

## **Recenzja w związku z postępowaniem habilitacyjnym**

**dr. Michała Ecksteina**

Dr Michał Eckstein ukończył studia i uzyskał stopień magistra na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego 2010 roku. Cztery lata później, na Wydziale Matematyki i Informatyki Uniwersytetu Jagiellońskiego stopień doktora nauk matematycznych. W latach 2014-17 roku dr Michał Eckstein pracował na Uniwersytecie Jagiellońskim, następnie w latach 2017-20 – na Uniwersytecie Gdańskim, by w r. 2020 powrócić na Uniwersytet Jagielloński.

W bazie Web of Science odnajdujemy 26 publikacji dr. M. Ecksteina, które były cytowane 173 razy, zaś baza Inspire-Hep odnotowuje 31 publikacji i 248 cytowań. Są to zupełnie dobre dane bibliograficzne, szczególnie biorąc pod uwagę fakt, że prace dr. M. Ecksteina odnoszą się w większości do zazwyczaj nisko cytowanych badań z dziedziny fizyki matematycznej.

### **Recenzja osiągnięcia naukowego**

Osiągnięcie naukowe dr. M. Ecksteina pt. „Przyczynowość w teorii kwantowej i jej uogólnienia”, będące przedmiotem niniejszej recenzji, składa się z cyklu 9 powiązanych tematycznie artykułów naukowych. Zostały one opublikowane w czołowych periodykach z dziedziny fizyki teoretycznej, Physical Review seria A i D, Classical and Quantum Gravity, Journal of Geometry and Physics, jak również w Sigma, Universe i Annales Henri Poincaré. W materiałach dołączonych do wniosku habilitacyjnego znaleźć można oświadczenia współautorów tych publikacji, potwierdzających znaczący wkład dr. M. Ecksteina w ich powstanie.

Pierwszym artykułem naukowym wchodzącym w skład osiągnięcia naukowego jest pochodząca z 2013 r. publikacja H1: [An algebraic formulation of causality for noncommutative geometry](#), napisana wspólnie z N. Franco i opublikowana w Classical and Quantum Gravity. Jest ona poświęcona

algebraicznemu sformułowaniu pojęcia przyczynowości w kontekście geometrii nieprzemiennej. W pracy tej dowodzi się, że jeśli trójka spektralna – fundamentalne pojęcie teorii Connesa – jest zbudowana na przestrzeni hiperbolicznej, to struktura przyczynowa jest odzyskiwana w teorii nieprzemiennej. Umożliwia to rozszerzenie pojęcia przyczynowości na przestrzenie nieprzemienne.

Bardziej szczegółowemu badaniu struktur zdefiniowanych w artykule H1 poświęcona jest pochodząca z 2014 r. praca H2: [Exploring the causal structures of almost commutative geometries](#), opublikowana w internetowym periodyku Sigma, również napisana wspólnie N. Franco. W publikacji tej przeanalizowano konkretny, prosty model dwuwymiarowej przestrzeni nieprzemiennej i skonstruowano oraz przebadano powstałą w jego ramach strukturę przyczynową.

Kolejnym krokiem w badaniu struktur przyczynowych na przestrzeniach nieprzemiennych jest praca H3: [Causality in noncommutative two-sheeted spacetimes](#), również napisana we współpracy z N. Franco i opublikowana w 2015 r. w Journal of Geometry and Physics. W pracy tej między innymi rozszerzono model omawiany w publikacji H2 na przypadek czterowymiarowej czasoprzestrzeni.

Kolejna publikacja wchodząca w skład osiągnięcia naukowego dr. M. Ecksteina H4: [Noncommutative geometry of Zitterbewegung](#), napisana została wspólnie z N. Franco i T. Millerem i opublikowana w 2017 r. w Physical Review D. Poświęcona jest ona zjawisku *Zitterbewegung* w przypadku elektronu poruszającego się w nieprzemiennej czasoprzestrzeni opisanej w poprzednich pracach. Autorzy konkludują, że efekt *Zitterbewegung* pojawia się w klasycznej teorii elektronu w nieprzemiennej czasoprzestrzeni i ma charakter geometryczny. Niestety stwierdzenie to nie staje się punktem wyjścia do pogłębionej fizycznej analizy tego zjawiska ani – wbrew zapowiedzi w streszczeniu – opisu sytuacji doświadczalnej, w której efekt ten można by zmierzyć, albo przynajmniej przekonać się, jakie ograniczenia narzucane są przez dotychczasowe pomiary.

Wyniki zamieszczone w powyższych czterech publikacjach zostały krótko podsumowane w samodzielnie napisanym artykule przeglądowym H5: [The Geometry of Noncommutative Spacetimes](#), opublikowanym w 2017 r. w periodyku Universe. W pracy tej wspomniano też krótko o możliwym uogólnieniu kwantowej teorii pola na przypadek nieprzemiennych czasoprzestrzeni.



Te pięć artykułów tworzy pewną całość. Poświęcone są one rozszerzeniu pojęcia przyczynowości na przypadek przestrzeni nieprzemiennych i zaprezentowano w nich szczegółową analizę konkretnego prostego modelu. Prace te stanowią niewątpliwie interesujący wkład do teorii Lorentzowskich przestrzeni nieprzemiennych, jednak ich znaczenie fizyczne nie jest do końca jasne. Wspomnieć jednak w tym miejscu trzeba bardzo interesującą dyskusję wyników pracy H4 w opisie osiągnięcia naukowego, rzucającą światło na znaczenie fizyczne efektu *Zitterbewegung* w badanych teoriach nieprzemiennych. Jest jednak oczywiste, że zastosowania fizyczne nie należą do głównego kręgu zainteresowań habilitanta. Nawet biorąc pod uwagę, że prezentowane osiągnięcie naukowe odnosi się do fizyki matematycznej, brak odniesienia do fizyki w tej części stanowi jednak jego pewną słabość.

Pozostałe cztery prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego poświęcone są badaniu pojęcia przyczynowości w teoriach probabilistycznych.

W pracy H6: [Causality for nonlocal phenomena](#), napisanej wspólnie z T. Millerem i opublikowanej w 2017 r. w *Annales Henri Poincaré*, sformalizowano pojęcie struktury przyczynowej dla miar Borela sugerując, że jest ono bardzo ogólne i fizycznie naturalne. Jak udowodniono w tej pracy, owa struktura przyczynowa jest równoważna warunkowi, że prawdopodobieństwo jest zlokalizowane w stożku przyszłości zbioru zwartego. Nie jest dla mnie zupełnie jasne, jakie są konsekwencje fizyczne tak zdefiniowanej struktury przyczynowej. W pracy H6 pokazano też interesujący związek przyczynowych miar Borelowskich z teorią optymalnego transportu.

Rozważania pracy H6 kontynuowane były przez M. Ecksteina we współpracy z T. Millerem w pracy H7: [Causal evolution of wave packets](#) opublikowanej w *Physical Review A* w 2017 r. W pierwszej części tej pracy autorzy przywołują wyniki uzyskane w publikacji H6, aby następnie wprowadzić pojęcie przyczynowej ewolucji miar i powiązać je z równaniem ciągłości. W kolejnym kroku autorzy pokazują, że definicja przyczynowej ewolucji może być wykorzystana jako narzędzie pozwalające na badanie czy model dynamiki prawdopodobieństwa jest zgodny ze strukturą przyczynową czasoprzestrzeni. Można za jej pomocą nie tylko ustalić złamanie przyczynowości, ale także je skwantyfikować. Następnie formalizm ten zastosowany został do badania ewolucji paczek falowych przy

ewolucji zadanej równaniem Diraca oraz równaniem Schroedingera z relatywistycznym hamiltonianem. W moim przekonaniu jest to bardzo interesująca praca, pokazująca między innymi ograniczenia quasi-relatywistycznych modeli, takich jak równanie Schroedingera z relatywistycznym hamiltonianem.

Zagadnienie przyczynowości w teorii kwantowej podjęte jest w kolejnej pracy H8: [Operational causality in spacetime](#), napisanej wspólnie z P. Horodeckim, T. Millerem i R. Horodeckim, opublikowanej w Physical Review A, w 2020 r. Jej punktem wyjścia jest zasada „no-signalling”, określająca wyniki pomiarów dwóch obserwatorów rozdzielonych interwałem przestrzennym. Zbadano w niej czy definicja przyczynowości, podana w pracy H7 w języku miar probabilistycznych wyklucza przekazywanie sygnałów z prędkościami nadświatłymi. Sformułowano też warunek dynamicznego „no-signallingu”, określający ograniczenia, jakim podlegać musi dynamiczny (fizyczny) nośnik informacji. Pokazano, że złamanie owego dynamicznego protokołu zawsze prowadzi do nadświatłowego przekazu informacji. Podobnie jak w przypadku pracy H7 i tym razem znaleziono przykłady układów z nadświatłą transmisją informacji. W przypadku Hamiltonianów nie-relatywistycznych nie wydaje się to być wielkim zaskoczeniem, a w przypadku Hamiltonianów relatywistycznych, fizyczne efekty „nadświatłości” ograniczone są do obszarów wielkości rzędu długości fali Comptona, w których mechanika kwantowa i tak zastąpiona być musi kwantową teorią pola.

Rozważania z pracy H8 uogólnione zostały na przypadek wielu cząstek w pracy H9: [Generally covariant N-particle dynamics](#) napisanej przez tę samą grupę autorów, opublikowaną w Journal of Geometry and Physics w 2021 r. W pracy tej wprowadzono formalizm matematyczny umożliwiający opis ewolucji czasowej N-cząstkowego układu relatywistycznego. Za jego pomocą zdefiniowano odpowiednie miary N-cząstkowe. Ta formalna konstrukcja jest pierwszym krokiem do rozszerzenia zasady „no-signallingu” na przypadek wielocząstkowy.

Podsumowując. Opisane powyżej publikacje dr. M. Ecksteina odpowiadają kolejnym krokom dobrze zdefiniowanego programu badawczego, którego celem jest sformułowanie formalizmu umożliwiającego precyzyjne zdefiniowanie pojęcia przyczynowości w mechanice kwantowej. Zaprezentowane osiągnięcie naukowe spełnia więc ustawowy wymóg jednotematyczności zgłoszonych publikacji.



Bardzo wysoko oceniam poziom merytoryczny osiągnięcia naukowego dr. M. Ecksteina. Moim zdaniem wchodzące w jego skład prace naukowe stanowią interesujący wkład w badanie formalnych struktur leżących u podstaw relatywistycznej mechaniki kwantowej.

***W moim przekonaniu zaprezentowane osiągnięcie naukowe oraz dorobek naukowy dr. Michała Ecksteina spełniają ustawowe i zwyczajowe wymagania stawianych habilitantom w dziedzinie fizyki teoretycznej. Wniosuję o przejście do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.***

Warszawa, 10 sierpnia 2023



Prof. dr hab. Jerzy Kowalski-Glikman

Instytut Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Wrocławskiego  
i Narodowe Centrum Badań Jądrowych