

Astronomia cząstek naładowanych, czyli sukces na początek

Obserwacja astronomiczna jest możliwa, o ile nośnik informacji porusza się po torze prostoliniowym. Nie można uzyskać ostrego zdjęcia, jeżeli trajektorie nośników są przypadkowe. Cząstki naładowane, tworzące promieniowanie kosmiczne bombardujące Ziemię, nie noszą informacji o swoich źródłach, ponieważ po drodze przechodzą przez galaktyczne i międzygalaktyczne pola magnetyczne, które zmieniają trajektorie w sposób przypadkowy. Dlatego prawie zawsze zdjęcia astronomiczne są wykonane za pomocą fotonów. Co prawda, potrafimy rejestrować fotony w bardzo szerokim zakresie energii, od fal radiowych po kwanty gamma, ale jednocześnie jesteśmy praktycznie na nie skazani. Do niedawna jedyną alternatywą były neutrino. Jednak liczba obiektów, którym zrobiono zdjęcia w neutrinach, ogranicza się do Słońca i supernowej 1987A.

Trajektorie cząstki naładowanej ulega tym mniejszemu zakrzywieniu w polu magnetycznym, im większa jest jej energia. Jeżeli jest ona bardzo duża, to kierunek zmienia się niewiele i wtedy można by było pomyśleć o astronomii cząstek naładowanych. O jak dużych energiach mówimy? Niestety, o bardzo, bardzo dużych. Jeżeli przyjmujemy, że dopuszczalne odchylenie nie powinno przekraczać trzech stopni, to energie muszą być większe od 40 EeV (egzaelektronowoltów, 10^{18} eV), czyli pięć i pół miliona razy większe niż będą osiągalne w akceleratorze LHC.

Jak dużo tak energetycznych protonów dociera do Ziemi? Niewiele, tylko mniej więcej jeden na kilometr kwadratowy na stulecie. Nie wygląda to zachęcająco, a to jeszcze nie koniec problemów. Astronomowie borykają się nie tylko z ostrością zdjęć, ale również z osłabieniem sygnału na skutek oddziaływania z nie całkiem pustą przestrzenią kosmiczną. Dla tak energetycznych protonów przeszkodą staje się wypełniająca cały Wszechświat mikrofalowe promieniowanie tła. Konkretnie, jeżeli energia protonu przekracza 60 EeV, to w wyniku zderzenia z fotonem tła możliwe jest wyprodukowanie pionu. Prawdopodobieństwo takiego zdarzenia jest bardzo małe, a więc droga swobodna bardzo duża, ale i tak prowadzi to do tzw. limitu GZK (Greisena–Zatsepina–Kuzmina): cząstka o takiej energii nie może pochodzić z odległości większej niż około 50 Mpc, co w skali kosmologicznej jest niewielką odległością. Protony o wyższych energiach były jednak obserwowane, co powinno świadczyć o ich pochodzeniu z lokalnej gromady galaktyk.

W jaki sposób rejestruje się promieniowanie kosmiczne o tak kosmicznych energiach? Protony oddziałują z atmosferą, tworząc tzw. pęki atmosferyczne. Na poziomie Ziemi obserwowalna część pędu składa się głównie z mionów, gdyż inne składniki takiej, liczącej miliardy cząstek, kaskady albo się rozpadają, albo oddziałują (albo są neutrinami, które bardzo trudno zarejestrować). Promień przecięcia stożka pędu z powierzchnią Ziemi wynosi kilka kilometrów. Pamiętając o bardzo małym strumieniu promieniowania o najwyższej energii, łatwo sobie uzmysłwić, że potencjalny detektor powinien wyglądać tak, jak Obserwatorium Pierre Auger przedstawione na przedniej okładce. Kropki na

zamieszczonej mapce odpowiadają pojedynczym detektorom, z których jeden widoczny jest na zdjęciu. Tworzą one trójkątną siatkę o stałej równej 1,5 km. Zinstrumentowany obszar jest pokolorowany. Pojedynczy detektor zawiera zbiornik o pojemności dwunastu tysięcy litrów. Miony, przechodząc przez wodę, poruszają się z prędkością większą niż prędkość światła w tym ośrodku i wysyłają promieniowanie (fotony) Czerenkowa, które są rejestrowane przez fotopowielacze. W ten sposób każdy detektor potrafi określić liczbę mionów, które go prześwietliły, oraz wyznaczyć dokładny moment przejścia. Połączenie informacji z kilku detektorów, które zostały prześwietlone prawie jednocześnie, pozwala na wyznaczenie pierwotnej energii na podstawie liczby zarejestrowanych mionów oraz kierunku na podstawie różnic czasów przelotu.

Jak widać, pomiar nie jest bezpośredni. Jest on na tyle dobry, na ile dobra jest procedura kalibracji. Z problemem tym miały kłopoty wszystkie wcześniejsze eksperymenty. Dlatego obserwatorium Auger jest wyposażone w niezależną możliwość pomiaru parametrów kaskady, która jest bardziej precyzyjna, ale mniej efektywna. Na mapie przedstawionej na okładce widać cztery punkty, z których wychodzi po siedem zielonych dwudziestokilometrowych odcinków. W punktach tych znajduje się po siedem teleskopów, które są w stanie rejestrować fluorescencję atmosferycznego azotu, której intensywność jest proporcjonalna do liczby cząstek naładowanych uczestniczących w danym momencie w kaskadzie. Teleskopy działają tylko w bezksiężycowe noce. Dla każdej kaskady rejestrują jakby ultrafioletowy meteor poruszający się z prędkością bliską prędkości światła. Rejestracja tej samej kaskady przez teleskopy umieszczone w różnych punktach pozwala na bardzo dokładny pomiar kierunku cząstki pierwotnej. Dzięki temu możliwe jest wykalibrowanie procedury oceny zarówno energii, jak i kierunku przez siatkę detektorów Czerenkowa.

Opublikowane pod koniec zeszłego roku wyniki [1] są przedstawione na mapie nieba na przedniej okładce. Cieniowaniem ukazano zsumowaną ekspozycję, gwiazdki oznaczają położenie galaktyk z aktywnym jądrem (AGN), a małe okręgi (elipsy) oznaczają obszary, z których nadleciało 27 najbardziej energetycznych ($E > 57$ EeV) cząstek. Analiza statystyczna ujawniła, że szansa, aby obserwowany rozkład nie był związany z rozkładem AGN, wynosi zaledwie dwa promile.

Tym samym rozwiązany wydaje się problem pochodzenia najbardziej energetycznych posłańców. Akceleratorami są najprawdopodobniej czarne dziury, które intensywnie podgrzewają centra niedalekich galaktyk po przejściach (np. innej galaktyki w pobliżu). Pracę [1] można uznać za narodziny astronomii cząstek naładowanych.

Piotr ZALEWSKI

[1] The Pierre Auger Collaboration, *Correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic objects*, astro-ph/0711.2256, *Science* **318**(2007)938-943