

Struktura wewnętrzna nukleonów z chromodynamiki kwantowej na sieci z fermionami twisted mass Popularne streszczenie projektu – Dr Krzysztof Cichy

Problem naukowy, który chcemy rozwiązać w proponowanym projekcie, dotyczy fundamentalnych własności protonów i neutronów (nazywanych kolektywnie nukleonami), cząstek, które tworzą niemal całą masę widzialnego Wszechświata. Oddziaływanie kwarków, cząstek elementarnych tworzących nukleony, poprzez wymianę gluonów, jest opisywane przez teorię chromodynamiki kwantowej (QCD), zaproponowaną i rozwijaną w latach 60. i 70. ubiegłego wieku. Stała sprzężenia QCD, która opisuje siłę oddziaływania kwark-gluon i gluon-gluon, zależy od energii lub, równoważnie, odległości pomiędzy cząstkami. Przy wysokich energiach (lub małych odległościach), rzędu 20 GeV (0.01 fm), stała ta ma niewielką wartość i oddziaływania mogą być opisane za pomocą rachunku zaburzeń, podobnie jak w prototypowej teorii pola – kwantowej teorii elektromagnetyzmu, czyli elektrodynamice kwantowej, która odniosła ogromne sukcesy w opisie natury. Z drugiej strony, przy niskich energiach (dużych odległościach), rzędu 200 MeV (1 fm), stała sprzężenia QCD staje się duża i metody perturbacyjne zawodzą. Istnienie tego reżimu QCD nadało rozważanemu oddziaływowaniu nazwę oddziaływania silnego. Zjawiska w tym reżimie mogą być modelowane fenomenologicznie, ale jedyną znaną metodą pozwalającą na ilościowe przewidywania z pierwszych zasad jest umieszczenie stopni swobody QCD na euklidesowej sieci oraz numeryczne obliczenie odpowiednich całek po trajektoriach, z użyciem algorytmów Monte Carlo zaimplementowanych na największych światowych superkomputerach. Takie podejście nazwano QCD na sieci (Lattice QCD).

Głównym celem tego projektu badawczego jest osiągnięcie lepszego teoretycznego zrozumienia wewnętrznej struktury nukleonów, z użyciem metod numerycznych QCD na sieci z tzw. dyskretyzacją twisted mass kwarków. Podstawowymi obiektami wyrażającymi naszą wiedzę o strukturze hadronów są funkcje rozkładu partonów (Parton Distribution Functions), nazywane niżej PDFami. Są one inherentnie niepurbacyjne i stąd ich ilościowe obliczenie z pierwszych zasad może być przeprowadzone jedynie na sieci. Jednakże, ich definicja na tzw. stożku świetlnym powoduje, że niemożliwe jest użycie standardowych technik sieciowych, wymagających niezerowej odległości przestrzennej. Sposób na obejście tego ograniczenia zaproponował Ji w 2013 roku. Jego metoda polega na obliczeniu innych obiektów, tzw. quasi-PDFów, które mogą być następnie powiązane z fizycznymi PDFami, których wyznaczenie jest pożądane.

W naszych wstępnych badaniach pokazaliśmy obliczeniową wykonalność tego podejścia. Naszym obecnym celem i głównym celem tego projektu jest obliczenie kwarkowych PDFów metodą Ji, z uwzględnieniem wszystkich źródeł efektów systematycznych. Efekty te wynikają z niezerowej stałej sieci (błędy dyskretyzacji), skończoności sieci oraz z niefizycznej masy lekkich kwarków (nadanie im większej masy znacząco redukuje koszt obliczeniowy). Sposobem na zbadanie tych efektów jest przeprowadzenie symulacji z różnymi stałymi sieci, jej rozmiarami oraz masami kwarków, co będzie istotnym elementem projektu. W szczególności, symulować będziemy fizyczne masy kwarków, co stało się możliwe dopiero w ostatnich latach dzięki rosnącej mocy obliczeniowej superkomputerów, a także dzięki postępom algorytmicznym. Wszystkie te kroki spowodują, że wyznaczone PDFy będą bezpośrednio porównywalne z eksperymentem. Co więcej, PDFy są niezwykle ważne jako dane wejściowe do teoretycznych przewidywań dla procesów zachodzących w Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC) – stąd, nasze ich obliczenie może doprowadzić do zmniejszenia związanych z tymi przewidywaniami niepewności. Będziemy badać również możliwość rozszerzenia podejścia Ji do innych typów funkcji rozkładu (opisujących inne aspekty struktury nukleonów), np. PDFów gluonowych. Ich znajomość jest istotna np. dla przewidywań teoretycznych w poszukiwaniach fizyki wychodzącej poza Model Standardowy, które są jednymi z najistotniejszych celów eksperymentów w LHC.

Projekt osadzony będzie w trwającym od wielu lat programie European Twisted Mass Collaboration (ETMC) badania różnych aspektów oddziaływania silnego z pierwszych zasad. Struktura hadronów jest jednym z najistotniejszych obszarów tych badań, jako że uzyskane wyniki mogą wpłynąć na rozumienie Wszechświata na bardzo fundamentalnym poziomie oraz mogą być niezwykle ważne z punktu widzenia fenomenologii i eksperymentu. Jak pokazuje historia nauki, badania podstawowe, takie jak będą przeprowadzone w tym projekcie, mogą prowadzić do przełomów technologicznych wiele lat później. QCD na sieci, z wymaganymi ogromnymi zasobami obliczeniowymi, była np. jedną z głównych dziedzin nauki która najbardziej wpłynęła na rozwój superkomputerów i dalsza stymulacja tego rozwoju oczekiwana jest w przyszłości.