

Warszawa, 19 listopada 2021

prof. dr hab. Piotr Sułkowski  
Instytut Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki  
Uniwersytet Warszawski  
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR. THOMASA E. WILLIAMSA  
„BEYOND THE STANDARD MODEL WITH NONCOMMUTATIVE GEOMETRY”**

Rozprawa doktorska „Beyond the Standard model with Noncommutative Geometry”, napisana przez Thomasa E. Williamsa pod opieką dra hab. Leszka Hadasza, została złożona na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w lipcu 2021 r. Rozprawa napisana jest w języku angielskim.

Zgodnie z tytułem, rozprawa poświęcona jest rozszerzeniom Modelu Standardowego, które można sformułować w formalizmie niekomutatywnej geometrii. Badania przedstawione w rozprawie należą do ambitnego kierunku badawczego zainicjowanego przez Alaina Connesa i jego współpracowników, łączącego niekomutatywną geometrię z teorią cząstek elementarnych. Rozprawa liczy 75 stron i składa się z 4 rozdziałów, 4 dodatków oraz bibliografii. Wyniki rozprawy zostały przedstawione także w 3 publikacjach: jedna z nich [31], której współautorami są A. Bochniak i P. Zalecki, została opublikowana w czasopiśmie JHEP; druga [32], której współautorami są D. Ciurla i opiekun doktoranta L. Hadasz, dostępna jest w tym momencie tylko w serwisie arXiv; trzecia [33], której Thomas Williams jest jedynym autorem, opublikowana została w piśmie J. Phys. A: Math. Theor. Warto podkreślić, iż wspomniane wyżej JHEP oraz J. Phys. A: Math. Theor. to uznane i cieszące się dobrą opinią czasopisma naukowe.

Rozdział pierwszy rozprawy, zatytułowany „Introduction”, zawiera bardzo zwięzłe podsumowanie formalizmu niekomutatywnej geometrii (dwie strony), krótki opis Modelu Standardowego oraz jego uogólnienia określanego jako model Patiego-Salama (jedna strona), krótki opis supersymetrii (mniej niż strona), oraz zwięzłe podsumowanie wyników przedstawionych w kolejnych rozdziałach.

W rozdziale drugim przedstawiona jest analiza skończonej trójki spektralnej dla teorii Patiego-Salama. Z analizy tej wynika, iż w ogólności nie jest możliwe skonstruowanie takiego modelu dla niezredukowanej algebry, który byłoby rozszerzeniem i w odpowiedniej granicy zredukował się do oryginalnego Modelu Standardowego. Natomiast modele takie istnieją i mogą być fizycznie interesujące – jako rozszerzenia Modelu Standardowego – dla algebry zredukowanej, w których pełna grupa cechowania  $SU(2) \times SU(2) \times SU(4)$  złamana jest do grupy  $SU(2) \times SU(2) \times U(1) \times U(3)$ . Ponadto, takie zredukowane modele uogólniają i wskazują na potencjalną zasadność innej klasy rozszerzeń Modelu Standardowego, tzw. modeli lewo-prawo symetrycznych (Left-Right Symmetric models), w których grupa cechowania przyjmuje postać  $SU(2) \times SU(2) \times SU(3) \times U(1)$ , i których związki z niekomutatywną geometrią były niezależnie

badane. Wyniki przedstawione w tym rozdziale są także opublikowane we wspomnianym wyżej artykule [31].

Rozdział trzeci motywowany jest związkami geometrii nieprzemiennej i supersymetrii. Związki takie mogłyby być istotne m.in. w kontekście supersymetrycznych rozszerzeń Modelu Standardowego. Z tego punktu widzenia istnienie supersymetrii związane jest z istnieniem „pierwiastka” z operatora Diraca, tzn. istnieniem odpowiednio rozumianej faktoryzacji tego operatora. Przykład takiej faktoryzacji omówiony jest w rozdziale trzecim, dla uproszczenia w czterowymiarowej przestrzeni euklidesowej, oraz w przypadku prawie przemienym („almost commutative”). Wyniki te przedstawione są także we wspomnianej wcześniej publikacji [32].

Rozdział czwarty rozprawy poświęcony jest związkom supersymetrii sformułowanej w formalizmie superprzestrzeni z nieprzemienią geometrią. Autor najpierw zwięźle omawia pewne dwa podejścia do tego zagadnienia przedstawione wcześniej w literaturze [50,54], a następnie przedstawia własny przykład oparty na superprzestrzeni  $R^{3|2}$ . Przykład ten jest także przedstawiony we wspomnianej wcześniej publikacji [33]. Autor postuluje, iż zaproponowana przez niego metoda połączenia formalizmu superprzestrzeni oraz niekomutatywnej geometrii powinna mieć zastosowanie także w bardziej skomplikowanych przykładach.

Należy docenić podjęcie przez autora rozprawy ambitnej i interesującej tematyki, jak też otrzymanie nowych wyników, opublikowanych niezależnie w uznanych czasopismach naukowych. Warto docenić fakt, iż tematyka rozprawy łączy dwa na pozór odrębne kierunki badań – niekomutatywną geometrię oraz fizykę cząstek elementarnych. Natomiast mam jedną istotną uwagę krytyczną, dotyczącą wprowadzenia i omówienia tych dwóch kierunków badań w rozprawie (w szczególności w rozdziale „Introduction”) – w mojej opinii jest ono zbyt zwięźłe i skrótowe. Rozważania przedstawione w rozprawie są zapewne najbardziej interesujące dla badaczy zajmujących się niekomutatywną geometrią, natomiast, o ile nie zajmowali się oni wcześniej związkami z Modelem Standardowym, mogą oni nie być w stanie docenić fenomenologicznego znaczenia przedstawionych wyników. Z kolei fizycy cząstek elementarnych, nawet jeśli rozumieją przedstawione konkluzje, mogą mieć trudności w zrozumieniu ich wyprowadzenia. Rozprawa zyskałaby na czytelności, gdyby zawierała obszerniejszy wstęp, a także gdyby autor w szerszym stopniu przestawił wyniki innych prac, na które się powołuje (np. [13] w rozdziale drugim). Niemniej jednak, zastrzeżenia te dotyczą w pewnym stopniu samej formy rozprawy, natomiast nie wpływają na pozytywną ocenę jej merytorycznej zawartości i przedstawionych wyników.

Podsumowując, stwierdzam, iż przedłożona rozprawa doktorska spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Thomasa E. Williamsa do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Piotr Suthowski