

Obecnie jedną z największych zagadek współczesnej nauki jest znacząca nierównowaga pomiędzy występującą w znanym Wszechświecie materią, a prawie w ogóle nie obserwowaną antymaterią. Zgodnie z przewidywaniami fizyków teoretyków, którzy stworzyli teorię Wielkiego Wybuchu, ilość materii i antymaterii występująca w początkowej fazie istnienia Wszechświata była taka sama. Jednak z nie do końca poznanych przyczyn proces ekspansji przetrwała tylko materia, którą obecnie obserwujemy jako nasz Wszechświat. Jedną z przyczyn opisanej nierównowagi, może być różnica we własnościach materii i antymaterii, która może manifestować się w niezachowaniu tzw. symetrii fundamentalnych.

Badania, które są przedmiotem projektu mają czysto epistemologiczny charakter i dotyczą eksperymentalnych metod badania fundamentalnych symetrii i oddziaływań w przyrodzie m.in. symetrii CP. Problematyka podjęta w ramach tego projektu bezpośrednio przyczynia się do rozwoju dziedziny badań nad cząstkami elementarnymi, w zakresie testowania przewidywań Modelu Standardowego. Proponowane prace realizowane będą w ramach międzynarodowej współpracy HADES, która prowadzi eksperymenty w Centrum Badawczym Ciężkich Jonów GSI, w Niemczech. Głównym celem współpracy są badania materii brionowej w średnich temperaturach produkowanej w zderzeniach pion-nukleon, nukleon-nukleon i zderzeniach ciężkich jonów np. złoto-złoto (Ag-Ag). Jednym z podstawowych badanych procesów jest produkcja rezonansów barionowych i ich rozpadów elektromagnetycznych. Dzięki tym procesom możliwe jest poznanie struktury próżni i własności gorącej i gęstej materii barionowej. Procesy te badane są za pomocą dileptonów (par  $e^+e^-$ ) lub naładowanych cząstek  $K$  (kaonów). W kontekście zdefiniowanych problemów badawczych współpraca HADES przeprowadziła, w lutym 2022 serię pomiarów zderzeń proton-proton przy energii kinetycznej 4.5 GeV, zbierając znaczącą próbkę danych, pozwalającą na zaobserwowanie obszaru masy niezmienniczej par  $e^+e^-$  powyżej  $1 \text{ GeV}/c^2$ . Ten obszar masy jest bardzo ciekawy, ponieważ pozwala na badanie efektu mieszania mezonów  $\rho - a_1$ . Cząstki te są bardzo ważne z punktu widzenia poznania mechanizmów generacji masy cząstek w próżni, poprzez spontaniczne łamanie symetrii chiralnej. Zgodnie z przewidywaniami tej teorii, cząstki  $\rho$  i  $a_1$  są tzw. partnerami chiralnymi SU(2), które w obecności gęstej i gorącej materii powinny być identyczne. Efekt ten nazywany jest "chiralną odbudową masy" i badany będzie przez grupę HADES, jak również w eksperymencie CBM, planowanym do uruchomienia w ośrodku FAIR. Aby zrozumieć mechanizm generacji masy cząstek badając zderzenia ciężkich jonów, niezbędne jest wcześniejsze zrozumienie tego efektu w zderzeniach proton-proton, czyli w najprostszym możliwym systemie. Dlatego proponowane badania z wykorzystaniem zebranej próbki danych w zderzeniach proton-proton przy energii 4.5 GeV, będą miały istotny wkład w przyszłe badania planowane w ośrodku FAIR. Ilość zebranych danych dla reakcji proton-proton pozwala również na badanie produkcji lekkich mezonów, m.in.  $\eta$ ,  $\eta'$ ,  $\omega$  i  $f_1(1285)$  i ich rzadkich rozpadów  $\text{BR} \sim 10^{-4}$ . W szczególności, możliwe jest badanie tzw. rozpadów Dalitza ( $\eta^{(\prime)} \rightarrow e^+e^-\gamma$ ,  $\omega \rightarrow e^+e^-\pi^0$ ), które umożliwiają poznanie struktury elektromagnetycznej mezonów oraz testowanie przewidywań tzw. modelu dominacji wektorowej (VDM), opisującego oddziaływanie hadron-hadron. Ponadto, bardzo istotnym aspektem tych badań jest poszukiwanie efektów niedających się opisać Modelem Standardowym. W szczególności, w ramach projektu, będziemy poszukiwać łamania symetrii CP w rozpadzie  $\eta^{(\prime)} \rightarrow e^+e^-\pi^+\pi^-$ . Rozpad ten, był już badany przez kilka grup eksperymentalnych, jednakże precyzja uzyskanych wyników jest zbyt mała, aby stwierdzić czy faktycznie obserwujemy efekt łamania symetrii CP. Dlatego też, duża próbka zebranych przez grupę HADES danych dla zderzeń proton-proton, w których był produkowany mezon  $\eta^{(\prime)}$ , powinna pozwolić na zaobserwowanie efektu łamania symetrii CP. W badaniach tego rozpadu możliwe jest również poszukiwanie istnienia cząstki o nazwie axion, której istnienie postulowane jest (ale jeszcze nie potwierdzone), na gruncie przewidywań tzw. rezonansowej teorii chiralnej. Teoria ta mówi, iż rozpad ten mógłby przebiegać poprzez stan pośredni  $\eta^{(\prime)} \rightarrow e^+e^-X(17) \rightarrow e^+e^-\pi^+\pi^-$ . Zatem, analiza danych w celu poszukiwania łamania symetrii CP, może również przyczynić się do zdobycia nowej wiedzy w zakresie istnienia bozonu  $X(17)$ .

Dlatego proponowane badania nad rozpadami lekkich mezonów mają niezwykle istotny wkład w rozwój współczesnej fizyki eksperymentalnej jak i teoretycznej oraz w poznanie mechanizmów, dzięki którym możliwe jest istnienie naszego Wszechświata. Ponadto, należy podkreślić, że dotychczas uzyskiwane wyniki oraz znakomite działanie detektora HADES podczas kampanii pomiarowych prowadzonych w ośrodku GSI, pozwoliły na podjęcie decyzji o jego wykorzystaniu w nowo powstającym ośrodku FAIR w Darmstadt. Układ eksperymentalny HADES, obecnie jest jedynym spektrometrem na świecie, który jest zdolny do detekcji dilektronów w zderzeniach pionów, nukleonów i ciężkich jonów przy energiach  $s = 1-4 \text{ GeV}$ . Dlatego badania prowadzone w ramach tego projektu przyczynią się znacząco do przygotowania nowego programu badań, który będzie realizowany w ośrodku FAIR.