

Mechanika kwantowa i ogólna teoria względności to dwa kamienie węgielne, na których opiera się nasze obecne rozumienie fizyki. Jednakże, pomimo ich ogromnego sukcesu w opisywaniu świata fizycznego, te dwie teorie opierają się na założeniach, które są ze sobą w wyraźnym konflikcie. Główną lekcją płynącą z teorii kwantowej jest to, że struktura świata jest fundamentalnie dyskretna – jest zbudowana z dyskretnych bloków konstrukcyjnych, czyli kwantów (takich jak elektrony i fotony). Ponadto, zakłada się, że arena, na której te kwanty żyją, przestrzeń i czas, są statyczne i niezmiennie. Porównajmy to z sytuacją w ogólnej teorii względności. Kluczową ideą teorii Einsteina jest to, że grawitacja jest zjawiskiem geometrycznym, wynikającym z zakrzywienia przestrzeni i czasu. Tak więc przestrzeń i czas w ogólnej teorii względności są dynamiczne; dobrze znanym przykładem są fale grawitacyjne, które są niczym innym jak falami zakrzywienia czasoprzestrzeni przemieszczającymi się przez Wszechświat. Z drugiej strony, w ogólnej teorii względności zakłada się, że struktura przestrzeni i czasu jest gładka i ciągła, nawet w arbitralnie małych skalach długości.

Dlatego obecnie brakuje nam zrozumienia ogólnej teorii względności i teorii kwantowej w kategoriach jednej struktury opartej na spójnym i konsekwentnym zestawie założeń. Ramy takie byłyby niezbędne do wiarygodnego opisu zjawisk fizycznych, w których zarówno grawitacja, jak i teoria kwantowa odgrywają ważną rolę – na przykład fizyki początku Wszechświata lub końcowych etapów życia gwiazdy zapadającej się pod wpływem własnej grawitacji. Wyzwanie stworzenia takiego opisu – teorii kwantowej grawitacji – jest jednym z największych nierozwiązanych problemów dzisiejszej fizyki teoretycznej.

W chwili obecnej wydaje się, że wciąż jesteśmy dość daleko od posiadania dobrze ugruntowanej kwantowej teorii grawitacji, mimo że w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat pojawiło się kilku kandydatów. Jedną z głównych propozycji takiej teorii jest pętlowa grawitacja kwantowa. Pętlowa grawitacja kwantowa bardzo poważnie traktuje kluczowe założenie ogólnej teorii względności – że grawitacja jest po prostu manifestacją geometrii przestrzeni i czasu – i jest w stanie dostarczyć konkretnej realizacji kwantowej teorii grawitacji jako teorii skwantowanej geometrii. Podstawowym przewidywaniem pętlowej grawitacji kwantowej jest to, że trójwymiarowa przestrzeń, którą zamieszkujemy ma wewnątrz dyskretną strukturę, będąc zbudowaną z dyskretnych jednostek przestrzeni – kwantów objętości i powierzchni.

Główną trudnością, którą pętlowa grawitacja kwantowa dzieli ze wszystkimi innymi perspektywicznymi teoriami kwantowej grawitacji, jest to, że bardzo trudno jest powiązać formalizm teorii ze zjawiskami fizycznymi, które można zaobserwować w eksperymentach. Matematyczna struktura pętlowej grawitacji kwantowej jest dość zawiła, a obliczenia dotyczące konkretnych, fizycznie istotnych pytań są niezwykle skomplikowane do wykonania. Jest to wyzwanie, które musi zostać ostatecznie pokonane, zanim pętlowa grawitacja kwantowa będzie mogła zostać zaakceptowana jako fizycznie poprawna teoria kwantowej grawitacji. Teorie fizyczne powinny być ostatecznie oceniane nie przez piękno ich matematycznych równań, ale przez użycie ich do wyprowadzenia obserwowalnych przewidywań fizycznych i skonfrontowanie ich z danymi zebranymi z eksperymentów.

Celem tego projektu jest rozwiązanie powyższego problemu za pomocą modeli, które są otrzymywane z pętlowej grawitacji kwantowej poprzez zastosowanie procedury znanej jako ustalanie cechowania. Procedura ta, którą można opisać jako specyficzny wybór układu współrzędnych, prowadzi do powstania modeli, których struktura techniczna jest niezwykle prosta w porównaniu z formalizmem pełnej pętlowej grawitacji kwantowej. W ramach tych modeli możliwe jest wykonywanie obliczeń, które w pełnej teorii byłyby w zasadzie niepraktyczne. Wyniki takich obliczeń mogą nam powiedzieć, co pętlowa grawitacja kwantowa ma do powiedzenia o konkretnych sytuacjach fizycznych, takich jak grawitacyjne zapadanie się gwiazdy czy kosmiczne promieniowanie tła, które powstało krótko po narodzinach wszechświata. Dzięki temu uzyskamy jaśniejszy obraz fizycznej zawartości pętlowej grawitacji kwantowej i będziemy bliżej zrozumienia, czy teoria ta może zostać ostatecznie uznana za fizycznie poprawny opis świata.