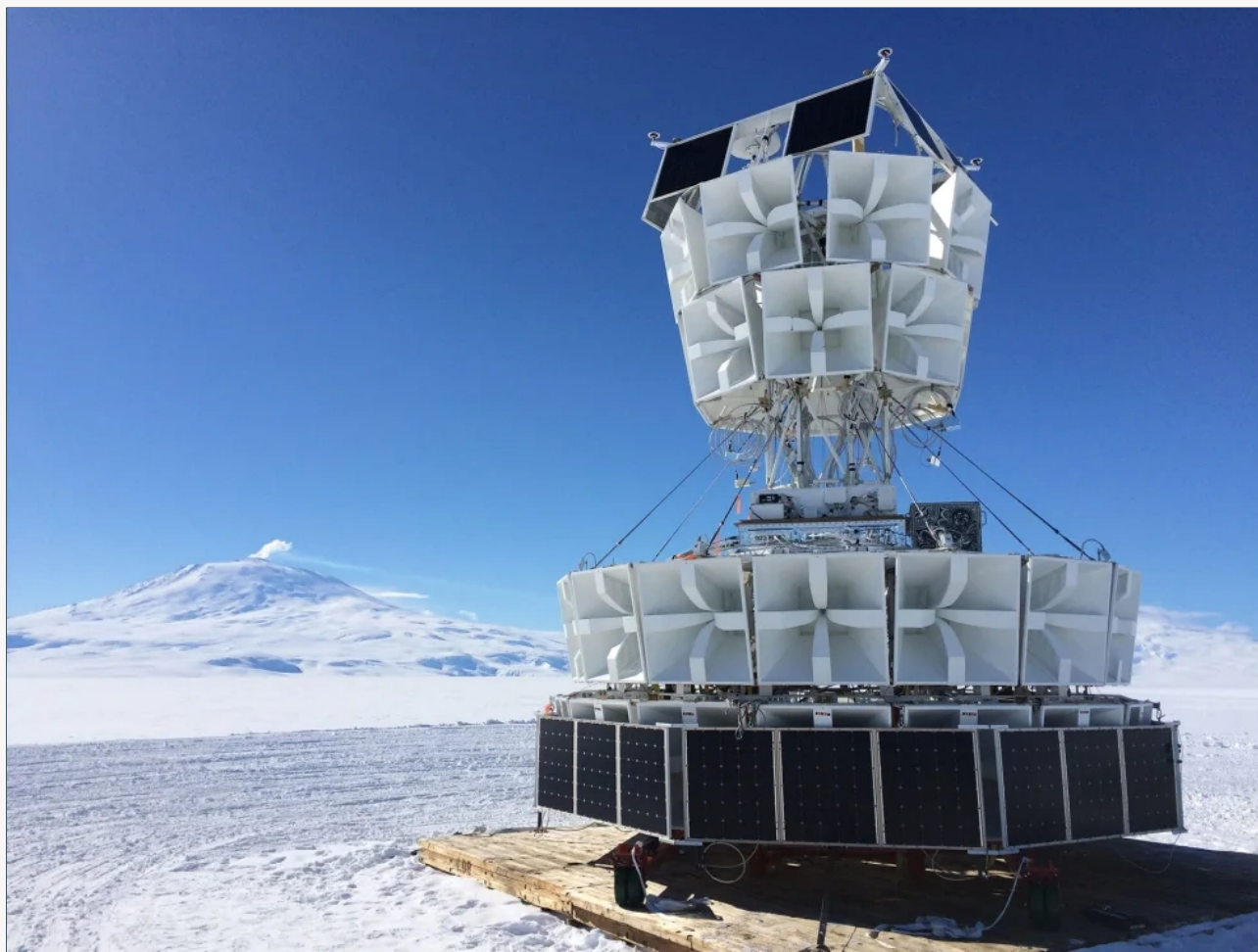
WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

שני פולסי רדיו חריגים מעל אנטארקטיקה עדיין אינם מוסברים — והסבר "החלקיק החדש" מאבד תמיכה

שני פולסי רדיו בלתי רגילים שתועדו לפני שנים בניסוי אנטארקטי שנישא בבלון עדיין אינם מוסברים בהסכמה, חיפוש ייעודי של *Auger Pierre* לא מצא את עקבות המקלחות שהיו אמורות להופיע, ולכן הקריאה האקזוטית של "חלקיק חדש" נעשית רבה פחות סבירה, אף שהאנומליה נשארת פתוחה.

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



48 האנטנות של ANITA מכוונות מטה אל הקרח האנטארקטי מתוך גונדולה בגובה 25 רגל.

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

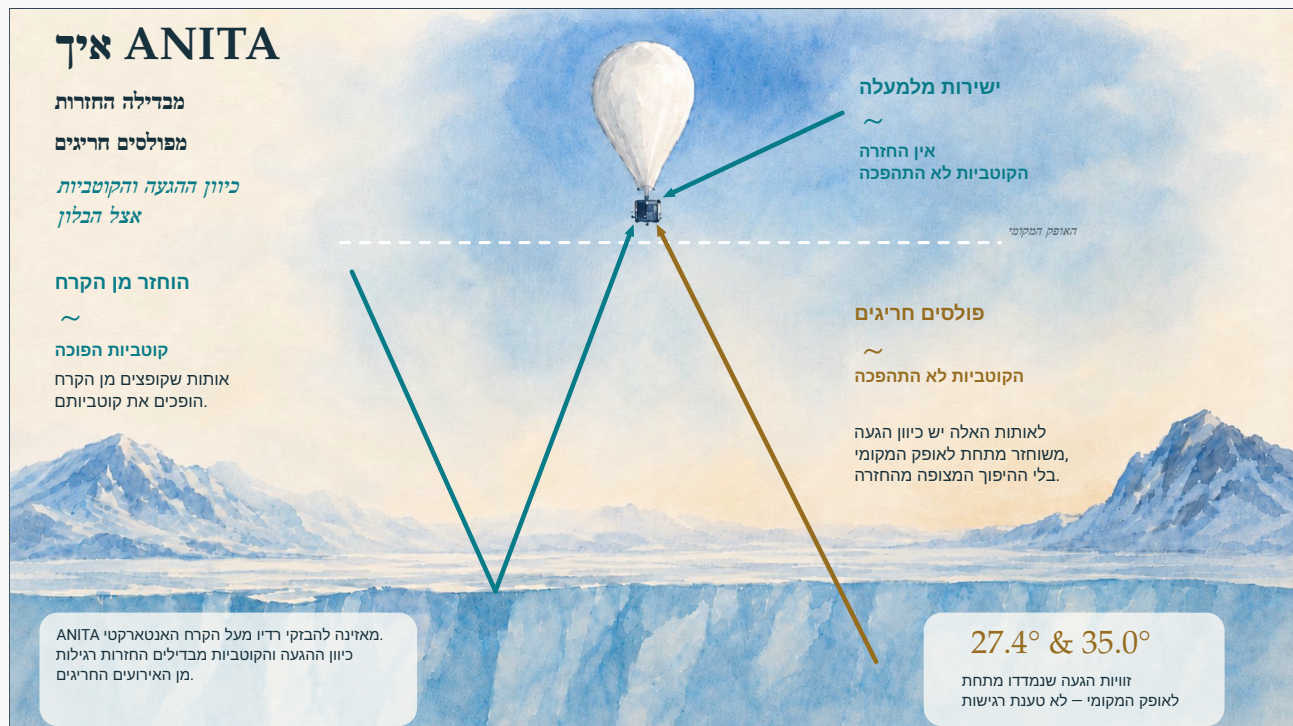
הבלון, הקרח ושני פולסים מלמטה

ברוב שנות הפעולה שלה, ANITA — Antenna Transient Impulsive Antarctic — תלויה מתחת לבלון של NASA, בגובה של קצת יותר משלושים קילומטרים, ונסחפת במשך שבועות מעל המקום הריק ביותר על פני כדור הארץ, מאזינה.

היא מאזינה לאותות רדיו מן החלל. כאשר חלקיק עתיר אנרגיה מאוד — קרן קוסמית או נייטרינו — פוגע באוויר או בקרח, הוא מתפרק למקלחת של חלקיקים קטנים יותר, והמקלחת הזאת פולטת הבזק רדיו קצר. אנטארקטיקה כמעט אידיאלית לתפיסה שלהם: קילומטרים של קרח נקי וקר, שרדיו עובר דרכו כמעט כאילו היה זכוכית, וכמעט שום דבר במרחק מאות קילומטרים שיבלבל את האות. תפקידה של ANITA הוא לתפוס את ההבזקים האלה ולקרוא, מן הצורה והתזמון שלהם, מה יצר אותם.

רוב מה שהיא שומעת מתנהג יפה. חלק מן ההבזקים מגיעים ישירות מלמעלה. רבים יותר פוגעים בקרח בזווית וחוזרים למעלה אל האנטנה — ואלה נושאים סימן מסגיר: ההחזרה הופכת את הגל על ראשו, כלומר הופכת את הקוטביות של האות. זהו סימן שפיזיקאים יודעים לקרוא במבט אחד. כך מבחינים בין החזרה לבין הדבר עצמו.

פעמיים הגיע משהו ששבר את הדפוס.



אצל הבלון, פולס שמגיע ישירות מלמעלה מגיע ללא היפוך, ואילו פולס מוחזר מגיע עם קוטביות הפוכה – הסימן הרגיל להחזרה מן הקרח. שני הפולסים החריגים, לעומת זאת, מגיעים מכיוון משוחרר הנמצא עמוק מתחת לאופק המקומי – אך בלי היפוך כזה, במקום שבו החזרה הייתה אמורה להפוך אותם. "מלמטה" מתאר את כיוון ההגעה הזה – לא חלקיק המטפס מתוך כדור הארץ.

Original hybrid diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

בטיסה אחת בשנת 2006 ובטיסה אחרת בשנת 2014, ANITA קלטה פולס שהגיע בזווית תלולה מתחת לאופק – 27.4° ו- 35.0° מתחתיו, בהתאמה – כאילו יצא מן היבשת, וללא היפוך. אם כך, לא החזרה. משהו שבאמת נע כלפי מעלה, מתוך הקרח, אל הבלון.

כאן הסיפור נעשה כמעט שערורייתי. כדי להגיע אל האנטנה בזווית עולה כה תלולה, מה שיצר את הפולס היה צריך לעבור דרך גוף כדור הארץ – שישה או שבעה אלפי קילומטרים של סלע מוצק. כמעט שום דבר אינו יכול לעשות זאת. החלקיק הידוע היחיד שעובר דרך חומר רגיל כאילו הוא כמעט לא שם הוא הנייטרינו, שמחליק דרך כל כדור הארץ בלי לשים לב. לכן הרעיון הטבעי הוא שנייטרינו נע כלפי מעלה דרך הסלע, פגע באטום ממש מתחת לקרח, ויצר מקלחת חלקיקים שטסה מעלה, שאת הבזק הרדיו שלה ANITA קלטה. הבעיה היא הפיתול: נייטרינו אנרגטי מספיק כדי ליצור אות כזה הוא למעשה קל מדי לעצירה. לאורך כל כך הרבה סלע הוא אמור להיבלע שוב ושוב. וזרם נייטרינים חזק מספיק כדי ששניים בכל זאת יעברו היה אמור להופיע בגלאי הענק שנבנו בדיוק בשביל לתפוס אותם. אף אחד מן ההסברים המסודרים לא נסגר עד הסוף.

וכך שני הפולסים נשארו שם, מסרבים להתנהג. לא תגלית – שני אירועים לעולם אינם תגלית – אבל גם לא כלום. אנומליה אמיתית: מן הסוג שמעניין בדיוק מפני שאיש עדיין לא ידע לומר אם היא סדק במודל הסטנדרטי של הפיזיקה או רק מוזרות של הקרח, האנטנה או החשבון.

זה המקום שבו סוג מסוים של סיקור מושיט יד למילה מסתורית, מעמעם את האורות ושואל מה אולי חי מתחת לאנטארקטיקה. כדאי להתנגד לזה. השאלה האמיתית מעולם לא הייתה איזו מפלצת נמצאת בקרח. זו הייתה השאלה הסבלנית והלא-זוהרת שבאמת מקדמת מדע: איך מבררים?

מה עשו המהברים

יש דרך נקייה לבדוק את ההסברים המלהיבים. אם הפולסים של ANITA מגיעים משטף אמיתי וחוזר של מקלחות חלקיקים העולות כלפי מעלה — בין שמדובר בנייטריני טאו רגילים ובין שמדובר בחלקיק חדש שהוצע כדי להסביר אותם — גלאי גדול מספיק שמחפש בדיוק אירועים כאלה אמור לתפוס חלק מהם.

Observatory Auger Pierre בארגנטינה — גלאי הקרניים הקוסמיות הגדול ביותר שנבנה אי פעם — ממוקם היטב לחיפוש כזה. באמצעות גלאי הפלואורסצנציה שלו, שיתוף הפעולה חיפש מקלחות אוויר העולות כלפי מעלה, כלומר מגיעות מלמטה בזוויות זנית מעל 110° ובאנרגיות מעל 0.1 EeV , בנתונים מן השנים 2004 עד 2018. חשוב מכך: כל כללי הסינון נקבעו לפני בחינת מערך הנתונים המלא — ניתוח "עיוור", כדי שלא יהיה אפשר לעצב את התשובה לכיוון תוצאה רצויה.

מה הם מצאו

לאחר פתיחת העיוורון, אירוע מועמד אחד שרד — והוא תואם לגמרי את 0.27 ± 0.12 האירועים הצפויים מקרניים קוסמיות רגילות שמדי פעם משוחזרות בטעות כעולות כלפי מעלה. במילים אחרות: לא אות אמיתי העולה מלמטה, אלא בדיוק טפטוף הרקע שהייתם מצפים לו.

כוח התוצאה נמצא בהשוואה. אם הפולסים של ANITA הגיעו משטף יציב של מקלחות עולות, Auger היה אמור לרשום אירועים רבים — בערך 34 עד 69 אירועים כאלה עבור ספקטרום אנרגיה סביר אחד, ולפחות כ-8 גם בהנחות שמרניות במכוון. הוא מצא אחד, תואם לרקע. המהברים מתארים זאת כ"אי-הסכמה חזקה" עם פרשנות המקלחות העולות.

מה זה כנראה אומר

אי-זיהוי בגודל כזה הוא מידע משמעותי. אם אירועי ANITA הגיעו מאוכלוסייה אמיתית של חלקיקים שהגיעו מן הכיוונים האלה — בנייטריני טאו רגילים, או החלקיקים החדשים ההיפותטיים שהוצעו כדי להסביר אותם — החשיפה הארוכה של Auger הייתה אמורה לתפוס מספר ניכר מהם. היא לא עשתה זאת. זה למעשה שולל את הסבר "השטף הדיפוזי של מקלחות עולות" — הקטגוריה שאליה נופלים רוב הרעיונות שמעבר למודל הסטנדרטי — אלא אם מוסיפים תנאים מיוחדים ומאולצים.

מה שנשאר הם הסברים שאינם שטף של חלקיקים היוצרים מקלחות: בעיקר אפקט החזרה או התפשטות ייחודי לקרח ולגאומטריה סמוכת-האופק, או ארטיפקט של המכשיר או של הניתוח. אף אחד מהם לא אושר. לכן הסיכום הישר הוא: הפרשנות המלהיבה ביותר ספגה מכה רצינית, והגורם עדיין אינו ידוע.

מה זה לא מוכיח

- זה לא מזהה מה הם שני הפולסים. "מחליש מאוד פיזיקה חדשה" אינו "פתור".
- זה לא מאשר סיבה שגרתית. מועמד מוביל — החזרות מתחת לפני השטח של אנטארקטיקה — נשאר השערה,

לא תוצאה.

- זה לא מזהה משהו "מתחת לקרח" במובן מילולי כלשהו. האנטנות של ANITA תלויות מבלון מעל אנטארקטיקה; "מלמטה" מתאר את כיוון ההגעה המשוחזר של פולס רדיו — לא קול, לא מסר ולא משהו שנובע מתוך הקרח.
- זה לא תומך בטענות על חלקיק חדש שאושר. הגרסה הנפוצה ביותר של הסיפור הזה מצביעה בכיוון ההפוך מן הראיות.

עד כמה הראיות חזקות?

בינוניות, וכך גם מוצגות.

- העניין שמעבר למודל הסטנדרטי נשען למעשה על שני אירועים, משתי טיסות של ANITA.
 - המאמר הזה הוא תוצאת אפס: חזקה לצמצום אפשרויות, אבל אינה יכולה לומר מה האירועים כן.
 - ההדרה כמותית וחזקה — עשרות אירועים היו צפויים, ונראה אירוע אחד דמוי-רקע — אבל היא מכוונת לפרשנות "שטף המקלחות העולות", לא לכל סיבה שאפשר לדמיין.
 - הסבר שגרתי מוביל, החזרה סמוכת-פני-שטח, סביר אך לא מוכח; חלופות מסוימות, כגון מודלים של קרינת מעבר, הוחלשו בעבודות אחרות.
 - אף ניסוי לא שחזר באופן עצמאי את האנומליה המקורית.
- זהו אילוץ חד שהונח על גבי חידה קטנה ועקשנית — לא תגלית.

למה זה חשוב

ההסברים שהוצעו הגיעו עד חלקיקים אקזוטיים חדשים. במקום לרדוף אחרי האפשרות המלהיבה ביותר, התחום עשה את הדבר הלא-זוהר: בדק את הרעיון מול גלאי עצמאי וגדול בהרבה — והנתונים אמרו לא. מכשיר המשך גדול ורגיש יותר, PUEO, נבנה כדי לבדוק שוב.

ייתכן שהאנומליה תתברר בסוף כשגרתית. זה לא יהפוך אותה לכישלון. לצמצם מדידה בלתי מוסברת עד שהיא מתפוגגת או מאלצת תגלית אמיתית זו העבודה — וכדאי לעקוב אחריה בדיוק מפני שהתשובה הישירה, בינתיים, היא עדיין "אנחנו לא יודעים".

בקצרה

שני פולסי רדיו מטיסות הבלון האנטארקטיות של ANITA בשנים 2006 ו-2014 נראים כאילו הם מגיעים מזוויות תלולות מתחת לאופק, שקשה למודל הסטנדרטי להסביר. חיפוש ייעודי בשנת 2025 במצפה Auger Pierre מצא רק אירוע מועמד אחד, תואם לרקע, במקום שבו היו צפויים עשרות אם הפולסים הגיעו משטף של מקלחות עולות. הדבר מחליש מאוד את פרשנות "החלקיק החדש" האקזוטית ומצביע יותר לכיוון אפקט החזרה, התפשטות או מכשור הייחודי ל-ANITA — אבל הסיבה עדיין באמת לא ידועה. לא חלקיק חדש מאושר, ולא אות מסתורי מתוך הקרח.

בדיקה בלי רעש

מה המאמר מראה: חיפוש עיוור של Auger Pierre בשנים 2004-2018 אחר מקלחות אוויר העולות כלפי מעלה מצא מועמד אחד, תואם לרקע הצפוי של 0.27 אירועים מקרניים קוסמיות. אם האנומליות של ANITA הגיעו משטף של מקלחות כאלה, Auger היה אמור לראות בערך 34-69 מהן, או לפחות כ-8 בהנחות שמרניות. זה מחליש מאוד את פרשנות המקלחות העולות, כולל תרחישי "חלקיק חדש" שמעבר למודל הסטנדרטי.

מה סביר אך לא מוכח: אפקט החזרה או התפשטות רדיו ליד הקרח והאופק, או ארטיפקט של המכשיר או של הניתוח הייחודי ל-ANITA.

מה זה לא מראה: שהאירועים נגרמים מחלקיק חדש; שהם אותות מתחת לקרח; שמעורב כאן משהו על-טבעי, מלאכותי או נשמע; או שהסיבה כבר ידועה.

מגבלות עיקריות: העניין שמעבר למודל הסטנדרטי נשען על כשני אירועים; זו תוצאת אפס שמגבילה אבל אינה מזהה; ההדרה מכוונת ספציפית לפרשנות "שטף המקלחות"; אין שחזור עצמאי של האנומליה המקורית.

כמה אמון צריך קורא כללי לתת בזה? אמון גבוה בכך שזה לא חלקיק חדש מאושר ולא אות מתוך הקרח, ושהפרשנות של שטף אקזוטי הוחלשה כעת מאוד. אמון נמוך לגבי הסיבה האמיתית, שנותרה פתוחה. העמדה המתאימה: סקרנות כלפי אנומליה לא פתורה שסביר שרובה שגרתית.

מקורות

(2025) 121003, 134 Lett. Rev. Phys.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.121003>

(2016 al. et (Gorham event ANITA-I Original
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.071101>

(2018 al. et (Gorham event ANITA-III Original
<https://arxiv.org/abs/1803.05088>

(2020 al. et (Shoemaker explanation Subsurface-reflection
<https://arxiv.org/abs/1905.02846>

(2021) paper white — instrument successor PUEO
<https://arxiv.org/abs/2010.02892>