

Przestrzeń i czas są kluczowymi pojęciami w naszym życiu. Dlatego też naukowcy i filozofowie zastanawiali się nad nimi od starożytnych czasów. Albert Einstein na początku ubiegłego wieku zrewolucjonizował nasz światopogląd zadziwiającą obserwacją: przestrzeń i czas nie są różnymi zjawiskami. Wynikają one z jednej rzeczy, czasoprzestrzeni. Co więcej, nie są one tylko ustaloną sceną, na której rozgrywa się fizyka, ale dynamicznymi uczestnikami, którzy wchodzą w interakcje z materią i energią. Dzięki sformalizowaniu tych podstawowych idei w matematycznych ramach geometrii Riemanna narodził się jeden z dwóch filarów fizyki teoretycznej - ogólna teoria względności. Kształtuje ona fizykę do dziś, przewidując fale grawitacyjne i czarne dziury, za co przyznano nagrody Nobla w 2017 i 2020 roku. Nawet nawigacja satelitarna, kluczowa technologia XXI wieku, byłaby niemożliwa bez poprawek wynikających z ogólnej teorii względności.

Pomimo tych sukcesów, nasze pojmowanie przestrzeni i czasu jest dalekie od pełnego zrozumienia. W niezwykle małej skali długości Plancka, wynoszącej 10^{-35} m (ponad 100 miliardów miliardów razy mniejszej od protonu), ogólna teoria względności i kwantowa teoria pola, drugi filar współczesnej fizyki, są ze sobą sprzeczne. Pokolenia fizyków próbowały znaleźć rozwiązanie tej zagadki - teorię kwantowej grawitacji. Jednak pomimo znacznego postępu, jaki dokonał się w ostatnich dziesięcioleciach, pozostało jeszcze wiele do zrobienia. Jedno jest jednak pewne: nasze wyobrażenie o czasoprzestrzeni musi się ponownie drastycznie zmienić na bardzo małych odległościach i przy wysokich energiach, gdy najsłabsza z czterech podstawowych sił, grawitacja, staje się dominująca. W szczególności nie da się wyjaśnić wnętrza czarnej dziury ani samego początku naszego Wszechświata bez zastąpienia obecnego geometrycznego opisu przestrzeni i czasu bardziej rozbudowaną koncepcją kwantowej czasoprzestrzeni. W tym momencie nasuwają się dwa pytania, które stanowią jedną z największych zagadek współczesnej fizyki:

1) Jakie są fundamentalne własności kwantowej czasoprzestrzeni?

2) Jaki aparat matematyczny jest odpowiedni do jej opisu?

Proponowany program badawczy będzie dotyczył obu tych zagadnień. Obecne eksperymenty nie są w stanie zbadać odpowiednich skal energii. Mimo to, wszystkie znane prawa fizyki muszą być zgodne z tym, co może być znalezione. Wynikające z tego warunki zgodności są bardzo restrykcyjne i kierują poszukiwaniem odpowiedzi. Ze względu na ich dynamiczną naturę, liczba różnych kwantowych czasoprzestrzeni jest nieskończona. Chociaż odpowiedź na powyższe pytania dla wszystkich z nich jednocześnie jest ostatecznym celem, wydaje się to zbyt ambitne przy użyciu narzędzi, którymi dysponujemy. Dlatego pracujemy nad pewną podklasą przykładów, aby wskazać drogę. Wszystkie z nich wyróżniają się niezwykle silnymi symetrami. Symetria jest jednak mieczem obosiecznym: gwarantuje wymaganą kontrolę obliczeniową, ale może być tak ograniczająca, że jednocześnie zabija wszystkie nietrywialne zjawiska. Radzimy sobie z tym balansem poprzez wprowadzenie kwantowej symetrii Poissona-Liego. Jest ona znacznie mniej restrykcyjna niż wszystkie inne symetrie rozważane wcześniej i pozwala na analizę ogromnej liczby kwantowych czasoprzestrzeni o ogólnych cechach.

Symetria Poissona-Liego jest motywowana przez inną zmianę paradygmatu, gdzie punktowe cząstki są zastępowane przez mikroskopijne zamknięte struny w skali Plancka. Dostarczają one spójnego uzupełnienia grawitacji w ultrafiolecie (UV, ultrafiolet = wysoka energia) i są najbardziej rozwiniętą propozycją tego, jak może wyglądać ogólna teoria względności przy dowolnie wysokich energiach. Ze względu na swoją rozciągłą naturę, struny badają czasoprzestrzeń zupełnie inaczej niż cząstki punktowe i dlatego wykazują nowe zjawiska dualności. Na przykład, dualność T stwierdza, że dwie pozornie niepowiązane ze sobą czasoprzestrzenie są wciąż nieodróżnialne z punktu widzenia struny. W swoim najlepiej rozumianym i najprostszym przejawie, dualność T odnosi się tylko do czasoprzestrzeni zawierających jeden lub więcej okręgów. Ten przypadek jest jednak bardzo restrykcyjny i wyklucza większość scenariuszy, w których wgląd w kwantowe czasoprzestrzenie jest obecnie rozpaczliwie potrzebny, aby

- rozwiązać zagadkę osobliwości w czarnych dziurach i na początku naszego Wszechświata,
- ujawnić mechanizm leżący u podstaw korespondencji AdS/CFT, innego centralnego dualizmu, który wiąże grawitację w czasoprzestrzeni Anty-De Sittera (AdS) z konforemna teorią pola (CFT) na jej brzegu,
- zrozumieć, w jaki sposób teoria strun może dokładnie opisać nasz Wszechświat w kategoriach strumienia kompaktyfikacji,
- ostatecznie lepiej zrozumieć ścisły związek między teorią informacji a grawitacją kwantową.

Przezwyciężamy ten problem i przyspieszamy postęp we wszystkich tych czterech dziedzinach, forsując najbardziej ogólną wersję T-dualności, T-dualność Poissona-Liego i leżącą u jej podstaw symetrię Poissona-Liego, poza klasyczny limit. W ten sposób będziemy mogli systematycznie wyprowadzić fundamentalne własności czasoprzestrzeni bezpośrednio z teorii strun, zrozumieć implikacje dla korespondencji AdS/CFT i ostatecznie zidentyfikować odpowiednie ramy matematyczne, które zastąpią geometrię Riemanna. Oprócz nowego i najprawdopodobniej przełomowego wglądu w jedno z centralnych zagadnień fizyki teoretycznej o dużym wpływie na wszystkie powyższe dziedziny, zbudujemy nowy kierunek badawczy w Polsce i ugruntujemy jego pozycję w czołówce międzynarodowej.