

Wielu fizyków jest zdania, że fizyka podstawowych cząstek i oddziaływań znajduje się obecnie w impasie. Wprawdzie odkryta została cząstka Higgsa, co potwierdziło przewidywania Modelu Standardowego, ale z drugiej strony istnieje wiele pytań na które nie ma odpowiedzi. Np. obserwowana we Wszechświecie asymetria między materią i antymaterią oraz materią i ilością promieniowania mikrofalowego tła nie daje się wytłumaczyć procesami zawartymi w Modelu Standardowym. Nowe cząstki przewidziane przez Modele Super-Symetryczne nie zostały odkryte. Nie wiadomo, co mogłoby być tak zwaną Ciemną Materią i Ciemną Energią. Żaden model teoretyczny, inny niż fenomenologiczny Model Standardowy, nie uzyskał eksperymentalnego potwierdzenia. Istnieje duża nadzieja, że precyzyjne pomiary badające pewne elementarne cechy cząstek, są w stanie głębiej sięgnąć w naturę podstawowych oddziaływań i pomogą wyjść z tego impasu.

Dla cząstek, atomów i molekuł, których stan podstawowy jest niezdegenerowany, różna od zera wartość elektrycznego momentu dipolowego (EDM) świadczy o niezachowaniu parzystości \mathcal{P} i symetrii względem odwrócenia kierunku czasu \mathcal{T} (a więc również symetrii złożonej \mathcal{CP} , gdzie \mathcal{C} oznacza sprzężenie ładunkowe zmieniające cząstkę na antycząstkę). EDM takich cząstek jest uważany za najlepsze narzędzie do testowania fizyki wychodzącej poza Model Standardowy. Wydaje się, że istnienie procesów łamiących symetrię \mathcal{CP} jest konieczne, by móc wytłumaczyć wspomniane wyżej zagadki. Wprawdzie łamanie symetrii \mathcal{CP} zostało zaobserwowane w rozpadach neutralnych mezonów K i B, ale jest niewystarczające. Szukamy innych procesów, w innych oddziaływaniach i układach, gdzie ta symetria jest łamana. Aby móc rozwikłać, które procesy są odpowiedzialne za niezachowanie symetrii \mathcal{CP} należy zmierzyć EDM różnych obiektów. W szczególności EDM neutronu jest interesujący, gdyż według przewidywań, jego głównym źródłem jest oddziaływanie silne i EDM kwarków, a nie oddziaływanie słabe, jak w przypadku łamania symetrii w rozpadach neutralnych mezonów. Pomiary EDM neutronu są prowadzone od 60 lat. Jak dotąd zmierzono wartości tożsame z zerem, a najlepsze ograniczenie tej wartości zostało zmierzone przez kolaborację RAL-Sussex-ILL w Grenoble i wynosi $d_n < 3.0 \cdot 10^{-26} e\text{-cm}$. Dzięki tym pomiarom wiele modeli teoretycznych zostało sfalsyfikowanych lub musiało zostać zmienione, np. konieczne zmiany w modelach MSSM stworzyły tzw. „SUSY CP problem”.

Zasadniczym celem niniejszego projektu jest pomiar elektrycznego momentu dipolowego neutronu z dokładnością poniżej $9 \cdot 10^{-28} e\text{-cm}$. Osiągnięcie takiej dokładności jest bardzo oczekiwane, gdyż umożliwi weryfikację przewidywań najważniejszych modeli teoretycznych. Pomiar jest prowadzony we współpracy około 50 fizyków z Belgii, Francji, Niemiec, Polski, Szwajcarii, USA i Wielkiej Brytanii w Instytucie Paula Scherrera (PSI) w Szwajcarii. Uzyskana przez nas, jak dotąd, dokładność jest dwa razy większa, niż najlepszy dotąd opublikowany wynik - analiza danych jest w toku. Warto dodać, że pomiar nEDM@PSI jest jedynym, regularnie zbierającym w ostatnich latach dane i najdokładniejszym w historii pomiarem EDM neutronu. Jednak, aby móc uzyskać pożądaną dokładność należy zbudować nową aparaturę. Niniejszy projekt zakłada jej zbudowanie, uruchomienie i wykonanie testów. Do pomiaru używa się tzw. ultra-zimnych neutronów, czyli neutronów o bardzo małych energiach, mniejszych niż 250 neV, czyli prędkościach mniejszych niż 7 m/s. Takie neutrony można przechowywać w specjalnych pojemnikach. Aby zmierzyć EDM używamy rezonansowej metody Ramseya z rozdzielonymi polami oscylującymi. Ultra-zimne neutrony umieszcza się w pojemniku, w równoległych, statycznych polach magnetycznym i elektrycznym, i mierzy się częstość precesji spinów neutronów. Wspomniane w nazwie metody magnetyczne pola oscylujące używane są do obracania spinów neutronów, tak by móc kontrolować czas precesji neutronów. Różnica częstości precesji zmierzona dla pomiarów, gdy pola statyczne mają kierunki zgodne lub przeciwne jest miarą wielkości EDM. Pożądana precyzja pomiaru wymaga znajomości pola magnetycznego w pojedynczym cyklu pomiarowym z dokładnością $3 \cdot 10^{-14} \text{ T}$, co niech świadczy o trudności i jakości pomiaru.

Pomiar EDM neutronu umożliwia również na oszacowanie, lub ograniczenie masy aksjonów oddziałujących z materią. Aksjony, to hipotetyczne cząstki, będące interesującymi kandydatami na Ciemną Materię. Poszukiwanie efektów wywołanych przez aksjony zostało wykonane na bazie danych z pomiaru nEDM@PSI¹

Pomyślny pomiar EDM neutronu, wraz pomiarami EDM innych obiektów, z pomiarami czasu życia neutronu, poszukiwaniem nieznanymi cząstek oraz wzbronionych rozpadów znanych cząstek, pomiarami kosmologicznymi i innymi, przyczyni się do poznania budowy naszego Wszechświata na najbardziej fundamentalnym poziomie.

¹Phys. Rev. X 7 (2017) 041034. Publikacja zawiera również odniesienie do opisu pomiaru nEDM@PSI.