

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Michała Wieczorka
„Niestabilność i nieliniowe oddziaływania perturbacji pól skalarnych
w modelach inflacji kosmologicznej”**

Przedstawiona do recenzji rozprawa, napisana pod kierunkiem dr hab. Krzysztofa Turzyńskiego, oparta jest na badaniach naukowych przedstawionych w dwóch artykułach których mgr Wieczorek jest współautorem, opublikowanych w wiodących czasopismach w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych.

Tematyka, konstrukcja i główne wyniki rozprawy

Praca doktorska mgr Wieczorka napisana jest w języku angielskim, w sposób lekki i czytelny. Składa się z sześciu rozdziałów, trzech dodatków i spisu bibliografii, który zawiera 95 pozycji. Rozprawa dotyczy problemu generacji materii i promieniowania po zakończeniu epoki inflacji – z braku lepszego polskiego określenia w dalszym ciągu będę używał żargonowego określenia „reheating”. Problem ten jest kluczowy zarówno dla konsystencji inflacyjnego obrazu historii wszechświata jak i dla szczegółowych przewidywań w konkretnych modelach inflacyjnych.

W pierwszym rozdziale rozprawy – we wstępie – Autor przedstawia cel swoich badań w szerszym kontekście kosmologii inflacyjnej. Omawia też pobieżnie pewne aspekty techniczne swoich badań, które traktują problem “reheating” z dwóch perspektyw. Jedna opiera się na podejściu analitycznym. Przybliża ono – poprzez linearyzację – równania ewolucji w sektorze pól skalarnych, który występuje w modelach inflacyjnych. Pola te traktowane są na poziomie klasycznym. Uzyskany układ liniowy analizowany jest następnie z perspektywy twierdzenia Floqueta. Pozwala to w systematyczny sposób szukać znamion zjawiska rezonansu parametrycznego, który może być odpowiedzialny (w ramach tego przybliżenia) za wzmożenie produkcji cząstek. Drugie podejście to rozwiązywanie numeryczne układów sprzężonych nieliniowych równań różniczkowych

opisujących ewolucję pól skalarnych. Autor omawia tu też wstępnie kwestię destabilizacji pewnych pól skalarnych pod koniec etapu inflacji. Badanie konsekwencji tego efektu jest jednym z głównych zagadnień podejmowanych w rozprawie.

Rozdział drugi ma charakter przeglądowy. Autor prezentuje tu podstawy modelu Lambda-CDM, samą ideę inflacji, mechanizmy generacji perturbacji gęstości w wszechświecie a także problem przejścia od epoki inflacji do epoki zdominowanej przez promieniowanie czyli problem „reheating”. Rozdział ten jest stosunkowo obszerny, ale mimo przeglądowego charakteru jest bardzo zajmująco napisany, ponieważ Autor nie rozwodzi się nad powszechnie znanymi rzeczami, lecz rzeczywiście skupia się na aspektach istotnych dla jego dalszych rozważań. Prezentowane zagadnienia opisane są zwięźle ale przejrzysto.

Rozdział trzeci dotyczy pytania, czy rezonans parametryczny w modelach inflacyjnych opartych na dynamice pojedynczego pola skalarnego może całkowicie wystarczyć do opisu procesu „reheating” – chodzi tu o mechanizm *self-resonance*. Obszerna lista modeli opartych o pojedyncze pole skalare (inflaton) została skompilowana w pracy [6] ze spisu bibliografii i Autor systematycznie zbadał te modele, a także szereg innych (w szczególności głośne w ostatnich latach modele „alpha-attractor”) pod kątem mechanizmu *self-resonance*, posługując się przy tym twierdzeniem Floqueta. Wyniki uzyskane tą drogą są weryfikowane w kilku interesujących przypadkach przez porównanie z numerycznymi rozwiązaniami nieliniowych równań ewolucji. Konkluzją jest tu stwierdzenie, że *self-resonance* rzadko prowadzi do pożądanego efektu wzmożonej produkcji cząstek.

Rozdział czwarty koncentruje się na zjawisku produkcji cząstek poprzez rezonans parametryczny w modelach typu „alpha-attractor” z dwoma polami skalarnymi. Głównym wynikiem jest tu pokazanie, że stosowane wcześniej w literaturze uproszczenie sprowadzające się do zaniedbania drugiego pola jest wadliwe w związku z możliwością destabilizacji pod koniec inflacji („geometryczna destabilizacja”). Autor bada to zagadnienie zarówno poprzez twierdzenie Floqueta jak i poprzez obliczenia numeryczne. Konkluzją tego rozdziału jest wniosek, że destabilizacja drugiego pola w modelach rozważanej klasy rzeczywiście zachodzi i prowadzi do zwiększenia efektywności mechanizmu „reheating”. Autor omawia tu w miarę szczegółowo kwestie techniczne związane z doбором obciążenia i innych parametrów określających obliczenia numeryczne.

Rozdział piąty poświęcony jest zagadnieniu geometrycznej destabilizacji w modelach zawierających dwa oddziałujące pola skalarne których oddziaływania prowadzą do ujemnej krzywizny przestrzeni pól (w konsekwencji nietrywialnych wyrazów kinetycznych). Jako główny przykład Autor rozważa model Starobinskiego i opisuje wyniki obliczeń numerycznych symulujących dynamikę pól skalarnych na sieci, pokazując, że destabilizacja geometryczna ma znaczący wpływ na przebieg inflacji. Autor argumentuje tu też, że z perspektywy efektywnej teorii pola takie zjawisko wydaje się dość typowe i powinno być brane pod uwagę także w innych modelach inflacyjnych.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie uzyskanych wyników.

Rozprawę uzupełniają trzy dodatki o charakterze technicznym.

Ocena merytoryczna i metodologiczna rozprawy

Recenzowana pracę uważam za ciekawą i wartościową. Jest napisana lekko i ciekawie, w sposób jasno pokazujący zarówno sprawność techniczną Autora jak i bardzo dobre zrozumienie tematyki. Od strony technicznej wartościowe wydaje mi się zastosowanie zaawansowanych metod symplektycznych przy całkowaniu równań ewolucji. Nie jest dla mnie jednak całkiem jasne, czemu to jest konieczne, choć autor podaje pewne szczegóły w dodatku B. Autor porównuje tam metodę symplektyczną którą sam zaprojektował w oparciu o wykłady Hairera (pozycja [67] w bibliografii) ze standardową metodą Runge-Kutty (czwartego rzędu?) a także z procedurami zawartymi w pakiecie Mathematica, które autor traktuje jako wzorzec. Wydaje mi się, że warto było spróbować sprawdzić (np. wymuszając metodę korzystając z opcji „Method”) jaki algorytm jest tam faktycznie użyty do całkowania omawianych równań. Wydaje mi się też, że warto było nieco bardziej explicite omówić kwestie dokładności, stabilności i kontroli błędów w symulacjach numerycznych w zależności od parametrów (choć Autor w pewnym stopniu to robi).

Od strony edytorskiej chciałbym zwrócić uwagę na jeden mankament, którym jest niezbyt uważnie sporządzoną bibliografię. Niektóre pozycje są po prostu niekompletne (np. 20, 21, 24, 95); najczęstszy problem to brak numeru strony. Wydaje się, że przy użyciu współczesnych narzędzi takich jak BibTeX i baza danych inspirehep.net tego typu problemów powinno dać się uniknąć. Nie rzutuje to jednak w istotnym stopniu na moją końcową ocenę rozprawy, która jest bardzo dobra.

Podsumowanie

Po zapoznaniu się z przedstawioną rozprawą doktorską mgr Michała Wieczorka stwierdzam, że spełnia ona ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim. Ponad to, dorobek naukowy Autora rozprawy uważam za adekwatny na tym etapie kariery naukowej. W tych okolicznościach wnoszę o dopuszczenie mgr Wieczorka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

A handwritten signature in black ink, reading "M. Spaliński". The signature is fluid and cursive, with the first letter 'M' being large and stylized.

Prof. dr. hab. Michał Spaliński