

Recenzja osiągnięcia naukowego dr Tomasza Denkiewicza „Scenariusze z egzotycznymi osobliwościami jako modele Wszechświata z dynamiczną ciemną energią” w związku z postępowaniem habilitacyjnym w Narodowym Centrum Badań Jądrowych z siedzibą w Otwocku

Coraz większe teleskopy i bardziej czułe detektory sprawiły, że na przełomie XX i XXI wieku astronomowie odkryli iż tempo rozszerzania się Wszechświata zamiast maleć – rośnie. Do enigmatycznej ciemnej materii, której istnienie wynika z charakterystycznych płaskich krzywych rotacji galaktyk spiralnych, obserwacji soczewkowania grawitacyjnego i promieniowania rentgenowskiego emitowanego przez gorące obłoki gazu znajdujące się w centralnych obszarach gromad galaktyk trzeba było dodać ciemną energię – niezwykłą formę energii, która jest rozłożona jednorodnie we Wszechświecie i wytwarza ujemne ciśnienie. Powszechnie uważa się, że ciemną materię tworzą jakieś bardzo słabo oddziałujące cząstki, których, pomimo wielu różnych prób, do tej nie udało się odkryć. Natura ciemnej energii jest jeszcze bardziej zagadkowa. Najprostszym wyjaśnieniem przyspieszonego tempa rozszerzania się Wszechświata jest założenie, że jest ono spowodowane przez różną od zera stałą kosmologiczną. Model Wszechświata z różną od zera stałą kosmologiczną i ciemną materią złożoną z ciężkich, ale bardzo słabo oddziałujących cząstek został nazwany modelem  $\Lambda$ CDM lub standardowym modelem kosmologicznym. Z obserwacji astronomicznych wynika, że ciemna energia stanowi około 70% gęstości energii Wszechświata, a ciemna materia około 25%. Wyjaśnienie natury obu tych ciemnych składników Wszechświata jest jednym z najważniejszych problemów współczesnej kosmologii i fizyki.

To czy stała kosmologiczna jest odpowiedzialna za obserwowane obecnie przyspieszone tempo rozszerzania się Wszechświata zdecydują obserwacje astronomiczne. Z obserwacji astronomicznych wynika, że stała kosmologiczna  $\Lambda = 1.088 \cdot 10^{-56} \text{ cm}^{-2}$ . Na początku lat sześćdziesiątych XX wieku Erast Gliner zauważył, że stałą kosmologiczną można uważać za szczególny ośrodek ciągły, który można charakteryzować standardowymi parametrami jak gęstość  $\rho$  i ciśnienie  $p$  i równanie stanu  $p = -\rho$ , przy czym chociaż Wszechświat się rozszerza ciśnienie i gęstość tego ośrodka pozostają stałe. Zaczęto się też zastanawiać w jaki sposób w początkowych fazach ewolucji Wszechświata została ustalona wartość stałej kosmologicznej. Jakow Zeldowich zauważył, że stałą kosmologiczną można identyfikować z energią próżni pól kwantowych. Oszacowane wartości tej energii przewyższały jednak o kilkadziesiąt rzędów wielkości obserwowaną wartość stałej kosmologicznej.

Jeżeli przyspieszone tempo rozszerzania się Wszechświata nie jest spowodowane przez różną od zera stałą kosmologiczną to ciemną energię można opisać efektywnymi parametrami takimi jak gęstość  $\rho_{DE}$  i  $p_{DE}$  powiązanymi równaniem stanu  $p_{DE} = w \rho_{DE}$ , przy czym  $w < -1/3$  i  $w$  może zależeć od czasu. Z dostępnych obecnie obserwacji astronomicznych wynika, że  $w = -1.028 \pm 0.031$  i jeżeli zależy od czasu to w kosmologicznej skali czasu zmienia się jedynie nieznacznie.

Obserwacyjne ograniczenia na ciemną energię są bardzo łagodne, wystarczy aby ciemna energia wytwarzała odpowiednio ujemne ciśnienie. Brak ostrych ograniczeń na własności ciemnej energii sprawił, że w ciągu ostatnich dwudziestu lat powstało wiele różnych modeli ciemnej energii od różnych

pól skalarnych przez modyfikacje ogólnej teorii względności do efektów związanych z niejednorodnym rozkładem materii w skalach gromad galaktyk i mniejszych.

Osiem z dziewięciu prac wchodzących w skład osiągnięcia naukowego dr Tomasza Denkiewicza poświęcone są badaniu heurystycznego modelu ciemnej energii. Osnową tych prac jest założenie, że czynnik skali Wszechświata ma postać:

$$a(y) = a_s [\delta + (1 - \delta)y^m - \delta(1 - y)^n],$$

gdzie  $y = t/t_s$ ,  $t$  – to czas kosmiczny, a  $t_s$ ,  $a_s$ ,  $m$  i  $n$  są stałymi parametrami modelu, rozważa się okres ewolucji Wszechświata, gdy  $t < t_s$ . Gdy  $\delta = 0$  czynnik skali zależy w sposób potęgowy od czasu i w zależności od wartości parametru  $m$  może opisywać wczesną zdominowaną przez promieniowanie epokę ewolucji Wszechświata lub późniejszy okres, gdy tempo ewolucji Wszechświata jest określone przez gęstość nierelatywistycznej materii (pył). We wszystkich omawianych pracach przyjmuje się, że  $m \approx 2/3$ , czyli zakłada się, że początkowe fazy ewolucji Wszechświata są zdominowane przez materię nierelatywistyczną. Człon  $\delta(1 - y)^n$  opisuje wkład ciemnej energii do dynamicznej ewolucji Wszechświata. Gdy  $\delta < 0$  model opisuje przyspieszoną ekspansję Wszechświata. Gdy  $1 < n < 2$  pojawiają się osobliwości w przyszłości dla  $t \rightarrow t_s$ ,  $y \rightarrow 1$ .

Korzystając z równań Friedmana dla płaskiego, jednorodnego i izotropowego Wszechświata i zadanego czynnika skali wyznaczono gęstość i ciśnienie. W pracy H1 pokazano, że przy odpowiednim wyborze parametrów  $m > 0$ ,  $n > 0$  chociaż  $\ddot{a}(t)$  i  $\dot{a}(t)$  dążą do zera, gdy  $t \rightarrow t_s$  ( $y \rightarrow 1$ ), współczynnik proporcjonalności  $w(t) = p(t)/\rho(t)$  dąży do nieskończoności. Ten nowy typ osobliwości nazwano osobliwością  $w$ .

W pracy H2 korzystając z tej samej postaci czynnika skali oszacowano wartości parametrów  $n$ ,  $\delta$ , i  $y_0 = t_0/t_s$  porównując przewidywania tego modelu z obserwacjami supernowych typu Ia (katalog Union2) oraz przewidywaniami standardowego modelu kosmologicznego  $\Lambda$ CDM z  $\Omega_m = 0.2725$  i  $\Omega_\Lambda = 0.7275$ . Najlepsze dopasowanie uzyskano dla  $n = 1.995$ ,  $\delta = -0.5$  i  $y_0 = 0.805$ . Choć autorzy tego nie piszą wyraźnie w tym modelu wystąpi osobliwość w przyszłości za około 3.3 miliarda lat!

W pracy H3 ten sam model skonfrontowano z bogatszym zbiorem danych obserwacyjnych, uwzględniono nie tylko supernowe typu Ia, ale również barionowe drgania akustyczne i rozmiar horyzontu akustycznego na powierzchni ostatniego rozproszenia. Wyniki przedstawione są w postaci diagramów, wyznaczono też wartość parametru  $m$ . W konkluzji pracy autorzy stwierdzają, że „podobnie jak w naszej poprzedniej pracy (H2), gdzie korzystaliśmy tylko z danych o supernowych, tu pokazaliśmy, że nagła osobliwość w przyszłości może wkrótce wystąpić we Wszechświecie. „Autorzy pracy nie komentują tego, że wykorzystują dane o mikrofalowym promieniowaniu tła chociaż ich model nie opisuje wczesnych etapów ewolucji Wszechświata.

W pracy H4 napisanej samodzielnie przez T. Denkiewicza ograniczono zakres zmienności parametru  $n$  do  $0 < n < 1$ , co powoduje powstanie osobliwości, przy skończonej wartości czynnika skali. Zbadano stabilność tego modelu i pokazano, że gdy  $\lambda < 1$  rozwiązania opisujące osobliwość nie są stabilne. Aby ograniczyć wartości parametrów modelu skonfrontowano przewidywania tego modelu z danymi

obserwacyjnymi. Wykorzystano katalog Union2 supernowych typu Ia, dane o średnicy kątowej horyzontu dźwięku na powierzchni ostatniego rozproszenia oraz barionowe oscylacje akustyczne. Wyznaczono wartości parametrów modelu dla przypadku  $m > 1$  i  $m < 1$ . Na poziomie ufności  $1\sigma$  dopuszczalna jest wartość  $m = 2/3$ . Niezależnie od wartości parametru  $m$  zawsze występuje osobliwość w przyszłości. Podobnie jak poprzednich pracach nie wyjaśniono dlaczego wykorzystywano wielkości związane z promieniowaniem reliktowym, choć rozpatrywany model nie opisuje wczesnych epok ewolucji Wszechświata.

W pracy H5 korzystając z założonej postaci zależności od czasu czynnika skali przeanalizowano ewolucję zaburzeń gęstości. W liniowym przybliżeniu wyprowadzono równanie opisujące ewolucję takich zaburzeń. Pokazano, że można tak dobrać wartości parametrów modelu  $y_0 = 0.55$ ,  $\delta = 0.67$ ,  $m = 0.49$ ,  $n = 0.32$ , aby uzyskać zgodność tempa wzrostu zaburzeń gęstości z przewidywaniami modelu  $\Lambda$ CDM.

W pracy H6 zbadano możliwość testowania różnych modeli kosmologicznych z osobliwościami w przyszłości korzystając z możliwości pomiarów zmian przesunięcia ku czerwieni i lub jasności galaktyk od czasu. Pomysł takich pomiarów pochodzi od Allana Sandage'a, który w 1962 roku oszacował, że  $dcz/dt \sim 10^{-6}$  km/s rok. Dzięki nowym możliwościom technologicznym dokładność działających obecnie spektrografów zbliża się do wartości niezbędnych do śledzenia tego efektu. W pracy przeanalizowano kilka różnych modeli kosmologicznych z osobliwościami w przyszłości i pokazano, że obserwacje zmian przesunięcia ku czerwieni w czasie pozwolą na rozróżnienie różnych modeli ciemnej energii nawet na podstawie danych obserwacyjnych o obiektach znajdujących się relatywnie blisko, dla  $z < 1$ .

Praca H7 jest poświęcona zmianom w czasie stałej struktury subtelnej w modelach kosmologicznych z możliwymi osobliwościami w przyszłości jest bardzo kontrowersyjna. Autorzy łączą tutaj heurystyczne założenie o zależności czynnika skali od czasu z istnieniem hipotetycznego pola skalarnego, które oddziałuje z polem elektromagnetycznym. Nie podano żadnych argumentów uzasadniających przyjęte założenia. Moim zdaniem jest to najbardziej kontrowersyjna praca wchodząca w skład osiągnięcia naukowego dr T. Denkiewicza.

W pracy H8 napisanej samodzielnie przez T. Denkiewicza zbadano ewolucję zaburzeń gęstości materii i ciemnej energii w modelach kosmologicznych z osobliwościami w przyszłości. Do opisu zaburzeń zastosowano formalizm niezależny od cechowania opracowany przez J. Bardeena. W rozważanych modelach podstawową rolę spełnia czynnik skali  $a(t)$ . Korzystając z równań Friedmana można wyznaczyć całkowitą gęstość i całkowite ciśnienie, ale podział na ciemną materię i ciemną energię jest dość arbitralny. W tym modelu zaburzenia materii i zaburzenia ciemnej energii są wzajemnie powiązane. Stosunek amplitud zaburzeń ciemnej materii i ciemnej energii zależy od skali. Okazało się, że amplituda zaburzeń ciemnej energii jest porównywalna z amplitudą zaburzeń materii dla zaburzeń w skalach mniejszych od  $\lambda \sim 9000$  Mpc/h, ale skala ta silnie zależy od wartości parametrów modelu. Ewolucja względnych zaburzeń materii zależy od parametrów modelu i różni się od przewidywań modelu  $\Lambda$ CDM. Dla skal mniejszych od rozmiarów horyzontu Hubble'a zaburzenia ciemnej energii i ciemnej materii ewoluują niezależnie. Okazuje się, że ewolucja takich zaburzeń ciemnej materii nie zależy od ich rozmiarów.

zaburzeń gęstości w zależności od ich skali w modelu  $\Lambda$ CDM. Tempo wzrostu zaburzeń gęstości zależy zarówno od rozkładu materii jak i od własności ciemnej energii. Porównanie przewidywań modeli teoretycznych z uwzględnieniem różnych form ciemnej energii z obserwacjami pozwoli na ograniczenie przestrzeni parametrów modeli opisujących ciemną energię. W pracy skoncentrowano się na możliwości testowania przewidywań standardowego modelu  $\Lambda$ CDM z planowanymi obserwacjami kilku dedykowanych przeglądów galaktyk. Nawet te przyszłe przeglądy nieba nie będą jeszcze w stanie odróżnić ewolucji zaburzeń gęstości opisywanych przez pełne równania dynamiczne od ewolucji opisywanej przez przybliżone równania niezależne od skali zaburzenia. Przygotowanie tej pracy wymagało złożonych obliczeń numerycznych i dokładnego zapoznania się z możliwościami różnych instrumentów i detektorów.

Dziewięć prac dr Tomasza Denkiewicza wchodzących w skład jego osiągnięcia naukowego zostało opublikowanych w ciągu dziesięciu lat, pierwsza praca została opublikowana w 2009 roku a ostatnia w 2019. W tych pracach odzwierciedla się rozwój naukowy dr T. Denki ewicza. W pierwszych osmiu pracach korzysta się z heurystycznego założenia o postaci zależności od czasu czynnika skali  $a(t)$ . Przyjęta postać czynnika skali jest sumą dwóch członów, każdy z nich jest potęgą funkcją czasu i zależy od pięciu parametrów. W żadnej z tych prac nie podano uzasadnienia przyjętej postaci zależności czasowej materię i ciemną energię jest arbitralny. Wprawdzie autorzy prac nigdzie tego wyraźnie nie piszą ich modele opisują ewolucję Wszechświata, którego tempo ewolucji jest wyznaczone przez rozkład materii i ciemnej energii. W celu wyznaczenia wartości parametrów modelu wykorzystywano wielkości, które są bezpośrednio związane z własnościami promieniowania relikowego i efektami oddziaływania promieniowania relikowego z plazmą w okresie ewolucji Wszechświata, którego ten model nie opisuje. Próba „odgadnięcia” przyszłej ewolucji Wszechświata na podstawie znanej ewolucji od Wielkiego Wybuchu do dzisiaj bez odwoływanie się do ograniczeń fizycznych jest przedsięwzięciem karkołomnym. Funkcję jednej zmiennej zadaną na skończonym odcinku nawet dodając warunki regularnego zszyci a na jednym z końców w postaci ciągłości  $a$ ,  $\dot{a}$  i  $\ddot{a}$  można przedłużyć na nieskończenie wiele sposobów. W żadnej z pierwszych osmiu prac nie podano uzasadnienia przyjętej postaci czynnika skali.

Ostatnia praca H9 wymagała zapoznania się z zaawansowanymi metodami analizy statystycznej i opanowanie umiejętności operowania dużymi zbiorami danych. Moim zdaniem praca ta świadczy o tym, że dr Tomasz Denkiewicz jest w pełni przygotowany do prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

Stwierdzam, że prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego dr Tomasza Denkiewicza „Scenariusze z egzotycznymi osobliwościami jako modele Wszechświata z dynamiczną ciemną energią” spełniają wymagania określone w art. 219 punkt 2 ustawy stanowiące niezbędny warunek starań o uzyskanie stopnia doktora habilitowanego.

*Marek Demiański*  
Prof. dr hab. Marek Demiański

Warszawa, 28 kwietnia 2021r.