

Kwantowa teoria pola (QFT) jest często uważana za fundamentalny język fizyki. Łączy ona dwa wcześniej odrębne obszary: nasze rozumienie przestrzeni i czasu w szczególnej teorii względności oraz opis procesów fizycznych w mechanice kwantowej. QFT jest niezwykle skuteczną konstrukcją, która stanowi podstawę zarówno naszej interpretacji eksperymentów w zderzaczach cząstek, jak i rozwoju zaawansowanych materiałów.

Pomimo swoich sukcesów, QFT wciąż zмага się z poważnymi, nierozwiązanymi problemami. Na przykład, jest dobrze rozumiana jedynie w tzw. **reżimie perturbacyjnym** — uproszczonym scenariuszu, w którym oddziaływania między cząstkami są słabe. Poza tym reżimem nasze rozumienie pozostaje niekompletne. Kolejnym istotnym problemem jest to, że QFT w swojej obecnej formie wydaje się niekompatybilna z ogólną teorią względności, czyli naszą najlepszą teorią grawitacji.

Niniejszy projekt skupia się na ważnej klasie kwantowych teorii pola zwanych **nieliniowymi modelami sigma**. Modele te odgrywają kluczową rolę w fizyce cząstek, ogólnej teorii względności, teorii strun oraz fizyce ciała stałego. Są one formułowane przy użyciu zaawansowanych pojęć matematycznych — a konkretnie metod geometrycznych — co pozwala temu samemu modelowi pojawiać się w różnorodnych kontekstach fizycznych.

Jednakże, nieliniowe modele sigma znane są z tego, że bardzo trudno je rozwiązać. Główne wyzwanie leży w ich nieliniowości, która uniemożliwia rozdzielenie teorii na niezależne wyrazy „swobodne” (kinetyczne) i oddziałujące. W rezultacie, często zawodzą tu standardowe techniki, takie jak teoria zaburzeń. Konsekwentnie, modele sigma są zazwyczaj dobrze rozumiane tylko **w specyficznych przypadkach**, takich jak dwuwymiarowa czasoprzestrzeń lub gdy wykazują one wysoki stopień symetrii.

Niniejszy projekt ma na celu przezwyciężenie tych ograniczeń poprzez badanie modeli sigma wykraczających poza powyższe restrykcyjne założenia. Korzystając z kombinacji uznanych narzędzi (np. całkowalność) oraz nowszych podejść (np. geometrii uogólnionej i granic nierelatywistycznych), projekt dąży do zbadania modeli sigma w wyższych wymiarach oraz takich, które nie posiadają szczególnych symetrii. Oczekuje się, że prace te dostarczą nowego wglądu w nieuchwytnie reżimy nieperturbacyjne kwantowej teorii pola, w których dominują silne oddziaływania.

W pewnych przypadkach modele sigma w dwóch wymiarach mogą być **całkowalne**, co oznacza, że można je rozwiązać ściśle. W ramach niniejszego projektu planuje się opracowanie nowych metod badania całkowalnych modeli, rezygnując z takich typowych założeń jak potrzeba dużej ilości symetrii.

Inną mocną stroną modeli sigma jest istnienie **dualności**. Zachodzą one, gdy dwa pozornie różne modele okazują się mieć identyczne właściwości fizyczne, albo na poziomie klasycznym, albo nawet w pełnej teorii kwantowej. Dualności często łączą złożone, nieperturbacyjne aspekty jednego modelu z prostszymi, perturbacyjnymi aspektami innego. Jednakże, pojawiają się one tylko w modelach sigma o określonych symetriach. Ostatnie badania, w tym prowadzone przez głównego badacza (PI), pokazują, że geometria uogólniona — rozszerzenie tradycyjnych metod geometrycznych — zapewnia ramy dla zrozumienia tych dualności, nawet w bardziej dowolnych modelach sigma.

Wreszcie, projekt zgłębi tzw. granice odsprężania, które pozwalają wyodrębnić określone podobszary danego modelu sigma. Często upraszczają one model na tyle, by możliwe było badanie jego właściwości nieperturbacyjnych. Przykładowo, w ostatniej dekadzie znaczną uwagę przyciągają **granice nierelatywistyczne i ultrarelatywistyczne**, szczególnie w dwu- i trójwymiarowych modelach sigma. Podważa to tradycyjne założenie, że modele sigma muszą się opierać na geometrii Riemanna — matematycznym formalizmie blisko związanym z naszym intuicyjnym rozumieniem kształtów i odległości. Rezygnując z niego, projekt otwiera nowe perspektywy fizyczne i matematyczne w badaniach nad modelami sigma.