



Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej Akademii Nauk

Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69

Email: cft@cft.edu.pl

NIP 525-000-92-81

REGON 000844815

Warszawa, 08.02.2019

Dr hab. Mikołaj Korzyński
Centrum Fizyki Teoretycznej PAN
Al. Lotników 32/46
02-668 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Aleksandra Stachowskiego

Tytuł rozprawy: *Cosmological models with running cosmological constant*

Promotor: Prof. dr hab. Marek Szydłowski

Rozprawa mgr Aleksandra Stachowskiego ma formę cyklu jedenastu publikacji z dziedziny teoretycznej kosmologii, opatrzonych wstępem podzielonym na siedem rozdziałów i bibliografię. Zarówno publikacje, jak i wstęp zostały napisane w języku angielskim. Autor porusza w nich najważniejsze teoretyczne problemy współczesnej kosmologii, mianowicie problemy ciemnej materii i ciemnej energii.

Okazuje się, że aby wyjaśnić obserwowane przyspieszenie ekspansji Wszechświata musimy zapostulować istnienie jakiejś „siły rozpychającej”, działającej we Wszechświecie na dużych skalach. Ponadto pomiary astronomiczne oraz symulacje powstawania struktury wyraźnie sugerują, że poza obserwowalną materią barionową musi istnieć ciemny, niewidoczny składnik mający formę zimnego płynu, czyli ciemna materia (*cold dark matter*).

Najprostszym pomysłem na taki wielkoskalowy „rozpychacz” jest stała kosmologiczna. Można ją rozumieć albo jako modyfikację równań pola Einsteina, albo jako dodatkowy, specyficzny rodzaj materii spełniający nieco egzotyczne równanie stanu. Stała kosmologiczna, wprowadzona jeszcze przez Einsteina, ma sporo zalet z punktu widzenia teorii: jest ona faktycznie stała, a więc z definicji dokładnie spełnia równanie zachowania swojego wkładu do tensora gęstości energii-pędu. Co za tym idzie, nie wymaga ona żadnej modyfikacji równań ruchu lub równań stanu dla innych składników materii: jest ona w pewnym sensie „przezroczysta” dla wszystkich innych rodzajów materii. Między energią stałej kosmologicznej a energią innych rodzajów materii nie zachodzi żaden przepływ, ewoluują one zupełnie niezależnie, choć oczywiście sama stała kosmologiczna ma wpływ na geometrię czasoprzestrzeni.

Wprowadzenie tej stałej jest jednak nieco kłopotliwe, przynajmniej od strony teorii. Jest tak z dwóch powodów. Po pierwsze, stałą kosmologiczną można interpretować jako energię próżni. Według pomiarów jest ona dosyć niewielka. Analiza wymiarowa sugeruje jednak znacznie większą jej wartość jako „naturalną”, a rozbieżność sięga 10^{120} . Jest to tzw. *cosmological constant problem*.

Z drugiej strony, pomiary wskazują, że obecnie wkład do gęstości energii od stałej kosmologicznej jest co do wielkości porównywalny (choć większy) do wkładu od ciemnej materii, a ten porównywalny (choć większy) do wkładu materii barionowej. Te wkłady spełniają inne, niezależne zasady zachowania, więc taka sytuacja jest przejściowa: rozszerzanie Wszechświata w końcu „rozpuści” pozostałą materię na tyle, że przestanie ona być istotna. Pozostaje jednak problem dlaczego akurat obecnie są to wielkości porównywalne (*coincidence problem*).

Pomysł Stachowskiego można w skrócie opisać jednym zdaniem: a co jeśli stała kosmologiczna nie jest do końca stała? Nie jest to zupełnie nowy pomysł, możliwość oddziaływań wewnątrz „ciemnego” sektora rozważano wcześniej¹, ale Stachowski bada tu systematycznie grupę rozmaitych modeli zakładających takie oddziaływania. Podstawowe dwa pytania, na które próbuje odpowiedzieć autor, brzmią:

1. czy takie modele pozwalają na znaczny spadek gęstości energii ciemnej energii od wartości „naturalnej” do dzisiejszej w czasie od Wielkiego Wybuchu?
2. czy tempo ekspansji w takich modelach daje się pogodzić z najnowszymi wynikami obserwacji kosmologicznych?

Odpowiedzi na pierwsze pytanie autor udziela badając otrzymane równania Friedmanna tych modeli (układy równań różniczkowych zwyczajnych) jako układy dynamiczne, poszukując punktów stałych, atraktorów i repelerów oraz punktów siodłowych w przestrzeni fazowej i katalogując zachowanie krzywych całkowych tych równań.

Jeśli chodzi o drugie pytanie, autor samodzielnie, korzystając ze stworzonych przez siebie narzędzi, dokonuje analizy statystycznej danych z wielkich eksperymentów i przeglądów kosmologicznych, tzn. obserwacji supernowych Ia, akustycznych oscylacji barionowych z trzech dużych przeglądów galaktyk, pomiarów parametru Hubble’a, testu Alcocka-Paczyńskiego oraz danych o mikrofalowym promieniowaniu tła z misji Planck.

Badane modele postulują rozmaite fizyczne mechanizmy: przejście stanu kwantowego „fałszywej próżni” do innego stanu o niższej energii (rozdział 3, prace [36-37, 41-42]), dyfuzję ciemnej energii w przestrzeni fazowej (rozdział 4, prace [47-48]), lub efekt samej teorii grawitacji, spowodowany obecnością dodatkowego członu w lagranżjanie ogólnej teorii względności (tzw. model Starobińskiego, rozdział 6, prace [61-64]). Wszystkie łączy to, że ciemna energia ewoluuje w czasie, a jej niezachowanie rekompensowane jest niezachowaniem energii ciemnej materii. Ponadto autor rozważył ogólnie modele ciemnej energii z zależnością Λ od parametru Hubble’a $H(t)$, składową krzywizny $R(t)$, niekanonicznego pola skalarnego (jako dodatkowego składnika materii) $\varphi(t)$, i efektywnej zależności od parametru skali $a(t)$ (rozdział 5, praca [10]).

Prace, mimo że opublikowane w latach 2015-2018, zdołały już zgromadzić 101 cytowań według bazy INSPIRE-HEP. Liczba ta wskazuje na wagę podjętego przez autora tematu i odzew ze strony środowiska naukowego.

Niewątpliwą zaletą cyklu jest wyczerpująca dyskusja szerokiej klasy modeli. Autor pomysłowo korzysta ze stosunkowo prostej teorii układów dynamicznych do wybrania modeli „dobrze rokujących”, pozwalających na rozwiązanie problemów postawionych w pracy. Ponadto bada ich zgodność ze najnowszymi wynikami obserwacji. Prace mają szansę stać się ważnymi pozycjami w literaturze poświęconej alternatywnym modelom ciemnej energii. Za szczególnie ważną uznaję pracę [10], dyskutującą szeroko modele „niestałe stałej kosmologicznej” zależnej od rozmaitych wielkości kosmologicznych: zapewne wiele innych

¹ Y. Bolotin *et al*, Int. J. Mod. Phys. D **24**, 1530007 (2015)

mechanizmów przepływu energii w „ciemnym” sektorze prowadzi do podobnych, efektywnych zależności, więc wnioski z pracy będą się stosować również do nich.

Jeśli miałbym wskazać jakieś wady rozprawy, zwróciłbym uwagę na brak dokładnego wyjaśnienia mechanizmów fizycznych postulowanych oddziaływań w ciemnym sektorze na poziomie mikroskopowym. Dla przykładu: jeśli przeanalizować dokładnie „modele z dyfuzją”, widać, że dochodzi w nich do efektywnego grzania ciemnej materii poprzez oddziaływanie z ciemną energią. Cząstki ciemnej materii uzyskują w tym modelu dodatkową energię kinetyczną poprzez pewien stochastyczny proces. Uzyskiwanie energii odbywa się kosztem ciemnej energii. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa w przestrzeni fazowej ciemnej materii staje się więc coraz szerszy wokół średniej wartości pędu. To powoduje wzrost średniej energii kinetycznej cząstek, a także potencjalnie pojawienie się ciśnienia w ciemnej materii. Proces ten z drugiej strony jest spowalniany przez ekspansję Wszechświata, powodującą chłodzenie gazu ciemnej materii. Można więc założyć, że jego ciśnienie pozostaje cały czas pomijalne. Taki jest fizyczny sens przybliżeń i założeń opisanych w pracach [47-48].

Tu mam również uwagę dotyczącą nazewnictwa. Zaznaczam, że nazewnictwo to przyjęło się już w środowisku i trudno za nie winić doktoranta. Po pierwsze, nazwa „modele z dyfuzją” z rozdziału czwartego wydaje się niezbyt pasować do fizycznego mechanizmu wymiany energii w „ciemnym sektorze”: chodzi bowiem nie tyle o dyfuzję w przestrzeni fizycznej, ile w fazowej. Wydaje mi się, że lepszym określeniem tego procesu byłoby raczej „grzanie”: chodzi o dostarczanie energii cząstkom ciemnej materii, ale bez przenoszenia ich z miejsca na miejsce. W modelach FLRW rozważanych w pracy Stachowskiego nie ma z resztą miejsca na faktyczną dyfuzję, gdyż gęstość wszystkich składników materii jest stała na powierzchniach stałego czasu.

Ponadto model Starobińskiego rozważany w rozdziale szóstym był rozważany już w latach sześćdziesiątych przez Andrieja Sacharowa², który jako pierwszy (o ile mi wiadomo) rozważał lagranżjan teorii grawitacji z kwadratowym członem w krzywiźnie. W kontekście dwóch równoważnych sformułowań tego modelu („Einstein frame” i „Jordan frame”) warto wspomnieć pracę Jakubca i Kijowskiego odnotowujące tę równoważność w latach osiemdziesiątych³.

Ponadto zauważyłem kilka drobnych poprawek korektorskich: na stronie 23 w tytule podrozdziału 4.1 „Relativistic diffusion interacting of dark matter with dark energy” powinno być „Relativistic diffusion interaction of dark matter with dark energy”. Na stronie 11 „quantum unstable systems” lepiej określić jako „unstable quantum systems”. Na stronie 17 z kolei mamy „recating” zamiast „recasting” i „modified” zamiast „modifies”.

Ostatnia uwaga to raczej sugestia na przyszłość. Wprowadzenie oddziaływania wewnątrz „ciemnego sektora” musi mieć poważne konsekwencje dla powstawania struktury we Wszechświecie. „Zwiralizowana” ciemna materia, tworząca zarodki struktury, nie rozszerza się, a więc efekty jej oddziaływania z ciemną energią kumulują się. Możemy się więc spodziewać, że statystyczne własności struktury na mniejszych, nieliniowych skalach będą odmienne od modelu Λ CDM. To właśnie tam należałoby więc szukać wszelkich śladów „niestałej stałej kosmologicznej”.

Podsumowując, mimo uwag oceniam pracę Stachowskiego bardzo pozytywnie i uważam ją za ciekawy wkład do literatury na temat problemu ciemnej energii. **Uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr Aleksandra Stachowskiego spełnia zwyczajowe i formalne warunki stawiane rozprawom doktorskim**

² A. D. Sacharow, Dok. Akad. Nauk SSSR **177**, 70 (1967)

³ A. Jakubiec, J. Kijowski, Phys. Rev. **D37**, 1406 (1987);
J. Kijowski, Int. J. Geom. Meth. Mod. Phys. **13**, 1640008 (2016)

i dlatego w oparciu o przepisy Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym wnoszę do Wysokiej Rady Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Mikołaj Korzyński

Mikołaj Korzyński