

Neutrino to najlżejsze i najbardziej rozpowszechnione w przyrodzie elementarne cząstki materii. Nie mają one ładunku elektrycznego i występują w trzech postaciach, zwanych „zapachami”, każdy w wariacie „neutrino” i „antyneutrino” (dla antymaterii). Istnienie neutrino zapostulował Wolfgang Pauli w latach 30. XX wieku, aby wyjaśnić kształt widma elektronów w rozpadzie beta. Hipoteza Pauliego została potwierdzona doświadczalnie dopiero 20 lat później. Zajęło to tyle czasu, ponieważ neutrino oddziałują niesłychanie rzadko przez słabe oddziaływanie jądrowe. Prawdopodobieństwo ich oddziaływania jest znikome, co sprawia, że neutrino i ich właściwości trudno badać eksperymentalnie. Mimo że neutrino oddziałują tak słabo, niektóre naturalne ich źródła są na tak intensywne, że możliwy jest ich (neutrino) pomiar. Raymond Davis i Masatoshi Koshiba otrzymali nagrodę Nobla w 2002 r. za pomiar neutrino docierających na Ziemię ze Słońca i odległej eksplozji supernowej. Obecnie intensywne wiązki neutrino są produkowane w wielu laboratoriach na całym świecie. Fakt, że neutrino są tak nieuchwytnie, jest wykorzystywany w astrofizyce do badania obiektów znajdujących się w odległości miliardów lat świetlnych od Ziemi.

Neutrino mają intrygującą właściwość: zmieniają zapach podczas przemieszczania się, zjawisko to znane jest jako oscylacje neutrino. Oscylacje neutrino stanowią piękną ilustrację podstawowych zasad mechaniki kwantowej i otwierają możliwość odpowiedzi na niektóre z najważniejszych otwartych pytań dotyczących wszechświata. Eksperymentalne potwierdzenie oscylacji neutrino zostało uhonorowane Nagrodą Nobla w 2015 roku za pomiary wykonane w laboratorium Super-Kamiokande w Japonii oraz Sudbury Neutrino Laboratory w Kanadzie.

Ważną przeszkodą w doświadczalnym badaniu neutrino jest to, że nie można wytworzyć mono-energetycznego strumienia neutrino, a oddziaływania neutrino w detektorze zachodzą na jądrach atomowych. Ponieważ szybkość oscylacji neutrino zmienia się w funkcji energii neutrino, bardzo ważne jest opracowanie narzędzi do precyzyjnej rekonstrukcji wartości energii oddziałującego neutrino. Można to zrobić tylko poprzez pomiar cząstek wybitych z jądra w wyniku oddziaływania neutrino. Warunkiem jest dobre zrozumienie rozpraszania neutrino na swobodnym nukleonie oraz modelowanie efektów jądrowych. Obecnie brak dokładnej wiedzy w tym zakresie jest głównym źródłem systematycznych niepewności w eksperymentach badających oscylacje neutrino. Czyni to eksperymenty droższymi w każdym wymiarze, naukowym, budżetowym, a nawet środowiskowym. Jedynym bowiem sposobem na zmniejszenie ogólnej niepewności jest prowadzenie eksperymentów przez długi czas, aby maksymalnie zredukować niepewność statystyczną.

W obecnej dekadzie badania właściwości neutrino wkraczają w nową fazę. W trakcie budowy są dwa ogromne eksperymenty: DUNE w USA i Hyper-Kamiokande w Japonii. Obydwa powinny rozpocząć zbieranie danych w 2027 roku. Przeprowadzone pomiary powinny wyjaśnić rolę odgrywaną przez neutrino w wyjaśnieniu podstawowego, ale słabo poznanego mechanizmu, który decyduje, dlaczego wszechświat w którym żyjemy składa się prawie w całości z materii, z tylko znikomą ilością antymaterii. Możliwe wyjaśnienie, zwane „leptogenezą”, opiera się na łamaniu symetrii CP, gdzie C to transformacja materia-antymateria, zaś P to symetria na odbicie lustrzane, w oddziaływaniach neutrino z materią. Eksperymentalnie, naruszenie symetrii CP dla neutrino może być obserwowane jako niewielka różnica w oscylacjach neutrino i antyneutrino. Osiągnięcie dokładności niezbędnej do zbadania tego efektu wymaga ogromnego wysiłku eksperymentalnego.

Kluczowym narzędziem w analizie danych eksperymentalnych są generatory zdarzeń Monte Carlo (MC). Są one niezbędne na każdym etapie analizy. Umożliwiają one na odwzorowanie obserwowanego w detektorze sygnału na leżące u jego podstaw mechanizmy fizyczne, przy użyciu podejścia probabilistycznego w efektywny obliczeniowo sposób. Udoskonalenie generatorów MC stało się przedmiotem dużego zainteresowania zarówno teoretyków, jak i eksperymentatorów.

Celem tego projektu jest ulepszenie opisu oddziaływań neutrino-jądra i zmniejszenie niepewności systematycznych w pomiarach wykonywanych w eksperymentach z oscylacjami neutrino. Nowość i oryginalność projektu polega na połączeniu badań teoretycznych i fenomenologicznych prowadzących do lepszego zrozumienia efektów jądrowych i unowocześnienia narzędzi symulacyjnych Monte Carlo z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego. Uzyskane wyniki i opracowane techniki zostaną zastosowane w pakietach obliczeniowych, takich jak NuWro, GENIE, NEUT i przyczynią się do zwiększenia czułości eksperymentów z oscylacjami neutrino.