

Kraków, 12.09.2022

## **Recenzja osiągnięcia naukowego oraz dorobku dr Marka Lewickiego w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego**

Dr Marek Lewicki uzyskał stopień doktora nauk fizycznych w 2016 roku, na podstawie pracy doktorskiej pt. "Aspekty łamania symetrii elektroslabej w świetle nowych danych LHC". Opiekunem pracy był prof. Zygmunt Lalak. Stopień został przyznany przez Uniwersytet Warszawski. W 2012 roku, również na Uniwersytecie Warszawskim, habilitant ukończył studia magisterskie, uzyskując tytuł magistra Fizyki.

Po ukończeniu studiów doktoranckich, dr Lewicki rozpoczął roczny staż podoktorski na University of Adelaide. Następnie, w latach 2017-2020, habilitant odbył staż podoktorski na King's College London. Dzięki otrzymanemu grantowi NAWA Polskie Powroty, w 2020 rozpoczął pracę na Uniwersytecie Warszawskim jako adiunkt badawczy, którą kontynuuje do chwili obecnej.

## **Recenzja osiągnięcia naukowego**

Tematyka osiągnięcia habilitacyjnego dotyczy bardzo interesującego i aktualnego zagadnienia generacji fal grawitacyjnych w wyniku zajścia przejść fazowych pierwszego rzędu we wczesnym wszechświecie. Przejścia takie mogą zachodzić w ramach pól oddziaływań, w wyniku ekspansji kosmologicznej i związanego z tym obniżania temperatury. W konsekwencji ewolucji termicznej, dotychczasowy stan podstawowy pola przestaje być stanem stabilnym. To zaś prowadzi do przejścia do nowego stanu (prawdziwej) próżni, w procesie nukleacji nowej fazy. Nowa faza wyłania się w postaci bąbli (pęcherzyków), których promień rośnie w czasie. Jest to proces przypominający gotowanie lub zamarzanie wody. W odróżnieniu od klasycznych przejść fazowych pierwszego rzędu, kosmologiczne przejścia fazowe pól oddziaływań rozpatruje się jednak jako proces zachodzący na skutek procesu tunełowania kwantowego, a nie fluktuacji termicznych.

Emisja fal grawitacyjnych wymaga zaistnienia przyspieszonej zmiany momentu kwadrupolowego rozkładu materii. Z uwagi na symetrię sferyczną, warunek ten nie jest spełniony w trakcie rozszerzania się bąbli. Niezerowa zmiana momentu kwadrupolowego może jednak zostać wytworzony w trakcie zderzeń pęczniejących bąbli nowej fazy oraz w wyniku zajścia procesów turbulentnych oraz rozchodzenia się fal dźwiękowych w plazmie. Do osiągnięcia wysokiej efektywności tego pierwszego procesu niezbędne jest zmagazynowanie odpowiednio dużej ilości energii w pęcherzykach, bez przekazania jej plazmie, w wyniku tarcia. Wymaga to odpowiednio niskiej gęstości plazmy, co może być osiągnięte w poprzez przechłodzenie przejścia fazowego. Tego typu scenariusz jest jednym z głównych dyskutowanych w osiągnięciu habilitacyjnym dr Lewickiego.

Warto w tym miejscu również zaznaczyć, że przejścia fazowe pierwszego rodzaju nie są obecne w Modelu Standardowym (MS) fizyki cząstek elementarnych. Ich obecność przewidywana jest jednakże w ramach rozszerzeń Modelu Standardowego, których przykłady można znaleźć w przedstawionym osiągnięciu habilitacyjnym. Omawiane możliwe rozszerzenia MS manifestują się przy energiach niedostępnych dla współczesnych eksperymentów akceleratorowych, ale i dla tych których powstanie możemy sobie wyobrazić w przeciągu najbliższych dekad. Dlatego też badane przez habilitanta okno obserwacyjne, wykorzystujące fale grawitacyjne, może dostarczyć unikalnej sposobności testowania hipotez dotyczących rozszerzeń Modelu Standardowego.

W skład osiągnięcia naukowego dr Marka Lewickiego wchodzi 7 oryginalnych prac naukowych, opublikowanych w następujących czasopismach: Europhysics Journal C [IF = 4.991] (2 artykuły), Journal of Cosmology and Astroparticle Physics [IF = 7.280] (4 artykuły) oraz Physics of the Dark Universe [IF = 5.09] (1 artykuł).

Artykuł [H1], powstał we współpracy habilitanta z Ville Vaskonenem i ukazał się w czasopiśmie Europhysics Journal C. Na podstawie Google Scholar artykuł był cytowany 37 razy a na podstawie bazy INSPIRE HEP liczba cytowań wynosi: 35. W publikacji, analizowana jest produkcja fal grawitacyjnych w przejściach fazowych dla pola cechowania z grupą  $U(1)$ , sprzęgniętego minimalnie z zespolonym polem skalarnym. Uwzględnienie poprawki jednoczącej prowadzi do efektywnej postaci potencjału pola skalarnego, które dopuszcza zajście przejścia fazowego pierwszego rzędu z przechłodzeniem. Przeprowadzone rozważania opierają się na przypadku zderzenia dwóch ekspandujących bąbli nowej fazy, analizowanego za pomocą symulacji numerycznych. Otrzymane z symulacji wyniki zostały następnie użyte dla symulacji wielu bąbli, w przybliżeniu cienkiej ściany. Jak pokazano, otrzymane widmo fal grawitacyjnych spełnia skalowanie  $\propto \omega^{2.3}$  dla małych częstości oraz  $\propto \omega^{-2.9}$  dla dużych częstości. Systematyczne wyprowadzenie tych widm to wątpliwie ważny wynik habilitanta.

Artykuł [H2] rozszerza analizę przeprowadzoną w poprzednim artykule dla przypadku przejść fazowych w modelu rozszerzenia MS z symetrią konforemą  $U(1)_{B-L}$ . Artykuł ten powstał we współpracy z Johnem Ellisem oraz Ville Vaskonenem i został opublikowany w bardzo dobrym (choć niedocenionym przez polską punktację czasopism) czasopiśmie Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. Na podstawie Google Scholar artykuł był cytowany 54 razy a na podstawie bazy INSPIRE HEP liczba cytowań wynosi: 53. W artykule tym autorzy pogłębiają analizę procesu produkcji fal grawitacyjnych w procesie zdarzeń bąbli nowej fazy. Szczególnie istotna jest rewizja dotychczas czynionych w literaturze założeń dotyczących dotyczących wpływu siły tarcia na ekspansję bąbli nowej fazy. Autorzy wykazują, że rozważane przejście fazowe prowadzi do silnego sygnału fal grawitacyjnych. Sygnał ten, dla szerokiego zakresu parametrów, leży w oknie obserwacyjnych planowanych eksperymentów fal grawitacyjnych, takich jak LIGO i AION/MAGIS. Ciekawą obserwacją poczynioną w artykule, jest również możliwość występowania efektywnej (z punktu widzenia dynamiki kosmologicznej) fazy dominacji materii, w następstwie zajścia przejścia fazowego, co jest

związane ze oscylacjami pola względem minimum potencjału.

Artykuł [H3] jest publikacją dwuautorską, która ukazała się w czasopiśmie *Europhysics Journal C*. Na podstawie Google Scholar artykuł był cytowany 44 razy a na podstawie bazy INSPIRE HEP liczba cytowań wynosi: 42. Zastosowana w tym artykule metodologia jest bardzo zbliżona do tej z artykułu [1]. W publikacji, analizowana jest produkcja fal grawitacyjnych w przejściach fazowych dla zespolonego pola skalarnego z potencjałem o symetrii  $U(1)$ . Przeprowadzone rozważania opierają się na przypadku zderzenia dwóch ekspandujących bąbli nowej fazy, analizowanego za pomocą symulacji numerycznych. Otrzymane z symulacji wyniki zostały następnie użyte dla symulacji wielu bąbli, w przybliżeniu cienkiej ściany. Jak pokazano, otrzymane widmo fal grawitacyjnych spełnia skalowanie  $\propto \omega$  dla małych częstości oraz  $\propto \omega^{-2}$  dla dużych częstości. Co ciekawe, wynik dla małych częstości, różni się od przypadku dla rzeczywistego pola skalarnego, dla którego odpowiednie skalowanie ma postać  $\propto \omega^3$ . Szkoda, że publikacja nie zawiera pogłębionej analizy tego wyniku, dostarczając jego teoretycznego zrozumienia.

W artykule [H4], uwaga kierowana jest na proces generowania fal grawitacyjnych w wyniki rozchodzenia się fal dźwiękowych oraz turbulencji, związanych z zajściem przemiany fazowej pierwszego rzędu. Artykuł powstał we współpracy habilitanta z Johnem Ellisem oraz Jose Miquelem No. Na podstawie Google Scholar artykuł był cytowany 82 razy a na podstawie bazy INSPIRE HEP liczba cytowań wynosi: 90. W pracy analizowane są przypadki zarówno potencjałów wielomianowych jak i typu Colemana-Weinberga, dla pola skalarnego (w obydwu przypadkach, zostały uwzględnione efekty termiczne). Taki dobór potencjałów pozwolił na zidentyfikowanie możliwych scenariuszy przejść fazowych i odpowiadających nim procesów generacji fal grawitacyjnych. W szczególności, pokazano, że dla potencjałów dla których bariera potencjału jest generowana termicznie, nie jest możliwe osiągnięcie znacznego przechłodzenia przemiany. W konsekwencji, w takim scenariuszu, nie jest dopuszczone zgromadzenie w ścianach bąbli wystarczająco dużej energii do otrzymania silnego sygnału grawitacyjnego z procesu zderzeń bąbli. Do tego by ten proces był efektywny, pole musi posiadać barierę potencjału w granicy zerowej temperatury, co jest spełnione dla rozważanego przypadku potencjałów wielomianowych. Wyniki te w sposób bardzo wyraźny rozjaśniają zrozumienie związku pomiędzy strukturą potencjału pola skalarnego a typem procesu, który będzie dominować w produkcji fal grawitacyjnych.

Artykuł [H5], jest trzecim z serii artykułów powstałych we współpracy z Ville Vaskonem. Artykuł został opublikowany w czasopiśmie *Physics of the Dark Universe*. Na podstawie Google Scholar artykuł był cytowany 30 razy a na podstawie bazy INSPIREHEP liczba cytowań wynosi: 35. Artykuł dyskutuje przypadek przejść fazowych pierwszego rodzaju dla przypadku rzeczywistego pola skalarnego z potencjałem będącym wielomianem czwartego stopnia. W artykule zastosowano metodologię analogiczną do tej z pracy [H1] i [H3]. Zbadano mianowicie, z pomocą symulacji numerycznych, kolizje bąbli i stowarzyszoną z tym produkcję fal grawitacyjnych. Dodatkowo, wykorzystana została symetria cylindryczna pro-

blemu. Rozważono przypadki z fazą o symetrii  $O(4)$  i  $O(3)$ . Jak pokazano, otrzymane widmo fal grawitacyjnych spełnia skalowanie  $\propto \omega^3$  dla małych częstości oraz  $\propto \omega^{-1/2}$  dla dużych częstości. Wyniki te, łącznie z tymi otrzymanymi w artykułach [H1] i [H3], jasno pokazują, że potencjalne przyszłe obserwacje widm fal grawitacyjnych z przemian fazowych mogą, poprzez analizę ich nachyleń, powiedzieć nam sporo o naturze stojących za nimi procesów fizycznych. O ile mi wiadomo, przed pojawieniem się prac habilitanta, kwestia ta pozostawała niejasna.

Artykuł [H6], powstał we współpracy z Johnem Ellisem, Jose Miquelem No oraz Ville Vaskonenem. Artykuł został opublikowany w czasopiśmie *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. Na podstawie Google Scholar artykuł był cytowany 157 razy a na podstawie bazy INSPIRE HEP liczba cytowań wynosi: 159. W artykule rozpatrzono przypadek Modelu Standardowego z nierenormalizowalnym wkładem do potencjału pola Higgosa w postaci  $|H|^6$ , oraz dyskutowany wcześniej w artykule [H2] przypadek z rozszerzeniem  $U(1)_{B-L}$ . Oba te potencjały pozwalają na otrzymanie silnie przechłodzonej przemiany fazowej, jednakże, tylko przypadek z członem logarytmicznym umożliwia generowanie silnego sygnału fal grawitacyjnych ze zderzeń bąbli. Nowością, względem wcześniejszych wyników, jest przeprowadzona analiza energii zmagazynowanej w bąblach nowej fazy. Wyniki tych rozważań są zastosowane do znanych wyrażeń na widma fal grawitacyjnych z przejść fazowych pierwszego rodzaju. Ważnym wnioskiem płynącym z pracy jest to, że silny sygnał grawitacyjny ze zderzeń bąbli jest możliwy do otrzymania w istotnej części parametrów modelu z potencjałem logarytmicznym.

Artykuł [H7] jest kolejnym rezultatem współpracy habilitanta z Johnem Ellisem oraz Jose Miquelem No. Artykuł został opublikowany w czasopiśmie *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. Na podstawie Google Scholar artykuł był cytowany 184 razy a na podstawie bazy INSPIRE HEP liczba cytowań wynosi: 192. W pierwszej części, artykuł dyskutuje dynamikę przejścia fazowego pierwszego rodzaju i związany z nim proces nukleacji bąbli. W artykule wykazano, że przechłodzenie przejścia fazowego niekoniecznie musi wzmacniać sygnał fal grawitacyjnych. Pokazano, że w przypadku bardzo silnego przechłodzenia, przejście fazowe może nie przebiec w sposób kompletny, ograniczając moc sygnału fal grawitacyjnych. Wynika, to z faktu, iż energia fałszywej próżni generuje wykładniczą ekspansję kosmologiczną, co w rezultacie powoduje, że we współrzędnych konforemnych, rozmiary bąbli osiągają skończone rozmiary. To zaś zarówno nie pozwala im zgromadzić wystarczającej energii, jak i ogranicza zderzenia bąbli. W kolejnej części, rozważany jest przypadek Modelu Standardowego z nierenormalizowalnym wkładem do potencjału pola Higgosa w postaci  $|H|^6$ , który pozwala na istnienie niezerowej bariery potencjału w granicy zerowej temperatury. Wkład ten, prowadzi do otrzymanie przejścia fazowego pierwszego rodzaju w teorii oddziaływań elektroślabych. Otrzymane wyniki w sposób bardzo wyraźny pokazują znaczenie sprzeczności zwrotnego, poprzez ewolucję kosmologiczną, na dynamikę przejścia fazowego. W mojej ocenie, jest to szczególnie ważna pozycja w dorobku habilitanta.

Reasumując, przedstawione wyniki naukowe, stanowią spójny ciąg badań nad generacją

fal grawitacyjnych w wyniku zajścia kosmologicznych przejść fazowych pierwszego rodzaju. Warte szczególnej uwagi jest to, że dr Lewicki dokonuje nowych przewidywań empirycznych i konfrontuje je z możliwościami detekcyjnymi planowanych przyszłych obserwatoriów fal grawitacyjnych. Dla rozważanych przez habilitanta przypadków przejść fazowych, wykazano istnienie zakresów parametrów dla których, przewidywany sygnał leży w oknie detekcyjnym tych obserwatoriów. Istnieje zatem realna szansa na skonfrontowanie poczynionych przez habilitanta przewidywań z przyszłymi obserwacjami. Z jednej strony, detekcja sygnału fal grawitacyjnych powstałych w procesach kosmologicznych we wczesnym wszechświecie byłaby przełomowym odkryciem. Z drugiej strony należy mieć jednak na uwadze fakt, że poczynione przewidywania oparte są na szeregu założeń co do przejść fazowych, które wykraczają poza Model Standardowy. Nawet ostateczny brak detekcji sygnału z kolizji bąbli, pozwoli jednak lepiej zrozumieć procesy fizyczne na skalach energii, wykraczających poza możliwości naziemnych eksperymentów akceleratorowych.

Należy ponadto podkreślić, że silny sygnał fal grawitacyjnych z kolizji bąbli ma potencjalny wpływ na polaryzację mikrofalowego promieniowania tła (CMB). Nawet jeśli przewidywany sygnał leży w innym, niż dostępny w ramach obserwacji CMB, zakresie częstości, należałoby tę kwestię zasygnalizować lub przeanalizować. W przedstawionym dorobku habilitacyjnym zabrakło jednak dyskusji tej kwestii.

### **Inne osiągnięcia naukowe i organizacyjne**

Oprócz artykułów wchodzących w skład osiągnięcia habilitacyjnego, dr Lewicki jest współautorem trzydziestu trzech artykułów naukowych, opublikowanych w renomowanych czasopismach fizycznych i kosmologicznych. Artykuły te poruszają szerokie spektrum zagadnień z dziedziny kosmologii teoretycznej, takie jak: wytwarzanie fal grawitacyjnych ze strun kosmicznych, modele kosmicznej inflacji, kosmologiczna generacja wielkoskalowego pola magnetycznego i inne.

Aktualna liczba wszystkich publikacji habilitanta, wliczając preprinty wynosi 59 (na podstawie bazy INSPIRE HEP). Łączna liczba cytowań tych publikacji wynosi 2123, na podstawie bazy INSPIRE HEP i 2231 na podstawie bazy Google Scholar. Są to wyniki znakomite, jak na obecny etap kariery habilitanta i stosunkowo krótki czas jaki upłynął od publikacji artykułów. Świadczy to o dużym zainteresowaniu środowiska naukowego wynikami habilitanta. Na uwagę zasługuje również fakt, że osiem z tych publikacji zostało cytowanych już ponad stukrotnie. Potwierdza to aktualność podejmowanych zagadnień i wysoki poziom naukowy prac habilitanta.

Habilitant z powodzeniem pozyskuje środki na prowadzone przez Niego badania naukowe. Należy tu przywołać takie granty jak: NAWA Polskie Powroty 20202, SONATA, Iuventus Plus, ETIUDA i PRELUDIUM. Za swoją wyróżniającą się pracę naukową, habilitant został również wyróżniony Stypendium ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wybitne

osiągnięcia.

Dr Lewicki regularnie prezentuje swoje wyniki na międzynarodowych konferencjach oraz na seminariach naukowych. Habilitant udziela się, ponadto, na rzecz środowiska naukowego poprzez recenzowanie artykułów we wiodących czasopismach branżowych. Bardzo ważne jest również zaangażowanie w ramach konsorcjów przygotowujących przyszłe eksperymenty fal grawitacyjnych, takie jak AION, AEDGE i LISA. Dr Lewicki brał również udział w organizowaniu wirtualnej międzynarodowej konferencji naukowej, jako członek komitetu organizacyjnego.

Habilitant wykazuje dużą aktywność w realizowaniu projektów naukowych we współpracy międzynarodowej. W ramach prowadzonego przez Niego grantu NAWA Polskie Powroty, tworzy On obecnie swój zespół naukowy. Z całą pewnością można stwierdzić, że kontynuuje On swoją pracę naukową a jego naukowa kariera rozwija się bardzo dobrze.

Do słabszych stron przedstawionego dorobku można zaliczyć: brak samodzielnej publikacji naukowej, brak aktywności popularyzacyjnej oraz mała aktywność w ramach sprawowania opieki nad studentami (1 magister). Biorąc jednakże pod uwagę stosunkowo krótki czas jaki upłynął od obrony doktoratu (2016 rok) przez habilitanta oraz pobyty na stażach zagranicznych, można liczyć na to, że braki te zostaną zniwelowane w najbliższym czasie.

## Podsumowanie

Podsumowując, przedstawione osiągnięcia naukowe dr Lewickiego prezentuje bardzo wysoki poziom naukowy. Znaczący wkład dr Lewickiego w przedstawione osiągnięcia naukowe potwierdza samodzielność naukową habilitanta. Zdecydowanie silną stroną dr Lewickiego jest umiejętność prowadzenia umiędzynarodowionych projektów naukowych, dotyczących aktualnie ważnych zagadnień naukowych w obszarze kosmologii teoretycznej. Otrzymane przez habilitanta wyniki cieszą się bardzo dobrym odbiorem przez międzynarodowe środowisko kosmologów teoretycznych. Na wyraźne podkreślenie zasługuje również zaangażowanie organizacyjne i merytoryczne dr Lewickiego na rzecz powstania przyszłych eksperymentów fal grawitacyjnych.

W mojej ocenie, doktor Marek Lewicki spełnia ustawowe i zwyczajowe warunki stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk fizycznych. Wnoszę o przejście do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

Z poważaniem,



dr hab. Jakub Mielczarek  
Instytut Fizyki Teoretycznej  
Uniwersytet Jagielloński