

**Recenzja w postępowaniu w sprawie nadania dr. Michałowi Ecksteinowi stopnia naukowego doktora habilitowanego**

Pan dr Michał Eckstein przedstawił jako osiągnięcie habilitacyjne cykl dziewięciu prac opublikowanych w latach 2013-2021. Ukazały się one w renomowanych czasopismach publikujących prace z fizyki teoretycznej, w tym teorii grawitacji i fizyki matematycznej, *Physical Review A* (3 prace), *Journal of Geometry and Physics* (2 prace), *Physical Review D*, (1 praca), *Classical and Quantum Gravity* (1 praca), *Symmetry, Integrability and Geometry: Methods and Applications* (1 praca) i *Universe* (1 praca). Osiem z tych prac jest wieloautorskich. Obszerne oświadczenia współautorów oraz deklaracje samego habilitanta dotyczące udziału w badaniach, które doprowadziły do publikacji prac i w procesach ich powstawania nie pozostawiają wątpliwości co do decydującego lub co najmniej bardzo istotnego wkładu habilitanta.

Osiągnięcie naukowe zatytułowane jest *Przyczynowość w teorii kwantowej i jej uogólnieniach*, co dobrze charakteryzuje zawartość przedstawionych prac. Stanowią one niewątpliwie dobrze pomyślany cykl, w którym analizowane są różne aspekty tytułowej przyczynowości. Problem przyczynowości stał się rzeczywistym problemem z punktu widzenia fizyki w początkach dwudziestego wieku wraz z rozwojem dwóch rewolucyjnych w tamtym czasie teorii fizycznych, to znaczy teorii względności i teorii kwantów. Problemy, które wraz z rozwojem tych teorii pojawiły się, a które bezpośrednio związane są z koncepcją przyczynowości, takie jak np. nieabsolutny charakter uporządkowania czasowego zjawisk, osobliwości przestrzenno-czasowe niepozwalające na nieskończoną kontynuację geodezyjnych, zamknięte krzywe czasowe, probabilistyczny aspekt pomiarów kwantowych, nieklasyczne korelacje kwantowe i ich konsekwencje np. możliwość operacji kwantowych z nieokreślonym kierunkiem czasowym, są zapewne przedsmakiem różnego rodzaju paradoksów i pseudoparadoksów, które pojawiają się w teoriach unifikujących grawitację i mechanikę kwantową.

Jedną z interesujących idei, u podstaw której leżą rozważania dotyczące nieokreśloności w mechanice kwantowej, problemy pomiarów kwantowych oraz rozbieżności pojawiające się, gdy próbujemy dokonać pomiarów w precyzyjnie określonym punkcie czasoprzestrzeni, jest

możliwość, że przy bardzo małych skalach długości struktura czasoprzestrzeni nie jest właściwie opisywana przez rozmaitość różniczkowalną. Sposobem na uniknięcie problemów byłoby nadanie punktom dodatkowej struktury, która uniemożliwiłaby, na przykład, doskonale precyzyjne pomiary. W takim podejściu geometria oparta na zestawie współrzędnych komutujących obowiązywałaby tylko w skalach długości większych niż pewna długość fundamentalna. Poniżej tego rozmiaru współrzędne punktu stawałyby się operatorami niekomutującymi, co wykluczałoby dokładne pomiary położenia. Konkretny matematyczny opis takiego podejścia oferuje geometria nieprzemieniana. Algebrę gładkich funkcji na rozmaitości, w terminach której opisujemy zwykle geometrię różniczkową tejże rozmaitości, a które z punktu widzenia pełnią rolę obserwabli, zastępuje się jakąś algebrą nieprzemienianą w terminach której definiuje się obiekty geometryczne w analogii do geometrii przemiennej. Pociągając hipotezę jest, że takie algebraiczne podejście do geometrii stwarza nadzieję na unifikację grawitacji i mechaniki kwantowej.

W geometrii nieprzemiennej problemy przyczynowości również wymagają szczegółowej analizy. Przede wszystkim, w wypadku nieprzemienianym pojęcie „punktu” traci, w zasadzie, sens. Ponadto, o przyczynowości można mówić tylko, gdy struktura czasoprzestrzeni jest lorentzowska. Tej właśnie problematyce poświęcone są prace [H1-H5] składające się na omawiane osiągnięcie naukowe.

Najważniejsza, stanowiąca podstawę dalszych badań, nie tylko habilitanta opisanych w innych pracach cyklu, ale też kilku innych grup badawczych na świecie, jest praca [H1]. Sformułowano w niej (we wzmiankowanym powyżej algebraicznym języku) pojęcie przyczynowości w geometrii nieprzemiennej. Zaproponowana konstrukcja wykorzystuje sformułowanie geometrii nieprzemienianych w terminach tzw. lorentzowskich trójek spektralnych. Wykazano też, że może ona być traktowana jako uogólnienie „zwykłej” przyczynowości relatywistycznej, gdyż odtwarza ją w wypadku przemienianych trójek spektralnych ma rozmaitościach lorentzowskich, co jest niezbędnym warunkiem jej sensowności. Sama praca jest bardzo ładna pod względem matematycznym, wykorzystuje zaawansowane techniki algebr operatorów i topologii. W pracy [H2] zaprezentowano zastosowanie konstrukcji z pracy [H1] do, bodajże najprostszego, ciekawego nieprzemienianego przypadku, a mianowicie geometrii nieprzemiennej iloczynu dwuwymiarowej płaskiej przestrzeni Minkowskiego i algebry macierzy  $2 \times 2$ . Najważniejszym wynikiem pracy jest podanie warunków zależności przyczynowej między stanami, mającej dalece nietrywialny charakter oraz ich związku z przyczynową zależnością między punktami w „klasycznej” części nieprzemienianej algebry, tzn. owej dwuwymiarowej przestrzeni

Minkowskiego. Praca [H3] również wykorzystuje narzędzia skonstruowane w fundamentalnej pracy [H1], tym razem do ciekawej struktury niekomutatywnej składającej się niejako z dwóch płatów. Istotnym wynikiem pokazanie na konkretnym przykładzie, czym może różnić się klasyczna relatywistyczna przyczynowość od przyczynowości w przestrzeni stanów skonstruowanych w ramach takiej nieprzemiennej geometrii. Praca [H4] prezentuje interesującą interpretację Zitterbewegung w terminach czasoprzestrzeni dwupłatowej takiej jak analizowana w pracy [H3]. W pracy [H5] zawarto podsumowanie wyników prac poprzednio omawianych, ale przede wszystkim, nakreślono ogólne, operacyjne, (tzn. startujące z algebry fizycznych obserwabli), podejście do konstruowania nieprzemiennej czasoprzestrzeni z dobrze określoną strukturą przyczynową jako przestrzeni stanów na gęstej podalgebrze nieprzemiennej  $C^*$ -algebry definiującej odpowiednią lorentzowską trójkę spektralną (tzn. odpowiednią nieprzemienią geometrię). Choć w pracy nie ma nowych w stosunku do prac [H1-H4] elementów teorii, stanowi ona ważną syntezę, ze słusznymi argumentami za takimi rekonstrukcjami czasoprzestrzeni na podstawie faktów fizycznych, które nie podważałyby sensowności pojęcia przyczynowości i nie odbiegałyby zbyt od dobrze pracujących w znacznym obszarze fizyki klasycznych koncepcji czasoprzestrzeni (stąd zwrócenie uwagi na „prawie przemienne” przykłady omówione w pracach [H2-H4]). Zaprezentowane podejście uważam za ważne. Miła mi jest bowiem metodologia fizyki matematycznej, w której „zobowiązania ontologiczne” (przestrzeń fazowa czy konfiguracyjna, przestrzeń Hilberta, czy jakiegokolwiek „przestrzenie stanów fizycznych”) są uwarunkowane epistemologicznie (pomiaru na algebrze obserwabli) i są na takiej „operacyjnej”, czy „epistemologicznej” podstawie konstruowane (np. jako widma Gelfanda, konstrukcje GNS, itd.). Nie twierdzę, że jest to metoda zawsze skuteczna i optymalna, ale zapewnia estetycznie pociągający minimalizm w konstruowaniu „rzeczywistości fizycznej”.

Druga część zaprezentowanego przez dr. Ecksteina osiągnięcia, tzn. prace [H6-H9], pozostając w obszarze zakreślonym przez nadany temu osiągnięciu tytuł, poświęcona jest analizie przyczynowości w teoriach probabilistycznych. W takim ujęciu, związki przyczynowe dotyczą rozkładów prawdopodobieństw zdarzeń a nie samych zdarzeń (choć, oczywiście, zarówno w wypadku klasycznym jak i kwantowym, dane doświadczalne pochodzą z konkretnych pomiarów). Fundamenty tej analizy przedstawione są w pracy [H6]. W pracy tej podano szereg równoważnych sformułowań poprzedzania przyczynowego dla rozkładów prawdopodobieństw zdefiniowanego za pomocą ogólnego schematu wypracowanego w pracy [H1]. Wykazano poprawność podanej definicji, w szczególności, że relacja poprzedzania przyczynowego ustala

częściowy porządek oraz że sprowadza się do zwykłego poprzedzania dla punktów w wypadku, gdy miary są punktowe. Najważniejszym jednak wynikiem jest sformułowanie relacji poprzedzania w terminach transportu miar, dobrze oddające naturalną intuicję, że poprzedzanie przyczynowe dwóch rozkładów zachodzi wtedy, gdy istnieje sposób przetransportowania pierwszego z nich na drugi taki, że każda infinytezymalna część transportowana jest po krzywej przyczynowej. Takie sformułowanie pozwoliło na zdefiniowanie *odległości Lorentza-Wassersteina* między miarami, łączącej koncepcję odległości lorentzowskiej między punktami czasoprzestrzeni (nieznikającej dla punktów połączonych krzywą przyczynową) ze znaną z rachunku prawdopodobieństwa miarą odległości między rozkładami prawdopodobieństwa (a, w zasadzie rodziną takich miar) zwaną odległością Wassersteina (ew. Kantorowicza).

Praca [H6] dotyczy, w swej istocie klasycznych rozkładów prawdopodobieństwa, jednak nic nie stoi na przeszkodzie, aby wypracowane w niej metody zastosować do problemów kwantowych. W pracy [H7] zbadano za pomocą tych metod ewolucję czasową kwantowych paczek falowych. Łatwo zgadnąć, że definicja określa ewolucję miary jako kauzalną, gdy porządek czasowy przenoszony jest na porządek poprzedzania kauzalnego zdefiniowanego uprzednio dla rozkładów prawdopodobieństwa. Ciekawym, choć niezaskakującym wynikiem jest pokazanie, że taka definicja może być przetłumaczona (przynajmniej, jak rozumiem, dla przypadków odpowiednio gładkich) na warunek „hydrodynamiczny”, tzn. ewolucja musi spełniać równanie ciągłości z polem prędkości o module mniejszym od prędkości światła.

Badanie ewolucji paczek falowych przeprowadzono dla równania Diraca i „relatywistycznego równania Schrödingera” (tzn. równania, a którym zależność hamiltonianu od pędu zadana jest wzorem relatywistycznym). Miłym wynikiem jest, że w tym pierwszym wypadku ewolucja jest kauzalna, natomiast w drugim przyczynowość może być naruszona. W tym kontekście przedyskutowano stare wyniki Hegerfelda z lat siedemdziesiątych, osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku dotyczące łamania relatywistycznej kauzalności w ewolucji zlokalizowanych paczek. Jak słusznie zauważono w pracy [H7], przedstawione w niej metody pozwalają na ilościową ocenę łamania przyczynowości w różnych modelach, np. zależności rozkładu początkowego, zakresu parametrów, dla których łamanie takie zachodzi, a w konsekwencji oceny adekwatności danego modelu do opisu rzeczywistych zjawisk.

W pracy [H8] przeprowadzono dyskusję analizowanych w poprzednich pracach aspektów relatywistycznej przyczynowości w kontekście teorii niesygnalizujących (no-signaling). Pojęcie niesygnalizowalności definiowane jest zwykle w terminach korelacji między wynikami pomiarów na dwóch (lub większej liczbie) podukładów układu złożonego. W pracy [H8]

wprowadzono pojęcie „dynamicznej niesygnalizowalności” (dynamical no-signaling). Taka „dynamiczna nielokalizowalność” dotyczy dynamiki fizycznego przekazu informacji między produktami. Złamanie warunku dynamicznej nielokalizowalności stwarza możliwość przekazywania informacji z szybkością nadświetlną. Nierelatywistyczna mechanika kwantowa może łamać dynamiczną nielokalizowalność, a co za tym przyczynowość na poziomie dynamicznym, choć oczywiście, nie łamie jej na poziomie korelacji. Jest to wynik bardzo satysfakcjonujący. Odczuwałem bowiem zawsze pewien dyskomfort, gdy w dyskusjach niesygnalizowalności używano argumentów z natury nierelatywistycznych w problemie, który jest stricte relatywistyczny – przyczynowość staje się istotna tylko wtedy, gdy istnieje ograniczenie na szybkość przekazywania informacji.

W podsumowaniu tego skrótowego opisu zawartości prac składających się na zgłoszone przez dr. Ecksteina osiągnięcie naukowe pragnę stwierdzić, że czytanie ich sprawiło mi dużo satysfakcji. (NB zgodnie z niezrozumiałym dla mnie, acz rozpowszechnionym zwyczajem prace nie są dołączane do dokumentacji wniosku przekazywanej recenzentom. Być może jest to zgodne z przepisami, ale nie wydaje mi się aby racjonalne było oczekiwanie, iż można ocenić dzieło, które nie zostało do oceny przedstawione. Zmusza to recenzenta do samodzielnego poszukiwania poszczególnych prac. W tym wypadku było to nietrudne dzięki odsyłaczom w autoreferacie, ale nie zmienia to mojego poglądu na sprawę). Wszystkie prace (a dotyczy to także samego autoreferatu<sup>1</sup>) są napisane bardzo dobrze. Zachowany jest najwyższy rygor matematyczny i dobrze opisana jest fizyka, której matematyka ta ma służyć. Tak właśnie powinny być relacjonowane badania w obszarze fizyki matematycznej. Z lektury prac wyniosłem wiele nowych informacji, co, jak ma nadzieję, w jasny sposób przekazałem już powyżej. Uważam, że prace te stanowią istotny i solidny wkład do fizyki matematycznej, w szczególności to zagadnień przyczynowości w mechanice kwantowej.

Pan dr Michał Eckstein może się poszczycić również innymi osiągnięciami naukowymi stanowiącym istotny wkład w zakresie fizyki matematycznej. Niewątpliwie, za takie uznać należy cykl prac [O2-O4] o czarnych dziurach, w szczególności rozwiązaniom oraz w zasadzie czysto matematyczne prace poświęcone geometrii spektralnej [O7,O8, O10] i monografia naukowa [O1].

Swoją działalność naukową pan dr Eckstein prowadził w dwóch różnych znakomitych ośrodkach fizyki teoretycznej w Polsce na uniwersytetach w Krakowie i Gdańsku.

---

<sup>1</sup> Drobna uwaga redakcyjna: w przedostatnim wierszu strony 6. powinno być *nieprzemiennej* a nie *przemiennej*

Chciałbym też wspomnieć o sprawach, które zgodnie z obecną interpretacją przepisów prawnych dotyczących habilitacji nie mają zbyt istotnego znaczenia w ocenie osiągnięć habilitanta, jednak moim zdaniem, nie przestają grać roli przy ocenie kandydata na stopień doktora habilitowanego co zwyczajowo łączył się z uznaniem go na samodzielnego pracownika nauki mogącego wyznaczać cele i programy badawcze i kierować grupami naukowymi. Do tego niezbędna jest umiejętność współpracy z młodszymi pracownikami naukowymi i opieka nad nimi. Pan dr Eckstein był promotorem pomocniczym doktoratu współautora jego prac dr. Tomasza Millera. Dużą rolę gra też umiejętność przekazywania wiedzy. Tu na uwagę zasługuje imponująca działalność popularyzatorska habilitanta: ponad dwadzieścia artykułów prasowych, wykłady na kanale YouTube oraz w trakcie wydarzeń popularyzujących naukę.

Stwierdzam, że zarówno przedstawione mi do oceny osiągnięcie naukowe pana dr. Michała Ecksteina zatytułowane *Przyczynowość w teorii kwantowej i jej uogólnieniach*, a także jego cała działalność naukowa spełniają wszelkie wymogi stawiane w postępowaniach habilitacyjnych i zdecydowanie popieram wniosek o nadanie mu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

