

Recenzja rozprawy doktorskiej pt. "Scalar fields within warped extra-dimension" ("Pola skalarne w teorii ze zwiniętymi dodatkowymi wymiarami") mgra Aqeela Ahmeda

W roku 1996 Petr Hořava i Edward Witten (Nucl. Phys. B460 (1996), 506; *ibid* B475, 94) rozważyli nową metodę kompaktyfikacji wymiarowej, która różniła się od metody Kaluzy-Kleina w ten sposób, że dodatkowe wymiary nie były zwinięte w rurkę, mimo iż wciąż były bardzo małe. Metoda ta polegała na rozważeniu zwartego dodatkowego wymiaru - orbifoldu, równoważnemu jednostkowemu odcinkowi, co pozwalało na obniżenie skali unifikacji grawitacji z oddziaływaniami cechowania do 10^{16} GeV. Ta idea tzw. wszechświatów (mem)branowych oznaczała, że grawitacja propaguje się w jedenastu wymiarach, natomiast oddziaływania cechowania pojawiają się tylko na 10-wymiarowych płaszczyznach wyznaczonych przez orbifold - (mem)branach.

Trzy lata później, Lisa Randall i Raman Sundrum (a także wcześniej Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos i Gia Dvali) skoncentrowali się na problemie hierarchii w fizyce cząstek otrzymując 5-wymiarową przestrzeń o symetrii Z_2 (model Randall-Sundrum I - RSI) z dwoma 3-branami połączonymi orbifoldem. Podobnie jak w teorii Hořavy-Wittena, oddziaływania cechowania były uwięzione na branach, podczas gdy oddziaływanie grawitacyjne propagowało się w całej przestrzeni. W kolejnym scenariuszu (model Randall-Sundrum II - RSII), pojawiała się tylko jedna membrana umieszczona w punkcie $y = 0$, gdzie y było współrzędną orbifoldu, a 5-wymiarowa czasoprzestrzeń miała własności anty-de-Sittera z ujemną 5-wymiarową stałą kosmologiczną. Nowością było, że piąty wymiar mógł być nawet nieskończony dzięki eksponencjalnemu "czynnikiowi zwijającemu" w tensorze metrycznym.

Głównym osiągnięciem w tym podejściu było, że można obniżyć skalę unifikacji grawitacji z pozostałymi oddziaływaniami do poziomu energii *unifikacji elektrosłabej*, tzn. do energii ~ 1 TeV. Słabość oddziaływania grawitacyjnego była wyjaśniona faktem "przeciekania" tego oddziaływania do dodatkowego wymiaru (dodatkowych wymiarów) przy uwięzieniu oddziaływań cechowania w zwykłych czterech wymiarach czasoprzestrzennych.

Modele Randall-Sundrum zostały przedstawione w dwóch powszechnie znanych pracach z roku 1999 i zrobiły niezwykłą karierę przyciągając zainteresowanie zarówno fizyków cząstek, jak również relatywistów. Zostały one przetestowane obserwacyjnie oraz zaproponowano eksperymenty w akceleratorach cząstek, które ewentualnie mogłyby dowieść, że istnieją grawitony, które "przeciekają" do dodatkowych wymiarów. Niestety, do tej pory Wielki Zderzacz Hadronów nie odkrył tego efektu, ale kolejne eksperymenty wciąż są przeprowadzane. Modele Randall-Sundrum były bardzo popularne w latach 1999-2005 (wystarczy wspomnieć, że prace Randall i Sundrum uzyskały ponad 12.000 cytowań), chociaż ostatnimi laty zainteresowanie tymi modelami nieco spadło.

Na marginesie okazało się, że modele membranowe były już wcześniej badane w kontekście cienkich warstw masywnych opisywanych funkcją delta Diraca w formalizmie ogólnej teorii względności przez Matta Vissera (Phys. Lett. B159 (1985), 22), ale nie wzbudziły żadnego zainteresowania w tamtym czasie.

Rozprawa doktorska mgra A. Ahmeda pojawia się na tym ogólnym tle. Jest ona poświęcona badaniu pewnych nowych aspektów wszechświatów branowych - związanych z nowymi

typami źródeł dla bran – polami skalarnymi z konfiguracją ostrza raczej niż z cienkimi warstwami opisywanymi funkcją delta Diraca. Ponieważ osobliwe brany mogą być wygładzone przez odpowiedni wybór pól skalarnych, to nazywane są one "grubymi" branami.

Rozprawa oparta jest na pięciu pracach napisanych wspólnie z promotorem prof. B. Grzadkowskim oraz z L. Dulnym, J. Wudką, J.F. Gunionem i Yun Jiangiem. Wszystkie załączone do rozprawy prace były opublikowane w latach 2013-2015 – trzy z nich w Journal of High Energy Physics, jedna w Acta Physica Polonica (seria pokonferencyjna) i jedna w European Journal of Physics. Pan mgr Ahmed opublikował wcześniej jeszcze 5 pięć prac poświęconych fenomenologii cząstek elementarnych. Wszystkie prace mgr Ahmeda były cytowane 61 razy (prace z rozprawy 35 razy) a indeks Hirscha z wszystkich prac to $h=6$ (według SPIRES). Rozprawa zawiera 128 stron i składa się ze streszczenia, wstępu (rozdziału I), czterech głównych rozdziałów (II-V), dwóch dodatków oraz bibliografii ze 135 pozycjami.

W Rozdziale I Autor wprowadza czytelnika od podstawowej idei fizyki cząstek elementarnych do problemu hierarchii a następnie do scenariuszy modeli RSI i RSII. Pokrótce omawia strukturę dysertacji jak również wprowadza do używanej notacji.

Rozdział II poświęcony jest *nowym typom* modeli RSI jak również RSII. Pierwszym z nich jest model RSI z symetrią Z_2 i trzema branami (dwie symetryczne brany IR z ujemnym naprężeniem umieszczone w punktach o współrzędnej $y = \pm L$ i jedna brana UV z dodatnim naprężeniem umieszczona w $y = 0$). W celu rozwiązania problemu hierarchii potrzeba rozważyć sztywną geometrię z dobrze dopasowaną odległością pomiędzy branami L . Drugim jest asymetryczny model RSII z dwiema różnymi 5-wymiarowymi stałymi kosmologicznymi $\Lambda_{\pm}$ ($\Lambda_+ \neq \Lambda_-$; $\Lambda_+ < 0, \Lambda_- < 0$) po obu stronach pojedynczej brany. Autor pokazuje, że grawitacja jest zlokalizowana w tych modelach na branie poprzez wprowadzenie modu zerowego perturbacji tensorowych, który okazuje się gravitonem zlokalizowanym na branie. Inne niezerowe mody są wytłumiane, w związku z czym otrzymuje się 4-wymiarowąiskoenergetyczną grawitację będącą teorią grawitacji Einsteina z niewielkimi poprawkami.

Jednym z problemów bran IR z ujemnym naprężeniem w modelu RSI jest, że one nie mogą być "wygładzone" za pomocą nietrywialnych konfiguracji minimalnie sprzężonego pola skalarnego. (Gibbons i inni 2001). Wynika to z periodyczności modeli RSI. W Rozdziale III rozprawy jest pokazane, że to samo ma miejsce dla nieminimalnie sprzężonych pól skalarnych. Z tego powodu rozważane są różne modele typu RSII z dwiema "grubymi" branami w celu rozwiązania problemu hierarchii. Jednym z nich jest asymetryczne uogólnienie modelu RSII dla "grubej" brany, w którym rozwiązania są znalezione za pomocą metody superpotencjału. Wykazano tutaj także stabilność takich rozwiązań. Innym są modele oparte na profilu ostrza, który może zasymulować Wszechświat z dwiema "grubymi" branami i rozwiązać problem hierarchii (należy podkreślić, że modele RSII nie były oryginalnie wymyślone w tym celu). Dalsze rozszerzenie obejmuje model z trzema niezwartymi Z_2 -symetrycznymi "grubymi" branami o dodatnim naprężeniu w przeciwieństwie do tylko jednej brany z dodatnim naprężeniem w scenariuszu z trzema "cienkimi" branami. Ostatnim ciekawym osiągnięciem tego rozdziału jest znalezienie rozwiązań dla dylatonowych konfiguracji trzech "grubych" bran, które w sposób naturalny pojawiają się w modelach kosmologicznych zawierających takie brany. W końcu rozdziału III rozważana jest stabilność modeli grubych bran poprzez przestudiowanie zaburze

skalnych, wektorowych i tensorowych. Warto wspomnieć, że idea "grubych" bran pozwala na wprowadzenie tych obiektów jako obiektów dynamicznych związanych nieodłącznie z fizycznymi polami skalarnymi, a nie jako struktur ad hoc. Istotną zaletą tego podejścia jest fakt, że istnieje granica w której "gruba" brana przechodzi w "cienką" (osobliwą) branę (patrz np. równania (3.21), (3.41)).

W rozdziale IV, który rozpoczyna się ponownym, ale bardziej szczegółowym przeglądem własności modeli RSII, rozważana jest kosmologia dla tych modeli zawierających "grube" brany – najpierw dla statycznych konfiguracji pola skalarnego (porozdział 4.2.1), a następnie dla konfiguracji dynamicznych (podrozdział 4.2.2). Równania pola dla "cienkich" bran typu RSII składają się z równań (4.6)-(4.10), natomiast dla "grubych" bran z równań (4.29)-(4.33) i na podstawie ich analizy porównawczej można wywnioskować, że w tych ostatnich rolę funkcji metrycznej $n(t, y)$ przejmuje pole skalarne ϕ . Tutaj także jest stosowana metoda superpotencjału. W końcu, dla konfiguracji dynamicznych opisywanych w podrozdziale (4.2.2), które nazwane są pchniętymi lub skręconymi, pojawia się interesująca własność – pewna klasa rozwiązań zależy tylko poprzez kombinacje typu $\eta = c\tau + dy$ ($c, d = \text{const.}$), gdzie τ jest czasem konforemnym, a y piątą współrzędną.

Ostatni rozdział V poświęcony jest fenomenologii modelu trzech grubych membran (IR-UV-IR) zaproponowanemu w podrozdziale 2.2 rozprawy. Jednym z celów tego scenariusza jest uzyskanie ciemnej materii w modelu ze zwiniętym dodatkowym wymiarem i trzema osobliwymi branami RSI umieszczonymi w 5-wymiarowej czasoprzestrzeni wypełnionej polami Modelu Standardowego (Higgsa). Okazuje się, że zerowe mody parzyste względem symetrii Z_2 odpowiadają zwykłej materii, natomiast zerowe mody nieparzyste względem symetrii Z_2 , odpowiadają ciemnej materii. Jest interesujące, że efektywny sektor tej teorii zawiera pole skalarne, które może być zinterpretowane jako standardowe pole Higgsa, oraz dodatkowe pole skalarne, które może być zinterpretowane jako "ciemny-Higgs" – pole Higgsa należące do sektora ciemnej materii. Jednak, jak pokazano w rozprawie, to ostatnie nie może stanowić zbyt dużej frakcji ciemnej materii we Wszechświecie. W tym podejściu wychodzi się z działania zawierającego 5-wymiarowy model abelowy Higgsa jak również sektor elektrosłaby modelu standardowego (formuły (5.4) i (5.74)). Pokazano, że te dwa podejścia są równoważne. Ten rozdział zawiera także interesujące wnioski dotyczące łamania symetrii elektrosłabej (Electro-Weak-Symmetry-Breaking – EWSB) dzięki 5-wymiarowemu polu Higgsa oraz uzyskania najniższego nieparzystego modu Kaluzy-Kleina jako kandydata do ciemnej materii. Ażeby uzyskać spontaniczne łamanie symetrii, należy wybrać odpowiednie warunki brzegowe (Neumanna, Dirichleta, lub mieszane) dla pola Higgsa. W końcu, po wyliczeniu poprawek kwantowych dla pola Higgsa z sektora skalarnego oraz pewnym dopasowaniu parametrów okazało się, iż można uzyskać prawidłową masę standardowego bozonu Higgsa zgodną z wartością eksperymentalną $m_h = 125$ GeV.

Praca zawiera jeszcze wiele interesujących wyników o mniejszym znaczeniu wymienionych zarówno we wstępie jak również w podsumowaniu, których jednak nie będę wymieniał.

Moje uwagi krytyczne są następujące:

- W ostatnim paragrafie na stronie 3 Author mówi, że 83% obserwowanej gęstości masy we Wszechświecie to ciemna materia (DM) powołując się na pracę zespołu sondy Planck.

Albo jest to zwykły błąd drukarski, albo Author nie wie nic o ciemnej energii (DE), która jest czym innym niż ciemna materia. Liczba rzędu 23% byłaby odpowiedniejsza (w istocie rzeczy mamy: materia świecąca - 4.9%; DM - 26,8%; DE - 68.3%).

- Termin “brane limit” (granica branowa), który pojawia się wiele razy w pracy (np. str. 29, 34, 35, 41 itd.) jest nieco mylący w kontekście rozpatrywania źródeł w postaci “thick-brane” (grube brany). Może lepiej byłoby używać terminu “thin-brane limit” (granica cienko-branowa) lub “granica brany osobliwej”.
- Rozdział 2.2. - rozumiem, że człony brzegowe Gibbonsa-Hawkinga grają tutaj rolę szczególną, ale ich wprowadzenie ma sens bardziej ogólny. Człony te wymagane są w dowolnej teorii przy wariacji działania względem tensora metrycznego. Istota rzeczy leży w tym, że dla otrzymania równań pola zwykle zakłada się, iż zarówno wariacja tensora metrycznego δg_{ab} jak i wariacja pierwszej pochodnej tensora metrycznego $\delta g_{ab;c}$ powinny zniknąć na brzegu obszaru całkowania. Gibbons i Hawking mówią, że to ostatnie założenie jest zbyt mocne i dodają do działania człony brzegowe, które kasują wariacje pierwszej pochodnej.
- Rozwiązania statyczne w polu skalarnym otrzymane w sekcji 4.2.1 wyglądają bardzo podobnie do rozwiązań kosmologii przed-Wielkim-Wybuchem oraz kosmologii Hořavy-Wittena, które to zawierają jawne dualności czynnika skali i dylatonu. Jednak tutaj te dualności nie występują (np. nie ma dualnego rozwiązania do (4.54) dla $k = 0$ ponieważ $\tilde{\Lambda}$ musi być dodatnia i to rozwiązanie jest definiowane tylko dla ujemnego czasu konforemnego w ten sposób jawnie przypominając typowe rozwiązanie z fazy przed-Wielkim-Wybuchem). Czy jest jakaś przyczyna fizyczna, która zapobiega wystąpieniu takich dualności (których korzenie sięgają teorii strun)? Występowanie modelu Milne’a dla $\tilde{\Lambda} = 0$ jest dobrym sygnałem, ale nie wyjaśnia powyższych przypadków.
- Czy można uzyskać wielobranową (multibrane) analogię scenariusza ekpyroticznego/cyklicznego à la Steinhardt i Turok? Jakie wówczas byłyby warunki brzegowe oraz człony Gibbonsa-Hawkinga?
- W ogólnym przypadku możliwe są nie tylko dodatkowe wymiary przestrzenne, lecz także czasowe. Jak mogłyby one wpłynąć na scenariusz “grubych membran” (thick-brane)?
- Nie zauważyłem w spisie literatury odnośnika do pracy Matta Vissera, który historycznie był pierwszym fizykiem rozważającym “cienkie” (typu delta function) źródła grawitacji chociaż zrobił to w kontekście ogólnej teorii względności (patrz np. M. Visser *Lorentzian wormholes*, Springer-Verlag, 1996).
- Nie znalazłem objaśnienia do prawego panelu rys. 2.1. Mam tu na myśli sens podwójnych strzałek.
- Formuła (2.47) - w objaśnieniu znajdujemy, że kropka oznacza pochodną względem współrzędnej z . Czy nie powinno być względem współrzędnej t ?

- Pojawiły się także niewielkie błędy redakcyjne i edytorskie (jak np. “weather” zamiast “whether” w drugim zdaniu rozdziału 3.1.2), małe nieścisłości itp. niedociągnięcia, które wychwytiłem, ale nie wymieniam.

Praca jest dobrze napisana, wyjaśnia wiele istotnych idei teorii bran także poprzez dyskusję szczegółowych wyprowadzeń kluczowych dla tematu zagadnień. Oparta jest na już opublikowanych pracach w wysoko notowanych czasopismach fizycznych. Zawiera ogromną substancję z zakresu aparatu matematycznego fizyki cząstek, teorii bran oraz teorii względności, a także fenomenologię tych działów fizyki. To dowodzi ważności oraz sporej wartości tych badań.

Reasumując chciałbym podkreślić, że uzyskane w rozprawie wyniki, ich aktualność oraz wpływ na rozwój astrofizyki cząstek, mimo pewnych uwag krytycznych ze strony recenzenta, są bardzo dobrą podstawą do ubiegania się o stopień doktora nauk fizycznych. Stwierdzam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska spełnia (a nawet przekracza) wymagania stawiane tego typu rozprawom i wnoszę o dopuszczenie mgr Aqeela Ahmeda do dalszych etapów przewodu i do publicznej obrony.

Szczecin, 06.10.2015
prof. dr hab. Mariusz P. Dąbrowski
Instytut Fizyki, Uniwersytet Szczeciński



