



prof. dr hab. Mariusz P. Dąbrowski
Szczecińska Grupa Kosmologiczna
Instytut Fizyki, Wydział Matematyczno-Fizyczny,
Uniwersytet Szczeciński

ul. Wielkopolska 15, 70-451 Szczecin
tel: (+48) 91 4441248; fax: (+48) 91 4441427;
<http://cosmo.usz.edu.pl>

Mariusz.Dabrowski@usz.edu.pl

Szczecin, 17.09.2018

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ PANA MGR TOMASZA KRAJEWSKIEGO
pt. "Ewolucja niejednorodnych rozkładów pola Higgsa"

Już w latach 70-tych XX wieku, czyli jeszcze na długo przed pojawieniem się obserwacji gwiazd supernowych i pojęcia ciemnej energii, spora grupa fizyków na świecie takich jak Yakov Zeldovich czy Tom Kibble zwracali uwagę na możliwość powstania defektów topologicznych podczas łamania symetrii oddziaływań cząstek we Wszechświecie. Te obiekty to monopole, ściany domen, tekstury i struny kosmiczne powstające w zależności od postaci potencjałów pól skalarnych. Jedną z motywacji dla rozważania tych obiektów był problem powstawania „zarodki” dla formowania się galaktyk i ten wątek wciąż jest rozważany przez wielu autorów z różnym skutkiem. Inną konsekwencją, niekoniecznie mile widzianą przed pojawieniem się problemu ciemnej energii, był wpływ sieci powstających defektów topologicznych - a w szczególności strun kosmicznych i ścian domen - na globalną ewolucję Wszechświata, bowiem dawały one efekt ujemnego ciśnienia i przyspieszenie tempa ekspansji. Dzisiaj jest to wręcz zaletą a ostatnie rozbieżności przy pomiarze wartości parametru Hubble'a dla bliskich i dalekich obiektów przywracają dyskusję na temat możliwości dominacji naszego Wszechświata przez ciemną energię w innej formie niż stała kosmologiczna. Faworyzowane są wciąż struny kosmiczne, bowiem zauważonym już od wczesnych prac problemem jest, iż w większości scenariuszy ściany domen szybko rozpadają się pod wpływem silnej grawitacji. Ciekawostką jest, iż pierwsze dane z supernowych w 1998 roku faworyzowały właśnie sieć ścian domen z równaniem stanu $p = (-2/3) \rho$ (p – ciśnienie, ρ – gęstość energii) i ewolucją gęstości energii odwrotnie proporcjonalną do czynnika skali.

W tym kontekście należy rozważać rozprawę doktorską p. mgr Tomasza Krajewskiego, przy czym w tej rozprawie głównym elementem jest konkretna możliwość powstawania defektów topologicznych – ścian domen – w ramach Modelu Standardowego (MS) wyposażonego w znane nam dzisiaj parametry, w tym szczególnie potencjału odkrytej niedawno cząstki Higgsa. W szczególności wykorzystuje się fakt, iż poprawiony za pomocą grupy renormalizacji potencjał efektywny MS posiada oprócz elektroslabego, drugie, głębsze minimum lokalne przy wysokich energiach. To pozwala na rozważenie scenariusza kwantowego tunelowania z próżni elektroslabej do nowej wysokoenergetycznej próżni w wyniku czego mogą formować się ściany domen. Oba minima lokalne są oddzielone lokalnym maksimum, ale dzięki możliwości wystąpienia dużych

fluktuacji pola Higgsa, istnieje możliwość przekroczenia tej bariery potencjału i powstania niejednorodnego rozkładu jego wartości oczekiwanej, co w konsekwencji prowadzi do powstania ścian domen mogących mieć istotny wpływ na ewolucję Wszechświata. Badanie tego zagadnienia jest głównym wątkiem przedstawionej rozprawy, przy czym najważniejszym problemem jest stwierdzenie ich ewentualnej stabilności i przetrwania w trakcie ewolucji lub, jak się okazało, wpływu ich rozpadu na wielkości obserwowalne, w tym na spektrum odkrywanych sukcesywnie od niedawna fal grawitacyjnych.

Rozprawa powstała na bazie dwóch opublikowanych prac w *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*: 1. *Domain walls and gravitational waves in the Standard Model* (1612, 036 (2016)); 2. *Domain walls in the extensions of the Standard Model* (1805, 007 (2018)). Oprócz tych prac doktorant ma w swoim dorobku jeszcze jedną pracę opublikowaną w *Physical Review D* 92, 075009 (2015), złożony na archiwach elektronicznych w styczniu 2018 preprint oraz dwie publikacje pokonferencyjne. Publikacje są względnie nowe i jeszcze niezbyt intensywnie cytowane – liczba cytowań wynosi 16. Indeks Hirscha dla całego dorobku p. mgr T. Krajewskiego wynosi $h=3$.

Rozprawa zawiera 97 stron i składa się z wprowadzenia, 9 rozdziałów, podsumowania oraz trzech dodatków A, B i C. Bibliografia zawiera 75 pozycji.

W rozdziałach 2, 3 i 4 wprowadza się podstawowe pojęcia teoretyczne dotyczące potencjału pola Higgsa, powstawania jego niejednorodnego rozkładu oraz obliczania podstawowego parametru jakim jest szerokość ścian domenowych. Najważniejszymi punktami rozważań są kwestie wprowadzenia, inaczej niż w dotychczasowych scenariuszach, łamania symetrii lokalnej zamiast globalnej, co dalej związane jest z niestabilnością tych obiektów. Jak wskazano, fluktuacje gęstości wywołane ścianami domen dają niewielki wkład do gęstości materii we Wszechświecie.

Kluczowym zagadnieniem wprowadzonym w rozdziale 2 jest rozważenie potencjału efektywnego (2.18) z operatorem nierenormalizowalnym pola Higgsa h^6 , co jest nazywane dalej „Nową Fizyką” odzwierciedlającą wpływ nieznanymi cząstek powyżej pewnej skali energii Λ na dynamikę ścian. Interesującym wynikiem jest, że ten potencjał jest mocno asymetryczny nawet w przypadku zdegenerowanych minimów – to jest wynik, którego wcześniej się nie spodziewano. Poza tym w rozdziale 2 pokazane zostało, iż poprawki termiczne od tła cząstek MS mają malejący wpływ na potencjał wraz ze wzrostem natężenia pola h .

Rozdział 3 poświęcony jest procesom powstawania niejednorodnych rozkładów pola Higgsa dzięki fluktuacjom termicznym oraz kwantowym tego pola i odpowiedzialnym za przeprowadzenie wartości oczekiwanej tego pola przez barierę potencjału. Z kolei w rozdziale 4 głównym zagadnieniem jest oszacowanie szerokości ścian domenowych co jest niezbędne do określenia ich dynamiki. Obliczenia dokonano zarówno dla potencjału Modelu Standardowego jak również dla modelu z nierenormalizowalnym operatorem h^6 . W obu przypadkach szerokość ścian domenowych osiąga wartości rzędu $4 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1}$, co daje 40-krotność rozmiaru siatki stosowanej do obliczeń. Wyliczono, iż szerokość ścian maleje liniowo wraz z temperaturą termicznego stanu Wszechświata.

Głównym elementem rozdziału 5 jest modelowanie ewolucji ścian domen we Wszechświecie. Jak było wspomniane na początku, gęstość energii ścian jest odwrotnie proporcjonalna do

pierwszej potęgi czynnika skali i jeśli pominąć stałą kosmologiczną, to zdominuje ona Wszechświat po długim czasie. Powołując się na symulacje numeryczne przeprowadzone dla scenariuszy rozważanych w kolejnych rozdziałach pracy, okazuje się, iż nie jest to sytuacja zbyt realna ponieważ w większości tych scenariuszy ściany domen rozpadają się. Sama ewolucja ścian domen jest opisywana za pomocą podstawowego działania teorii strun jakim jest działanie Nambu-Goto, ale zastosowanego do obiektów dwuwymiarowych.

Rozdział 6 opiera się na własnej pracy Autora rozprawy w JCAP z roku 2016 i dotyczy ewolucji ścian domenowych w Modelu Standardowym. Wyliczone zostało, że ewolucja ścian zmienia się w zależności od przyjętego początkowego czasu konforemnego a wartością graniczną jest czas równy (w odpowiednich jednostkach) rozmiarowi siatki stosowanemu do obliczeń. Sieci ścian domen uformowane wcześniej rozpadają się szybciej niż te uformowane później, ale tylko dla konfiguracji początkowych pola zawierających podobne udziały próżni elektrosłabej oraz wysokoenergetycznej. Natomiast w ogólnym przypadku czas życia sieci ścian nie zależy od początkowego czasu konforemnego. Sprawdzono też zostało, iż na analizę nie ma wpływu rozmiar siatki numerycznej (256^3 lub 512^3) oraz fluktuacje statystyczne.

Kolejny rozdział 7 odnosi się do pracy doktoranta w JCAP z roku 2018, w której badane były ściany domenowe modelu Nowej Fizyki wychodzącej poza Model Standardowy z operatorem nierenormalizowalnym h^6 . Obliczenia tej sekcji pokazują, iż powstanie sieci ścian domenowych i utrzymanie ich w reżimie skalowania, czyli przetrwania ich przez długi czas ewolucji Wszechświata jest mało prawdopodobne. Wymaga to bowiem prawie zdegenerowanych minimów potencjału efektywnego oraz bardzo specyficznych konfiguracji początkowych pola Higgsa, czyli jest to sytuacja wysoce dopasowana (ang. „fine tuning”). W rozdziale 8 rozważa się kwestię wpływu poprawek termicznych na ewolucję ścian domenowych.

Jak sądzi Autor rozprawy, najlepszym sposobem wykrycia faktu istnienia fazy w której nastąpił rozpad ścian domen Higgsa byłaby obserwacja powstałych podczas tego procesu fal grawitacyjnych. Temu zagadnieniu poświęcone są rozdziały 9 i 10. Poprzez rozwiązanie układu równań Einsteina-Higgsa obliczone zostało widmo fal grawitacyjnych produkowanych w trakcie rozpadu ścian we wczesnym Wszechświecie. Dokładne symulacje numeryczne obu przypadków Modelu Standardowego i Modelu Nowej Fizyki pokazują, iż gęstości fal wyemitowanych podczas tego procesu są o minimum 20 rzędów wielkości za małe, aby mogła nastąpić ich detekcja za pomocą zarówno dzisiejszych jak też przyszłych teleskopów grawitacyjnych takich jak Laser Interferometer Gravitational Observatory (LIGO), evolutionary Laser Interferometer Space Antenna (eLISA), czy też Big-Bang Observer (BBO). Przyczyną tak niskiej energii fal jest ich duża długość, która dodatkowo została rozciągnięta przez ekspansję Wszechświata tak, iż energia tych fal jest niezwykle mała, co utrudnia ich rejestrację.

Moje uwagi krytyczne odnoszą się do następujących kwestii:

- W pracy brakuje mi kontekstu historycznego w obszarze kosmologii dotyczącego rozważań na temat defektów topologicznych. Widzimy co prawda odniesienie do jednej klasycznej pracy Y. Zeldovicha i innych (nr [22]) ale nie ma nic na temat roli jaką odegrały (i odgrywają) w kosmologii np. struny kosmiczne. Mam tu na myśli cały szereg prac A. Vilenkina, N. Turoka, N. Kaisera, A. Stebbinsa i wielu innych.

- W powyższym kontekście wcześniejszych prac w zasadzie od początku było wiadomo, iż ściany domen są nietrwałe więc wynik rozprawy doktorskiej w tym sensie niekoniecznie wnosi coś nowego, chociaż oczywiście należało to sprawdzić.
- Rzadko widuję rozprawy składające się aż z 9 rozdziałów merytorycznych. Sądzę, iż niektóre z nich powinny być połączone lub przeformułowane (np. rozdział 8 składa się z jednej części i dodatkowo jego tytuł pokrywa się z podrozdziałem 4.4). Wydaje się, iż rozdziały 8 i 9 powinny być połączone. Ogólnie taka struktura robi pracę zbyt rozdrobnioną i rozmywa jej główne przesłanie.

Mniej istotne uwagi są następujące:

- Szkoda, że streszczenia w jęz. polskim i angielskim nie są wyrównane do prawej strony (tzw. wyjustowanie) – cała praca jest.
- Niezbyt podoba mi się używanie terminu „Nowa Fizyka”, czyli wyjście poza Model Standardowy. Ten termin ostatnio służy jako pewnego rodzaju „opakowanie” do wielu różnych zjawisk w fizyce cząstek. Wolałbym po prostu wymienienie nazwy zjawiska fizycznego o które chodzi, bo samo to określenie jest moim zdaniem zbyt ogólne.
- W formule (A.1) po prawej stronie powinno chyba być Φ_0 a nie v_0 , aby było to uzgodnione z (4.5).
- Pojawiają się liczne drobne literówki i przekłamania o nieistotnym znaczeniu.

Rozprawa jest dobrze i raczej klarownie napisana, zawiera poprawne obliczenia i poprawne wytłumaczenia badanych teorii. Oparta jest na już opublikowanych pracach, które pojawiły się w wysoko punktowanych czasopismach. Zawiera także dosyć obszerne wyjaśnienia modeli fizycznych oraz narzędzi matematycznych i numerycznych użytych w dyskusji.

Podsumowując, rozprawa spełnia wymagania jakie są konieczne do uzyskania stopnia doktora nauk fizycznych i w związku z tym rekomenduję rozprawę p. mgr Tomasza Krajewskiego do publicznej obrony.

