



The CLEAN PAPER

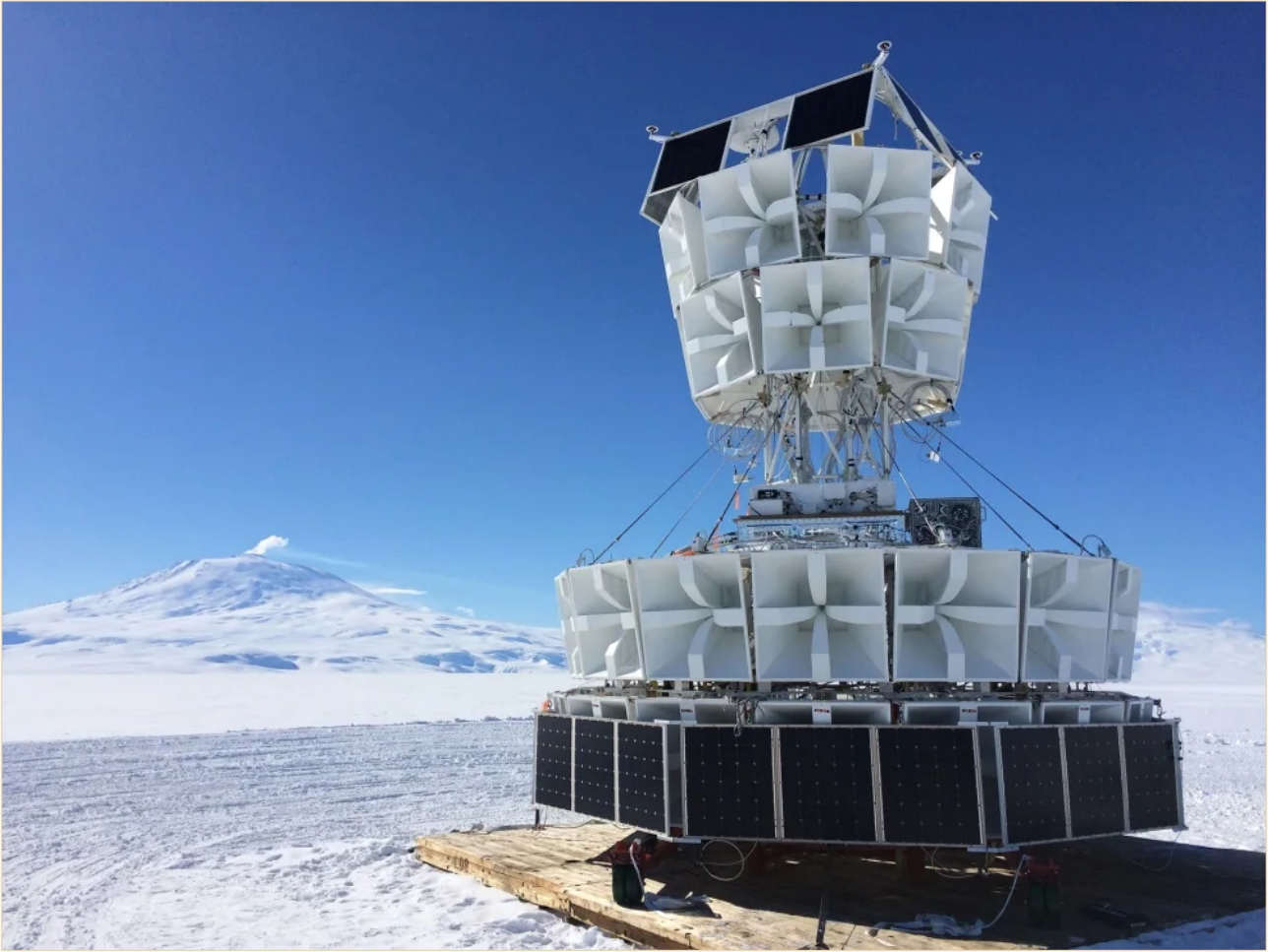
WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

ანტარქტიდის თავზე დაფიქსირებული ორი ანომალიური რადიოიმპულსი კვლავ აუხსნელია — და „ახალი ნაწილაკის“ ახსნა მხარდაჭერას კარგავს

წლების წინ ბუმბუზე დამონტაჟებულმა ანტარქტიდულმა ექსპერიმენტმა ორი უჩვეულო რადიოიმპულსი დააფიქსირა, რომელთა ახსნაზეც შეთანხმება ჯერ არ არსებობს; პიერ ოჟეს სპეციალურმა ძიებამ ვერ იპოვა იმ კასკადების კვალი, რომლებიც ამ მოვლენებს უნდა გამოეწვია, რის გამოც ეგზოტიკური „ახალი ნაწილაკის“ ინტერპრეტაცია გაცილებით ნაკლებად სავარაუდო ხდება, თუმცა ანომალია გადაუჭრელი რჩება.

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-ს 48 ანტენა ანტარქტიდის ყინულისკენ 25 ფუტის სიმაღლის გონდოლიდანაა მიმართული.

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

ბუშტი, ყინული და ქვემოდან მოსული ორი იმპულსი

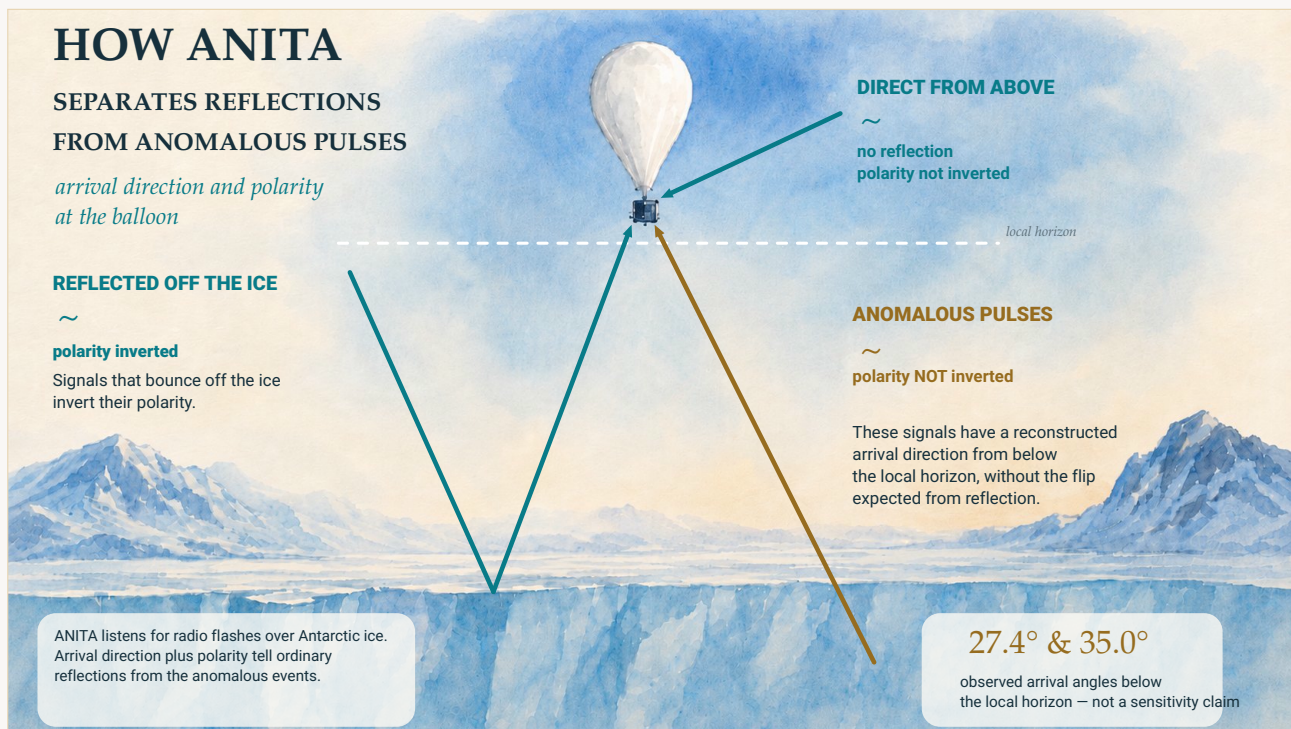
სამუშაო პერიოდის უმეტესი ნაწილის განმავლობაში ანტარქტიკული იმპულსური გარდამავალი ანტენა — ANITA — NASA-ს ბუშტის ქვეშ, დედამიწის ზედაპირიდან დაახლოებით ოცდაათი კილომეტრის სიმაღლეზეა ჩამოკიდებული და კვირების განმავლობაში დედამიწის ყველაზე მიტოვებულ ადგილას გადაადგილდება — უსმენს.

ანტენა კოსმოსიდან მოსულ რადიოსიგნალებს უსმენს. როდესაც ძალიან მაღალი ენერგიის ნაწილაკი — კოსმოსური სხივი ან ნეიტრინო — ჰაერს ან ყინულს ეჯახება, ის უფრო მცირე ნაწილაკების კასკადად იშლება, ეს კასკადი კი რადიოს მოკლე ნათებას წარმოქმნის. ანტარქტიდა მათი დასაფიქსირებლად თითქმის იდეალურია: კილომეტრების სისქის სუფთა, ცივი ყინული, რომელშიც რადიოტალღა თითქმის ისე გადის, როგორც მინაში, და ასობით კილომეტრის მანძილზე არაფერია, რაც სიგნალს

ხელს შეუშლის. ANITA-ს ევალეზა, დაიჭიროს ეს ნათებები და მათი ფორმისა და დროითი მახასიათებლების მიხედვით დაადგინოს, რამ წარმოქმნა ისინი.

მის მიერ მოსმენილი სიგნალების უმეტესობა წესრიგშია. ზოგი ნათება პირდაპირ ზემოდან მოდის. კიდევ ბევრი ყინულს ირიბად ეჯახება და უკან, ანტენისკენ აირეკლება — ასეთ სიგნალებს კი ერთი აშკარა ნიშანი აქვთ: არეკვლა ტალღას თავდაყირა აბრუნებს (სიგნალის პოლარობის შებრუნება), რასაც ფიზიკოსები ერთი შეხედვითვე ამოიცნობენ. სწორედ ასე განასხვავებენ ისინი არეკლილ სიგნალს ნამდვილიდან.

ორჯერ ისეთი რამ მოხდა, რამაც ეს კანონზომიერება დაარღვია.



ბუშტთან ზემოდან პირდაპირ მოსული იმპულსი შეუბრუნებლად მოდის, ხოლო არეკლილი იმპულსი პოლარობის შებრუნებით — ყინულზე არეკვლის ჩვეულებრივი ნიშნით. ამის საპირისპიროდ, ორი ანომალიური იმპულსი მოდის ადგილობრივ ჰორიზონტს მკვეთრად ქვემოთ მდებარე რეკონსტრუირებული მიმართულებიდან — თუმცა ასეთი შებრუნების გარეშე, მაშინ, როცა არეკვლას მათი შებრუნება უნდა გამოეწვია. „ქვემოდან“ აღწერს მოსვლის მიმართულებას — და არა დედამიწიდან ამომავალ ნაწილაკს.

Original hybrid diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

ერთ ფრენაზე, 2006 წელს, ხოლო მეორეზე, 2014 წელს, ANITA-მ ჰორიზონტს მკვეთრად ქვემოდან — შესაბამისად, 27.4°-ით და 35.0°-ით ქვემოთ — მომავალი იმპულსი დააფიქსირა, თითქოს ის კონტინენტიდან ამოვიდა, თანაც შებრუნების გარეშე. მაშასადამე, ეს არ იყო არეკვლა. რაღაცამ მართლაც ზემოთ, ყინულიდან ბუშტისკენ იმოძრავა.

აი, რატომ არის ეს თითქმის სკანდალური. იმისთვის, რომ იმპულსი ანტენამდე ასეთი მკვეთრად აღმავალი კუთხით მოსულიყო, მის წარმომქმნელს პლანეტის შიგნით უნდა გაეგლო — მყარი ქანის ექვსი ან შვიდი ათასი კილომეტრი. ამის გაკეთება

თითქმის არაფერს შეუძლია. ერთადერთი ცნობილი ნაწილაკი, რომელიც ჩვეულებრივ მატერიაში ისე გადის, თითქმის არც არსებობდეს, ნეიტრინოა: ის მთელ დედამიწას შეუმჩნევლად გაივლის. ამიტომ ბუნებრივი იდეა ასეთია: ნეიტრინო ქანებში ზემოთ გადაადგილდა, ყინულის უშუალოდ ქვეშ ატომს შეეჯახა და ზემოთ მიმავალი ნაწილაკების კასკადი წარმოქმნა, რომლის რადიონათებასაც ANITA-მ მოჰკრა ყური. პრობლემა კი ერთ მნიშვნელოვან დეტალშია: ნეიტრინო, რომლის ენერგიაც *ამ* სივრცის წარმოსაქმნელად საკმარისია, სინამდვილეში ზედმეტად ადვილად ჩერდება. ამდენ ქანში გავლისას ის მრავალჯერ უნდა შთანთქმულიყო. ნეიტრინოების ისეთი ძლიერი ნაკადი კი, რომლიდანაც ორი მაინც აღწევდა ჩვენამდე, აუცილებლად უნდა გამოჩენილიყო უზარმაზარ დეტექტორებში, რომლებიც სწორედ მათი დასაფიქსირებლად არის აშენებული. ვერც ერთმა მოწესრიგებულმა ახსნამ ვერ უზრუნველყო სრული სურათი.

ასე დარჩა ეს ორი იმპულსი — ისინი წესების დაცვაზე უარს ამბობდნენ. ეს აღმოჩენა არ იყო — ორი მოვლენის აღმოჩენა არასდროს ნიშნავს — მაგრამ არც არაფერი იყო. ეს ნამდვილი ანომალია გახლდათ: სწორედ ისეთი, რომელიც საინტერესოა იმიტომ, რომ ჯერ არავის შეეძლო ეთქვა, ფიზიკის სტანდარტულ მოდელში ნაპრაღს ვხედავდით თუ უბრალოდ ყინულის, ანტენის ან გამომთვლების თავისებურებას.

სწორედ აქ მიმართავს ზოგიერთი ტიპის გაშუქება სიტყვას „*იდუმალი*“, აქრობს განათებას და კითხულობს, რა შეიძლება ცხოვრობდეს ანტარქტიდის ქვეშ. ნუ აპყვებით ამას. ნამდვილი კითხვა არასდროს ყოფილა *რა ურჩხული იმალება ყინულში*. ეს იყო მოთმინებასა და მომხიბვლელობას მოკლებული, მაგრამ მეცნიერების წინსვლისთვის რეალურად მნიშვნელოვანი კითხვა: **როგორ გაიგებდით ამას?**

რა გააკეთეს ავტორებმა

ამაღელვებელი ახსნების შესამოწმებლად სუფთა გზა არსებობს. თუ ANITA-ს იმპულსები აღმავალი კასკადების ნამდვილ, განმეორებად ნაკადს — ჩვეულებრივ ტაუ-ნეიტრინოებს ან რაიმე შემოთავაზებულ ახალ ნაწილაკს — უკავშირდება, მაშინ საკმარისად დიდმა დეტექტორმა, რომელიც ზუსტად ასეთ მოვლენებს აკვირდება, მათი გარკვეული ნაწილი უნდა დააფიქსიროს.

არგენტინაში მდებარე პიერ ოჟეს ობსერვატორია — ოდესმე აშენებული უდიდესი კოსმოსური სხივების დეტექტორი — ამის შესამოწმებლად კარგად არის განლაგებული. მისი ფლუორესცენციული დეტექტორის გამოყენებით კოლაბორაციამ 2004-დან 2018 წლამდე შეგროვებულ მონაცემებში აღმავალი ატმოსფერული კასკადები (ქვემოდან მოსული მოვლენები, ზენიტური კუთხეებით 110° -ზე მეტი და ენერგიებით 0.1 EeV -ზე მეტი) მოძებნა. რაც მთავარია, შერჩევის სრული კრიტერიუმები საბოლოო მონაცემთა ნაკრების სრულად შესწავლამდე იყო დაფიქსირებული — ეს იყო „ბრმა“ ანალიზი, ამიტომ პასუხი სასურველი შედეგისკენ ვერ „მოირგებოდა“.

რა აღმოაჩინეს

კოდის გახსნის შემდეგ **ერთი** კანდიდატი მოვლენა გადარჩა — სრულად თავსებადი 0.27 ± 0.12 მოვლენასთან, რომელსაც ჩვეულებრივი კოსმოსური სხივების აღმავალ მოვლენებად შემთხვევითი არასწორი რეკონსტრუქცია უნდა წარმოქმნიდეს. სხვა სიტყვებით, ნამდვილი აღმავალი სიგნალი არ აღმოჩნდა; მხოლოდ ფონური მოვლენების ის მცირე ნაკადი, რომელსაც მოელოდით.

შედეგის ძალა შედარებაშია. თუ ANITA-ს იმპულსები აღმავალი კასკადების სტაბილური ნაკადიდან მოდიოდა, Auger-ს **ბევრი** ასეთი მოვლენა უნდა დაეფიქსირებინა — ერთი შესაძლო ენერგეტიკული სპექტრისთვის დაახლოებით 34-დან 69-მდე, ხოლო განზრახ კონსერვატიული დაშვებების შემთხვევაშიც კი სულ მცირე დაახლოებით 8. მან ერთი აღმოაჩინა, რომელიც ფონს შეესაბამებოდა. ავტორები ამას აღმავალი კასკადების ინტერპრეტაციასთან „ძლიერ შეუთავსებლობად“ აღწერენ.

რას ნიშნავს ეს, სავარაუდოდ

ამ მასშტაბის არდაფიქსირება ინფორმაციულია. თუ ANITA-ს მოვლენები ამ მიმართულებებიდან მომავალი ნაწილაკების ნამდვილ პოპულაციას — ჩვეულებრივ ტაუ-ნეიტრინოებს ან მათ ასახსნელად შემოთავაზებულ ჰიპოთეტურ ახალ ნაწილაკებს — უკავშირდებოდა, Auger-ის ხანგრძლივი დაკვირვების შედეგად მნიშვნელოვანი რაოდენობა უნდა დაფიქსირებულიყო. ასე არ მოხდა. ეს ფაქტობრივად გამოორიცხავს „აღმავალი კასკადების დიფუზური ნაკადის“ ახსნას — იმ კატეგორიას, რომელშიც სტანდარტული მოდელის მიღმა არსებული იდეების უმეტესობა ხვდება — გარდა ხელოვნურად მორგებული განსაკუთრებული პირობებისა.

რაც რჩება, არის ისეთი ახსნები, რომლებიც არ გულისხმობს კასკადების წარმოქმნელი ნაწილაკების ნაკადს: ყველაზე ხშირად განიხილება ყინულსა და ჰორიზონტთან სიახლოვის გეომეტრიისთვის დამახასიათებელი არეკვლის ან გავრცელების ეფექტი, ან ინსტრუმენტული თუ ანალიზის არტეფაქტი. არც ერთი მათგანი დადასტურებული არ არის. ამიტომ პატიოსანი შეჯამება ასეთია: ყველაზე ამაღელვებელმა ინტერპრეტაციამ სერიოზული დარტყმა მიიღო, მიზეზი კი კვლავ უცნობია.

რას არ ამტკიცებს ეს

- ის **არ** ადგენს, რა არის ეს ორი იმპულსი. „ახალ ფიზიკას ძლიერ არ ემხრობა“ არ ნიშნავს „ამოცანა ამოხსნილია“.
- ის **არ** ადასტურებს ჩვეულებრივ მიზეზს. ერთ-ერთი წამყვანი კანდიდატი — ანტარქტიდის ზედაპირის ქვეშ არსებული შრებიდან არეკვლა — კვლავ ჰიპოთეზაა და არა შედეგი.
- ის **არ** აფიქსირებს რაიმეს „ყინულის ქვეშიდან“ პირდაპირი მნიშვნელობით. ANITA-

ს ანტენები ანტარქტიდის ზემოთ, ბუშტიდან არის ჩამოვიდებული; „ქვემოდან“ აღწერს რადიოიმპულსის რეკონსტრუირებულ მოსვლის მიმართულებას — და არა ხმას, ხმოვან შეტყობინებას ან ყინულის შიგნიდან გამომავალ რამეს.

- ის არ ამყარებს დადასტურებული ახალი ნაწილაკის არსებობის მტკიცებებს. ამ ამბის ყველაზე ფართოდ გავრცელებული ვერსია მტკიცებულების მიმართულების საპირისპიროს ამტკიცებს.

რამდენად ძლიერია მტკიცებულება?

ზომიერი — და ასე უნდა იყოს კიდევ წარმოდგენილი.

- სტანდარტული მოდელის მიღმა არსებული ფიზიკის მიმართ ინტერესი არსებითად ორ მოვლენას ეყრდნობა, რომლებიც ANITA-ს ორ ფრენაზე დაფიქსირდა.
- ეს ნაშრომი **ნულოვანი შედეგია**: შესაძლებლობების გამორიცხვისთვის ძლიერია, მაგრამ ვერ ამბობს, რა არის ეს მოვლენები.
- გამორიცხვა რაოდენობრივად დასაბუთებული და ძლიერია (მოსალოდნელი იყო ათეულობით მოვლენა, დაფიქსირდა ფონის მსგავსი ერთი მოვლენა), თუმცა ის მიზანში იღებს „აღმავალი კასკადების ნაკადის“ ინტერპრეტაციას და არა ყველა შესაძლო მიზეზს.
- ერთი წამყვანი, ჩვეულებრივი ახსნა (ზედაპირთან ახლოს არეკვლა) დამაჯერებელია, მაგრამ დაუმტკიცებელი; ზოგიერთ სხვა ალტერნატივას (გარდამავალი გამოსხივების გარკვეულ მოდულებს) სხვა ნაშრომებმა ნაკლები მხარდაჭერა დაუტოვა.
- არც ერთ ექსპერიმენტს დამოუკიდებლად არ გაუმეორებია თავდაპირველი ანომალია.

ეს არის მკაფიო შეზღუდვა პატარა, ჯიუტი თავსატეხისთვის — და არა აღმოჩენა.

რატომ არის ეს მნიშვნელოვანი

შემოთავაზებული ახსნები ეგზოტიკურ ახალ ნაწილაკებამდე მიდიოდა. ყველაზე ამაღელვებელი იდეის დევნის ნაცვლად, სფერომ არამომხიბვლელი რამ გააკეთა: ეს იდეა დამოუკიდებელ, ბევრად უფრო დიდ დეტექტორზე გამოცადა — და მონაცემებმა უარი თქვეს. უფრო დიდი და მგრძნობიარე მემკვიდრე ინსტრუმენტი, PUEO, შენდება, რათა ეს საკითხი ხელახლა შემოწმდეს.

შესაძლოა, ანომალია საბოლოოდ ჩვეულებრივი მოვლენა აღმოჩნდეს. ეს მას მარცხად არ აქცევს. აუხსნელი გაზომვის შესაძლო ახსნების შევიწროება მანამდე, სანამ ის ან გაქრება, ან ნამდვილ აღმოჩენამდე მიგვიყვანს, სწორედ ეს არის კვლევა — და მისთვის თვალის მიდევნება სწორედ იმიტომ ღირს, რომ ამჟამად პატიოსანი პასუხი კვლავ ასეთია: „არ ვიცით.“

სუფთა შეჯამება

ANITA-ს 2006 და 2014 წლების ანტარქტიდულ საბუშტე ფრენებზე დაფიქსირებული ორი რადიოიმპულსი, როგორც ჩანს, ჰორიზონტს მკვეთრად ქვემოთ მდებარე კუთხეებიდან მოდის, რომელთა ახსნაც სტანდარტულ მოდელს უჭირს. პიერ ოჟეს ობსერვატორიის 2025 წლის სპეციალურმა ძიებამ მხოლოდ ერთი კანდიდატი მოვლენა აღმოაჩინა, რომელიც ფონს შეესაბამებოდა, მაშინ, როცა ათეულობით მოვლენა იყო მოსალოდნელი, იმპულსები აღმავალი კასკადების ნაკადიდან რომ მოსულიყო. ეს ძლიერ ასუსტებს ეგზოტიკურ „ახალი ნაწილაკის“ ინტერპრეტაციას და მიუთითებს ANITA-სთვის დამახასიათებელ არეკვლის, გავრცელების ან ინსტრუმენტულ ეფექტზე — თუმცა მიზეზი ჯერ კიდევ ნამდვილად უცნობია. ეს არ არის დადასტურებული ახალი ნაწილაკი და არც ყინულის შიგნიდან მომავალი იდუმალი სიგნალი.

შელამაზების გარეშე შემოწმება

რას აჩვენებს ნაშრომი: პიერ ოჟეს ბრმა ძიებამ (2004–2018) აღმავალი ატმოსფერული კასკადებისთვის ერთი კანდიდატი აღმოაჩინა, რომელიც კოსმოსური სხივების მოსალოდნელ 0.27-მოვლენიან ფონს შეესაბამებოდა. ANITA-ს ანომალიები ასეთი კასკადების ნაკადიდან რომ მოდიოდეს, Auger-ს დაახლოებით 34–69 მოვლენა უნდა დაეფიქსირებინა (ან სულ მცირე ~8 კონსერვატიული დაშვებების შემთხვევაში). ეს ძლიერ ასუსტებს აღმავალი კასკადების ინტერპრეტაციას, მათ შორის სტანდარტული მოდელის მიღმა არსებულ „ახალი ნაწილაკის“ სცენარებს.

რა არის დამაჯერებელი, მაგრამ დაუმტკიცებელი: ყინულთან და ჰორიზონტთან ახლოს არეკვლის ან რადიოგავრცელების ეფექტი, ან ANITA-სთვის დამახასიათებელი ინსტრუმენტული/ანალიზის არტეფაქტი.

რას არ აჩვენებს ეს: რომ მოვლენები ახალი ნაწილაკით არის გამოწვეული; რომ ისინი ყინულის ქვეშიდან მომავალი სიგნალებია; რომ მათში რაიმე პარანორმალური, ხელოვნური ან გასაგონი მონაწილეობს; ან რომ მიზეზი ახლა უკვე ცნობილია.

მთავარი შეზღუდვები: სტანდარტული მოდელის მიღმა არსებული ფიზიკის მიმართ ინტერესი დაახლოებით ~ორ მოვლენას ეყრდნობა; ეს არის ნულოვანი შედეგი, რომელიც ზღუდავს შესაძლებლობებს, მაგრამ მიზეზს ვერ ადგენს; გამორიცხვა კონკრეტულად „კასკადების ნაკადის“ ინტერპრეტაციას ეხება; თავდაპირველი ანომალია დამოუკიდებლად არ გამეორებულა.

რამდენად დარწმუნებული უნდა იყოს ზოგადი მკითხველი? მაღალი ნდობა შეიძლება ჰქონდეს იმას, რომ ეს არ არის დადასტურებული ახალი ნაწილაკი და არ არის ყინულის შიგნიდან მომავალი სიგნალი, და რომ ეგზოტიკური ნაკადის ინტერპრეტაცია ახლა ძლიერ ნაკლებად სავარაუდოა. დაბალი ნდობა უნდა ჰქონდეს ნამდვილ მიზეზთან დაკავშირებით, რომელიც კვლავ ღია საკითხად რჩება. შესაბამისი პოზიციაა: გადაუჭრელი ანომალიის მიმართ ცნობისმოყვარეობა, რომელიც, სავარაუდოდ, ჩვეულებრივი მიზეზით აიხსნება.

წყაროები

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>