



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, 13.09.2019

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

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Michała Wieczorka

Tytuł rozprawy: ***Niestabilność i nieliniowe oddziaływania perturbacji pól skalarnych w modelach inflacji kosmologicznej (Instabilities and nonlinear interactions of scalar fields perturbations in models of cosmological inflation)***

Promotor: Prof. dr hab. Krzysztof Turzyński

Dysertacja mgr Wieczorka ma formę pojedynczej rozprawy zawierającej wyniki opublikowane w dwóch pracach, oraz część wyników jeszcze nieopublikowanych. Jej tematem są niestabilności pojawiające się w niektórych modelach inflacyjnych podczas inflacji lub krótko po niej, oraz wpływ tych niestabilności na wyniki przewidywań tych modeli odnośnie niejednorodności mikrofalowego promieniowania tła.

Inflacja została zaproponowana prawie 40 lat temu jako mechanizm wyjaśniający względną jednorodność i izotropowość obserwowanego Wszechświata oraz jego małą krzywiznę. W modelach inflacyjnych postuluje się, że na wczesnym etapie miał miejsce okres bardzo szybkiej, wykładniczej lub niemal wykładniczej ekspansji Wszechświata. Zakłada się, że przez jakiś czas głównym składnikiem materii było jedno lub więcej pól, których efektywne równanie stanu dopuszczało szybką ekspansję. Trwało to do momentu wyjścia z inflacji, a potem inny mechanizm spowodował przejście równania stanu do równania ultrarelatywistycznego gazu (*radiation domination*), co określa się jako *reheating*.

W literaturze zaproponowano ogromną liczbę takich modeli. Badanie ich zgodności z doświadczeniem możliwe jest poprzez sprawdzenie jak wygląda widmo perturbacji skalarnych i tensorowych po okresie inflacji. Perturbacje związane są z kwantowymi fluktuacjami pola inflatonowego, których początkowe widmo można uznać za znane. Perturbacje te ewoluują w czasie inflacji, a dużo potem stają się zaczątkiem obserwowanych niejednorodności mikrofalowego promieniowania tła oraz tworzenia struktury. Badanie ich statystycznych własności jest jedną z najważniejszych dziedzin kosmologii obserwacyjnej.

Aby dobrze zrozumieć związek między postulowanym modelem inflacji a widmem niejednorodności musimy przede wszystkim dobrze znać przewidywaną dynamikę takiego modelu. Jest to stosunkowo łatwe, jeśli rozważymy po prostu dynamikę jednorodnego tła, nie dbając o wpływ niejednorodności na

ewolucję modelu. Niestety, jak zauważa autor w swojej rozprawie, takie podejście może być niewystarczające.

Mgr Wieczorek bada w swojej rozprawie wpływ rozmaitych niestabilności modeli inflacyjnych na ich dynamikę i przez to, pośrednio, na ich obserwowalne konsekwencje. Wykorzystuje w badaniach metody przybliżone (analizę Floqueta, poszukiwanie obszarów w przestrzeni parametrów o dużych wykładnikach Floqueta) oraz symulacje numeryczne na siatce. Jest to ambitne zadanie, gdyż badanie niestabilności to jedno z najtrudniejszych zagadnień symulacji numerycznych - badamy sytuacje, które z samej swojej natury trudno poddają się metodom numerycznym. Autor wykorzystał stworzoną przez siebie metodę numeryczną całkującą równania ruchu na siatce korzystającą ze sformułowania hamiltonowskiego.

Rozprawa składa się ze wstępu, rozdziału drugiego opisującego teorię inflacji i aparat matematyczny, rozdziałów 3, 4 i 5 opisujących wyniki badań, rozdziału szóstego podsumowującego wyniki oraz dodatków, w których przedstawione są szczegóły części obliczeń oraz numeryki. W rozdziale trzecim autor bada możliwość autorezonansu (*self-resonance*) pola inflatonowego w jednopolowych modelach inflacyjnych. Chodzi o scenariusz, w którym oscylacje pola inflatonowego pod koniec inflacji powodują rezonansowe wzbudzenie modów długofalowych poprzez rezonans parametryczny. Te z kolei wzbudzają pozostałe mody krótkofalowe poprzez nieliniowe oddziaływania, zmieniając w ten sposób równanie stanu materii. Podstawowym narzędziem jest tu analiza Floqueta. Autor pokazuje, że poza modelem α -attractor T-model (α TI) jedynie w pięciu modelach może dojść do wzbudzeń poprzez rezonans parametryczny. **Analiza Floqueta zachowania długofalowych modów dla piętnastu modeli jest pierwszym znaczącym wynikiem rozprawy.** Dalej autor stwierdza, że dla wszystkich pięciu modeli jednopolowych poza modelem Kachru-Kallosha-Lindego-Trivedi (KKLTI) o parametrze $p \neq 2$ rezonans parametryczny spowoduje pojawienie się oscylonów, czyli ciężkich, metastabilnych cząstek. W tych modelach równanie stanu po inflacji to równanie pyłu ($w = 0$), a nie promieniowania, nie dochodzi w nich więc do reheatingu. Jedynym ciekawym pozostaje więc model KKLTI z parametrem $p \neq 2$. Autor na koniec podaje wyniki symulacji numerycznych na siatce modelu KKLTI z $p = 2$ i $p = 3$, których zachowanie zgadza się ze scenariuszem opisanym powyżej: w pierwszym przypadku indeks barotropowy dąży do 0, w drugim zbliża się do 1/3.

W kolejnych dwóch rozdziałach autor bada wpływ drugiego pola skalarnego obecnego w modelach, zwanego w rozprawie *spectator field*, na własności niektórych modeli inflacyjnych. Pole to zazwyczaj jest zaniedbywane w badaniach dynamiki tych modeli. Autor pokazuje, że nie jest to poprawne postępowanie: okazuje się bowiem, że drugie pole może podlegać rozmaitego typu niestabilnościom, które zmieniają istotnie fizyczne przewidywania modeli.

W rozdziale czwartym mgr Wieczorek bada późną inflację w modelu α TI i niestabilność pola spektatora. Aby ją wykazać autor ponownie sięga po analizę Floqueta, a także symulacje numeryczne na siatce. Okazuje się, że niestabilność spektatora powoduje znaczne przyspieszenie reheatingu w porównaniu do analiz zaniedbujących drugie pole. Powodem jest tachionowa niestabilność niektórych modów spektatora: gdy szybkość zmiany inflatonu jest dostatecznie duża, ich ewolucję opisuje równanie eliptyczne, a nie hiperboliczne. Szybki wzrost tych modów pociąga za sobą wzrost pozostałych i przejście do radiacyjnego równania stanu w bardzo krótkim czasie. Co więcej, nawet w przypadku $n = 1$ niestabilność spektatora uniemożliwia pojawienie się oscylonów, widocznych przy zaniedbaniu drugiego pola.

W rozdziale piątym mgr Wieczorek bada wpływ destabilizacji pola spektatora na samą inflację dla modelu Starobiniego. Potwierdza przypuszczenia wysunięte we wcześniejszej pracach swojego promotora, że ta destabilizacja zmienia poważnie trajektorię inflacyjną. Dodatkowy człon oddziaływania między spektatorem a pochodną inflatonu powoduje podobną jak w poprzednim przypadku destabilizację długofalowych modów spektatora jeśli pochodna inflatonu w czasie jest odpowiednio duża. Okazuje się jednak, że końcowy rezultat niestabilności w czasie inflacji jest inny niż w przypadku badanym w rozdziale czwartym:

następuje złamanie symetrii układu i w przestrzeni tworzą się domeny, wewnątrz których pole spektatora przyjmuje dodatnie lub ujemne własności. Pole jest niemal stałe wewnątrz każdej z domen, a ewolucja przebiega bardzo podobnie do jednorodnego modelu dwupolowego. To z kolei wydłuża okres inflacji i mocno zmienia własności obserwacyjne modelu. Wynik jest efektowny i potwierdzony symulacjami numerycznymi.

Zaletą badań przedstawionych w rozprawie jest uświadomienie teoretykom zajmującym się inflacją jak różnorodna i skomplikowana może być ewolucja przewidywana przez modele inflacyjne i jak dużą rolę mogą w niej odgrywać niestabilności. Wyjaśnienie roli niestabilności pomijanego drugiego pola dla dwóch modeli jest tutaj szczególnie ważnym wynikiem. Symplektyczna metoda numeryczna stworzona przez mgr Wieczorka może w przyszłości przydać się do analizy ewolucji i niestabilności innych modeli inflacyjnych. Do rozprawy mam tylko kilka drobnych uwag.

W rozdziale czwartym przydałby się wykres przedstawiający pole spektatora po inflacji (w reprezentacji przestrzeni rzeczywistej, nie Fouriera), odpowiednik wykresów 31 i 32 z rozdziału piątego. Uwydatniłyby one zasadniczą różnicę między niestabilnością opisaną w rozdziale 4 i 5. Przypuszczam, że różnica między wynikami dotyczy korelacji długozasięgowych pola spektatora χ , obecnych oczywiście w przypadku fragmentacji na niemal jednorodne domeny jak w modelu Starobinśkiego.

W rozdziale piątym zabrakło mi poszerzonej dyskusji fragmentacji pola χ i tworzenia się domen. Wydaje mi się, że dużo wyjaśniłoby zbadanie jednowymiarowych rozwiązań typu *kink* - powinno dać się to zrobić albo ściśle, albo rozwiązując numerycznie stosunkowo proste równania różniczkowe. Taka analiza pozwoliłaby być może na ustalenie np. przewidywanej szerokości ścian domenowych.

W opisie wyników symulacji na siatce w rozdziałach 4 i 5 zbadano zachowanie symulacji dla innych obcięć w przestrzeni pędów oraz innych rozmiarów siatki. Nie dokonano jednak oceny stopnia zbieżności całej metody (wymagałoby to oczywiście przeprowadzenia symulacji dla większej liczby rozmiarów siatki). Taka analiza wzmocniłaby wiarygodność wyników.

Żadna z powyższych uwag nie wpływa na moją pozytywną ocenę rozprawy mgr Wieczorka i opisanych w niej wyników. **Uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr Michała Wieczorka spełnia zwyczajowe i formalne warunki stawiane rozprawom doktorskim i dlatego w oparciu o przepisy Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym wnoszę do Rady Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Mikołaj Korzyński