

Od termicznej do kwantowej holografii i z powrotem

Jednym z najbardziej fascynujących osiągnięć we współczesnej fizyce teoretycznej jest tak zwana korespondencja AdS/CFT, która postuluje równoważność (określaną również mianem „dualności”) dwóch pozornie całkowicie różnych teorii – niegrawitacyjnej kwantowej teorii pola oraz teorii obejmującej grawitację w większej liczbie wymiarów. Taka relacja często nazywana jest „hologrfią”, ponieważ grawitacja jawi się jako rodzaj „hologramu” teorii o mniejszej liczbie wymiarów. Umożliwia to przetłumaczenie problemów w kwantowej teorii pola na problemy grawitacyjne i odwrotnie. Szczególnie użyteczną cechą holografii jest to, że bardzo trudne problemy w kwantowej teorii pola, w których teoria jest silnie oddziałująca, zostają przekształcone w stosunkowo „łatwe” klasyczne problemy w grawitacji. Można zatem rozwiązywać te przekształcone problemy po stronie grawitacyjnej, np. poprzez numeryczne rozwiązywanie równań Einsteina, a następnie przetłumaczyć otrzymane wyniki na język oryginalnej kwantowej teorii pola. Doprowadziło to do licznych sukcesów i nowych wglądów w dynamikę silnie oddziałujących teorii cechowania, np. dynamikę plazmy kwarkowo-gluonowej oraz pojawienie się jej późniejszego hydrodynamicznego opisu, co ma istotne znaczenie w kontekście eksperymentalnych badań nad zderzeniami ciężkich jonów przeprowadzanych obecnie w CERN.

Pozostają jednak fizycznie istotne problemy, które nie poddają się tej strategii. Dotyczy to w szczególności procesu hadronizacji, czyli przejścia gorącej plazmy kwarkowo-gluonowej w hadrony, oraz procesu nukleacji – pojawiania się zarodków stabilnej fazy w trakcie ochładzania i rozszerzania się silnie oddziałującego układu, w którym zachodzi przejście fazowe pierwszego rodzaju, co ma znaczenie dla fizyki wczesnego Wszechświata. Dla tych procesów oczekuje się, że przetłumaczone problemy będą obejmować efekty kwantowe po stronie grawitacyjnej. Jednym z kluczowych celów projektu badawczego jest zbadanie kwantowych aspektów holografii, takich jak promieniowanie Hawkinga w tym kontekście, oraz opracowanie technik umożliwiających rozwiązywanie tego rodzaju problemów w ramach holografii. Uzyskane wglądy w proces hadronizacji czy nukleacji zarodków nowej fazy byłyby cenne nie tylko z teoretycznego punktu widzenia, lecz także ze względu na możliwe zastosowania w badaniach zderzeń ciężkich jonów oraz we wczesnym Wszechświecie.

Drugi kluczowy cel projektu badawczego jest ponownie zakorzeniony w kwantowych aspektach holografii, ale koncentruje się na podążaniu w przeciwnym kierunku – od kwantowych teorii pola do grawitacji. Jest to szczególnie ważne, ponieważ holografia może być zasadniczo rozumiana jako dostarczająca kwantowej definicji grawitacji przy użyciu niżej-wymiarowej niegrawitacyjnej kwantowej teorii pola, a zrozumienie kwantowej grawitacji jest jednym z fundamentalnych otwartych problemów w fizyce teoretycznej. Dlatego każdy wgląd w naturę i właściwości kwantowej grawitacji z holografii byłby bardzo pomocny. Problem ten jest jednak bardzo trudny, ponieważ wymaga dobrego zrozumienia zarówno niżej-wymiarowej niegrawitacyjnej kwantowej teorii pola wystarczającej do wykonywania obliczeń, jak i dualnej interpretacji geometrycznej do wnioskowania o właściwościach kwantowej grawitacji z materią.

Podjęcie przyjęte przez projekt badawczy zakłada rozważenie dokładnie rozwiązywalnych kwantowych teorii pola w wysokich temperaturach. Ma to dodatkową zaletę, ponieważ pozwala na badanie czarnych dziur po stronie grawitacyjnej, których zachowanie na poziomie kwantowym jest ze wszech miar istotne oraz interesujące, ponieważ wiąże się z ostrym konfliktem pomiędzy mechaniką kwantową a grawitacją, objawiającym się np. w tzw. paradoksie informacyjnym czarnej dziury. Niniejszy projekt badawczy czerpie tu z niedawnej pracy Kierownika Projektu, która pokazała mechanizm unikania tego paradoksu, realizowany w najprostszym przypadku tzw. konforemnej teorii pola modelu Isinga, w której po dualnej stronie grawitacyjnej materia wrzucona do trójwymiarowej czarnej dziury została wchłonięta, ale następnie, co zaskakujące, ponownie się wyłoniła. Jednym z kluczowych tematów badawczych projektu będzie zbadanie, czy podobny mechanizm może zachodzić w innych teoriach oraz w wyższej, bliższej naszej rzeczywistości liczbie wymiarów. Wgląd w te kwestie znacznie zwiększyłby nasze zrozumienie kwantowej grawitacji z materią, a także zachowania czarnych dziur w kontekście utraty informacji.