

1. Cel projektu/Hipoteza badawcza

Początek XX wieku to pojawienie się dwu rewolucyjnych nowych pomysłów w fizyce teoretycznej. Pierwszym z nich była mechanika kwantowa (MK), nowa interpretacja świata w mikro-skali. Drugim była Ogólna Teoria Względności (OTW), jedna z najważniejszych metod opisujących Wszechświat i jego ewolucję w skali kosmicznej. OTW pokazała, że źródłem oddziaływań grawitacyjnych są zakrzywienia czasoprzestrzeni. Przewidywała też, że ewolucja Wszechświata rozpoczęła się z chwilą tzw. Wielkiego Wybuchu, kiedy jego objętość była skrajnie mała. Od początku było oczywiste, że w tej granicy opis za pomocą teorii klasycznej, takiej jak OTW, załame się i musi być zastąpiony wersją kwantową, w której rolę pola kwantowego odgrywać będzie kwantowa geometria. Standardowym podejściem MK jest zastosowanie teorii perturbacji wokół rozwiązań OTW. Takie podejście nie pracuje, gdyż uzyskana teoria okazuje się nierenormalizowalna, co oznacza, że lokalne fluktuacje geometrii oddalają układ od rozwiązania klasycznego. Wielką zagadką pozostaje problem konstrukcji teorii, która jednocześnie opisuje fluktuacje geometrii w małej skali i gładką geometrię w skali makroskopowej. Tę zagadkę częściowo udało się rozwiązać w modelu, nad którym w ostatnich latach pracował Kierownik Projektu (PI).

Obecny projekt opiera się na doświadczeniu PI w badaniach modelu Kausalnych Dynamicznych Triangulacji (CDT) w czterech wymiarach czasoprzestrzennych. Model można interpretować jako próbę sformułowania kwantowej geometrii, używając metod kwantowej teorii pola i fizyki statystycznej. Własności modelu były dogłębnie badane przy użyciu numerycznych symulacji Monte Carlo, przy założeniu, że przestrzeny Wszechświat jest zamkniętą trójwymiarową sferą. W jednej z czterech faz modelu, tzw. fazie de Sittera, udało się odtworzyć czasową ewolucję przestrzennej objętości, w pełni zgodnej z przewidywaniami OTW. W tym samym czasie wykazano, że geometryczne własności we wszystkich fazach są efektem subtelnej równowagi między fizycznym działaniem a liczbą możliwych realizacji kwantowej geometrii przy określonych wartościach parametrów teorii. Jednym z nieoczekiwanych wyników w fazie de Sittera było odkrycie, że w małej skali efektywny wymiar czasoprzestrzeni redukuje się do wymiaru 2.

Sukces modelu pozostawia wiele otwartych pytań zanim uda się w pełni wykazać jego skuteczność jako narzędzia do badań własności kwantowej grawitacji. Odpowiedź na te pytania jest głównym celem projektu. Pierwsze z pytań to czy model w granicy semiklasycznej odtwarza pełne zachowanie przewidywane przez OTW, także w kierunkach przestrzennych. W tym celu konieczna jest definicja układu współrzędnych w modelu bez jakiegokolwiek geometrii tła. Ważnym krokiem w tym kierunku było zaproponowanie nowej wersji modelu, gdzie sferyczna topologia przestrzennego Wszechświata została zastąpiona przez topologię trójwymiarowego torusa. Wprowadzenie układu współrzędnych dla takiego układu było testowana z bardzo obiecującymi wynikami. Kolejnym, fascynującym problemem jest badanie własności kwantowej teorii grawitacji, przewidywanej przez model w małej skali. Granica kwantowa wymaga analizy modelu w przestrzeni stałych sprzężenia na granicy faz, w otoczeniu punktów potrójnych, gdzie spotykają się trzy fazy. Ten zakres stał się dostępny do badań numerycznych dopiero w nowej wersji modelu. Użycie toroidalnej topologii przestrzennej otwiera okno dla analizy szeregu nowych efektów, takich jak rola pól materii i ich wpływu na geometrię kwantową, a w konsekwencji na możliwe sformułowania kwantowej grawitacji.

2. Proponowana metodologia

Brak rozwiązań analitycznych jest typowym problemem wszystkich znanych sformułowań kwantowej grawitacji w wymiarach większych niż dwa. W przypadku CDT jesteśmy zmuszeni używać wielkoskalowych symulacji komputerowych Monte Carlo, opartych na kodzie, w oryginalnej wersji napisanym przez PI, a następnie rozwijanym wraz ze współpracownikami. Rezultaty obliczeń są analizowane przy użyciu metod skończonego rozmiaru, podobnych do tych, używanych w chromodynamice kwantowej i fizyce statystycznej. PI był odpowiedzialny za rozwój narzędzi numerycznych w większości wcześniej prowadzonych badań.

3. Spodziewany wpływ projektu na rozwój dziedziny

Symulacje komputerowe okazały się ważnym narzędziem do zrozumienia nieperturbacyjnych aspektów chromodynamiki kwantowej. Model CDT może odegrać podobną rolę w badaniach kwantowej grawitacji, być może jako pierwszy krok na drodze unifikacji czterech podstawowych oddziaływań elementarnych. Jest to jeden z najbardziej ambitnych problemów współczesnej fizyki teoretycznej.

4. Pionierski aspekt projektu badawczego

Problemy przedstawione w projekcie są fundamentalne z punktu widzenia fizyki teoretycznej. Planujemy badania modelu kwantowej grawitacji w ramach CDT zarówno w skali makroskopowej, gdzie chcielibyśmy odtworzyć równania OTW, jak w małej skali, gdzie widoczny będzie kwantowy aspekt teorii. Obie granice są wysoce nietrywialne i wymagają zrozumienia struktury złożonych stanów geometrycznych, bardzo różnych od gładkiej klasycznej granicy OTW. Granica kwantowa oznacza, że typowe geometrie są zdominowane przez duże fluktuacje geometrii, być może włącznie z fluktuacjami sygnatury. Planujemy użycie nowej wersji modelu, którą można uważać za nowe potężne szkło powiększające, które pozwoli zbadać jak struktura czasoprzestrzeni wygląda w skali Plancka i jakie konsekwencje ma to w semiklasycznej granicy makroskopowej.