

Fizyka astrocząstek to dziedzina poświęcona zrozumieniu, jak i dlaczego Wszechświat jest taki, jaki jest. Wykorzystując teorie i modele rozumiane i testowane w laboratoriach fizyki cząstek, obserwuje ona Wszechświat i źródła astrofizyczne za pomocą cząstek, zwanych również "posłańcami". Najliczniejszymi i najłatwiejszymi do wykrycia posłańcami są promienie gamma gdyż prawie każde źródło wytwarza je jako emisję energii. Jednak ze względu na ich oddziaływanie z materią pojawia się silny horyzont ograniczający energię obserwacji. Najbardziej nieuchwytnymi są astrofizyczne neutrina: pojawiają się zawsze, gdy zachodzi oddziaływanie słabe (tj. przemiana jądrowa cząstek); ponieważ są prawie nie do zatrzymania z powodu rzadkich oddziaływań, pochodzą bezpośrednio ze źródła. Najbardziej kluczowym posłańcem, silnie skorelowanym z pozostałymi dwoma, są promienie kosmiczne: jądra wyrzuconej materii; przechowują one informacje o składzie źródła, oddziaływaniach, jak i przyszłości i strukturze Wszechświata oraz budowie pierwiastków chemicznych (tj. powstawaniu wszystkich obiektów astrofizycznych, w tym nas).

Promienie kosmiczne (CR) oddziałują za pośrednictwem trzech sił: elektromagnetycznej, słabej i silnej. Ta ostatnia jest odpowiedzialna za ich niszczenie po wejściu w naszą atmosferę. Ich przejście powoduje powstanie "pęku atmosferycznego". Gdy tylko CR (cząstka pierwotna) wejdzie w interakcję z cząsteczką powietrza, generowane są inne cząstki ("mezony", głównie piony i kaony), które również oddziałują w atmosferze, tworząc kaskadę cząstek. Mezony również rozpadają się, wytwarzając kaskadę kwantów gamma, elektronów, mionów (μ) i neutrin. Proces ten nie jest jednak wieczny, ponieważ cząstki-córki dzielą energię swojej matki na każdym etapie. Dlatego też, gdy cząstki wtórne nie mają już wystarczającej energii, zostają pochłonięte przez powietrze i znikają. Cząstki, które przetrwały, docierając do ziemi, pokrywają rozległy obszar, nawet kilometry kwadratowe!

Podczas gdy gęstość elektronów i cząstek gamma docierających do ziemi dostarcza informacji o energii cząstki pierwotnej, miony przekazują informację o masie atomowej (tj. jaki rodzaj jądra do nas dotarł). Obie informacje są kluczowe dla zrozumienia przybywających CR i ich rozprzestrzeniania się we Wszechświecie. Widmo energetyczne jest dobrze mierzone. Skład masowy jest dokładnie znany tylko dla CR o energiach poniżej 10^{15} eV (HECR), gdzie możliwe jest bezpośrednie wykrycie jądra pierwotnego za pomocą satelitów. Jednak przy wyższych energiach (UHECR), obecnie do 10^{21} eV, jądra te są zbyt rzadkie i zbyt energetyczne dla satelitów, więc musimy polegać na pomiarach pośrednich, takich jak gęstość mionów na ziemi. Rozwój wielkiego pęku atmosferycznego jest tak skomplikowany, iż aby zinterpretować pomiary pod względem składu promieniowania musimy bazować na rozbudowanych symulacjach oddziaływań hadronowych cząstka-powietrze. Obecne modele przewidują jednak znacznie mniejszą liczbę mionów niż ta, którą obserwujemy w detektorach, co rzutuje na interpretację wyników. Ten nadmiar mionów nazywany jest *zagadką mionową*. Zagadką dlatego, ponieważ wczesne etapy rozwoju pęku atmosferycznego okazują się prawidłowe, a tylko na ziemi obserwujemy nieprzewidywany nadmiar mionów.

Projekt μ PPET [μ on Probe with J-PET; wymawiane jako /muppet/] planuje rozwiązać tę zagadkę. Jest to pierwszy eksperyment poświęcony wyłącznie jej badaniu. Do tej pory wszystkie eksperymenty dedykowane promieniowaniu kosmicznemu próbowały ją rozwiązać. Wciąż jednak istnieje zbyt wiele nieznanymi zmiennymi (skład masowy cząstek), a geometria detektorów jest zoptymalizowana pod kątem różnych przypadków naukowych. W szczególności zbadanie tej zagadki w ramach przewidywanej aktualizacji modeli oddziaływań hadronowych wymaga szczegółowych informacji na temat mionów na ziemi, takich jak rozkłady torów i ładunków (obserwable), na które wpływają polaryzacje i których nie można mierzyć w innych eksperymentach. Polaryzacja cząstki pocisku (tj. mionu) i/lub cząstki tarczy (cząsteczki powietrza) wprowadza niewielką poprawkę do prawdopodobieństwa oddziaływania mionów, tj. ich produkcji i trajektorii. Na wczesnych etapach pęku atmosferycznego jest ona pomijalna, niezauważalna eksperymentalnie. Jednak kumulując tę poprawkę interakcja po interakcji, oczekuje się, że liczba mionów będzie większa i szersza na ziemi. μ PPET będzie prowadził równoległe dwa badania: jedno polega na modyfikacji modeli oddziaływań hadronowych, a drugie zapewnia niezbędne pomiary w celu ich dostrojenia i weryfikacji ich przewidywań.

Efekty polaryzacji CR/powietrze nie są zwykle mierzone w eksperymentach promieniowania kosmicznego i zakłada się, że ich nie ma. Jest to powód do przeprowadzenia równoległych pomiarów: pierwsza kampania pomiarowa w celu wstępnego oszacowania rozbieżności między przewidywanymi i zmierzonymi obserwablami mionów dla dostrojenia parametrów nowych modeli; druga kampania pomiarowa w celu zwiększenia statystyki i poprawy optymalizacji modeli; oraz ostatnia kampania pomiarowa w celu weryfikacji przewidywań. Konfiguracja eksperymentalna wykorzystuje dwa dostępne układy detekcyjne J-PET: prototyp i detektor finalny. Prototyp jest używany jako sonda o stałej pozycji i może mierzyć obserwable mionowe z wysoką precyzją. Detektor finalny będzie złożony z oddzielnych modułów scyntylatorów: rozłożymy je w dedykowanych konfiguracjach (rzędu 10-50 metrów od siebie), aby zrekonstruować rdzeń pęku atmosferycznego w różnych odległościach od sondy. Dzięki mobilności rekonstruktora rdzenia planujemy zmierzyć obserwable mionowe i testować nowe modele w różnych odległościach sonda-rdzeń pęku atmosferycznego, tj. w funkcji boczego rozkładu gęstości cząstek. Niezależnie od tego, czy projekt ten zakończy się sukcesem, czy nie, będzie on rezonował z innymi eksperymentami. W pierwszym przypadku, gdy zagadka zostanie rozwiązana, eksperymenty będą próbowały przetestować nowe modele i pracować w synergii z μ PPET. Co więcej, może to zmienić projekty przyszłych detektorów promieniowania kosmicznego. W najgorszym przypadku po raz pierwszy będziemy dysponować szczegółowymi pomiarami mionów w odniesieniu do kwestii *zagadki mionowej* oraz dokładniejszym i bardziej poprawnym modelem oddziaływań hadronowych.