

Krzysztof Cichy, Trójwymiarowa struktura nukleonu z chromodynamiki kwantowej na sieci

Protony i neutrony, nazywane razem nukleonami, są budulcem materii odpowiedzialnym za niemal całą masę widzialnego Wszechświata. Przez długi czas były one uważane za cząstki elementarne, ale doświadczenia z lat 60. XX wieku pokazały, że są zbudowane z mniejszych składników, kwarków i gluonów (partonów). Dalsze badania ujawniły, że ruch partonów wewnątrz nukleonu jest bardzo złożony, a same nukleony mają bardzo bogatą strukturę wewnętrzną. Za strukturę tę odpowiada oddziaływanie silne, jedno z czterech oddziaływań fundamentalnych natury, opisywane przez teorię zwaną chromodynamiką kwantową (QCD, z ang. *quantum chromodynamics*). Siła oddziaływań silnych zależy od energii. W szczególności, sprzężenie QCD przy niskich energiach staje się bardzo duże, implikując, że metoda skuteczna w opisie np. elektromagnetyzmu, rachunek zaburzeń, zawodzi. Obecność tego reżimu QCD o dużym sprzężeniu ma daleko idące konsekwencje fizyczne i metodologiczne. Odpowiada, mianowicie, za złożoną strukturę nukleonu, a także za trudności w jej badaniu.

Kompleksowe zbadanie wielu aspektów struktury nukleonu jest głównym celem nowych, przełomowych eksperymentów, takich jak ogromne przedsięwzięcie budowy Zderzacza Elektronowo-Jonowego (EIC, ang. *Electron-Ion Collider*) w Narodowym Laboratorium Brookhaven w Stanach Zjednoczonych. Oczekiwanemu progresowi doświadczalnemu towarzyszyć muszą postępy teoretyczne, w szczególności obliczenia obserwabli opisujących strukturę nukleonu z pierwszych zasad. Bez narzędzia rachunku zaburzeń, takie obliczenia są możliwe w nieperturbacyjnym sformułowaniu QCD na sieci. W tym podejściu kontinuum czasoprzestrzenne jest dyskretyzowane i otrzymuje się dobrze zdefiniowane wyrażenia, które można obliczyć numerycznie. Problem numeryczny jest nadal bardzo złożony, ale jest możliwy do rozwiązania za pomocą wysoce zoptymalizowanych algorytmów na najpotężniejszych superkomputerach na świecie.

W ostatnich kilku latach pojawiły się i zaczęły być intensywnie badane metody pozwalające na dostęp do struktury partonowej nukleonu. Obliczenia te polegają na wyznaczaniu rozkładów partonowych kwantyfikujących różne aspekty nukleonu, m.in. położenia i pędy tworzących go partonów. Funkcje takie są nazywane funkcjami rozkładu partonów (PDFs, ang. *parton distribution functions*), uogólnionymi rozkładami partonowymi (GPDs, ang. *generalized parton distributions*) i rozkładami zależnymi od pędu poprzecznego (TMDs, ang. *transverse-momentum-dependent PDFs*). PDFy są najprostsze i opisują jedynie zależność od pędu w kierunku ruchu nukleonu. GPDs i TMDs, z kolei, kwantyfikują pełną trójwymiarową strukturę nukleonu. Kompletny opis ilościowy wymaga znajomości wszystkich tych funkcji i jest obecnie bardzo ograniczony.

Rozwijając nasze badania z ostatnich 8 lat, znacząco poszerzymy wiedzę na temat funkcji partonowych, w szczególności opisujących strukturę trójwymiarową. Pierwsze kilka lat doświadczeń z różnymi metodami wyznaczania tych rozkładów na sieci dostarczyły dowodów ich teoretycznej poprawności i praktycznej stosowalności. Droga od badań eksploracyjnych do precyzyjnych obliczeń jest jednak długa, z wieloma nietrywialnymi krokami i wyzwaniem do pokonania. Kroki te obejmować będą postęp teoretyczny, optymalizację metod obliczeniowych, przeprowadzenie szeroko zakrojonych obliczeń na superkomputerach i analizę otrzymanych danych. Ostatecznym rezultatem tego wątku badawczego będą rozkłady opisujące strukturę nukleonu ze starannie skwantyfikowanymi niepewnościami, dające wgląd w różne aspekty wnętrza nukleonu. W połączeniu z bogatymi danymi doświadczalnymi z nowych eksperymentów, przyczyni się to do zrozumienia bardzo fundamentalnych aspektów natury. Poza inherentnym znaczeniem takiego rozumienia na najbardziej fundamentalnym poziomie, historia nauki pokazuje, że takie badania podstawowe często prowadzą do przełomów technologicznych w przyszłości.