

ZBIGNIEW JACYNA-ONYSZKIEWICZ

Możliwość stopniowego rozrywania struktur wszechświata

W marcu 2008 roku opublikowano nowe rezultaty badań mikrofalowego promieniowania tła (ang. *cosmic microwave background radiation*) uzyskane za pomocą zbudowanej przez NASA sondy kosmicznej WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) [1], a wystrzelonej 30 czerwca 2001 roku i umieszczonej w punkcie libracyjnym L2 układu Ziemia-Słońce, 1,5 miliona kilometrów od Ziemi. Promieniowanie to zostało wyemitowane około 380 tys. lat po wielkim wybuchu (ang. *big bang*), gdy gorąca mieszanina złożona z cząstek subatomowych wypełniająca ówczesny wszechświat tak się oziębiła, że mogły powstać atomy wodoru. Jest to więc promieniowanie, które dociera do nas z największej możliwej odległości, wyznaczającej granicę obserwowalnego wszechświata. Rezultaty WMAP pokazują, że 72% gęstości energii wszechświata to gęstość ciemnej energii (ang. *dark energy*), 23% stanowi wkład od mało zbadanej zimnej ciemnej materii (ang. *cold dark matter*), a tylko około 5% pochodzi od „zwykłej” materii, z której zbudowane są atomy.

Na tej podstawie możemy stwierdzić, że o przyszłości wszechświata będą decydować właściwości fizyczne ciemnej energii, dającej dominujący wkład do gęstości energii wszechświata. Ciemna energia stanowi specyficzną formę energii. Wypełnia ona całą przestrzeń i wywiera ujemne ciśnienie prowadzące do coraz szybszej ekspansji wszechświata. Warto wspomnieć, że pomysłodawcą terminu „ciemna energia” jest fizyk amerykański Michael Turner.

Oszacowania wykonane na podstawie rezultatów WMAP, testów obserwacyjnych gwiazd supernowych typu Ia oraz obserwacji wielkoskalowego rozkładu galaktyk [2] pokazują, że w równaniu stanu ciemnej energii o postaci

$$p = w\rho, \quad (1)$$

gdzie ρ to gęstość ciemnej energii, p – ciśnienie, z dużym poziomem ufności parametr równania stanu w należy do przedziału

$$-1,29 < w < -0,75, \quad (2)$$

Zgodnie ze wzorem (1) oznacza to, że ciemna energia jest źródłem ujemnego ciśnienia p , które powoduje przyspieszoną ekspansję przestrzeni wszechświata, zaobserwowaną po raz pierwszy w 1998 roku [3, 4].

Zbadajmy więc, do jakich konsekwencji dla przyszłości wszechświata mogą doprowadzić różne wartości parametru w zawarte w przedziale (2). W tym celu musimy oprzeć się na podstawach kosmologii fizycznej.

Fundamentalne założenie kosmologii fizycznej stanowi zasada kopernikowska. Jak wiemy, istotą podejścia Kopernika było przyjęcie, że to nie Ziemia jest środkiem wszechświata. Mówiąc ogólniej, zasada kopernikowska stwierdza, że każde miejsce we wszechświecie jest równouprawnione, a nasze w nim położenie jest typowe. Jeśli pominąć drobnoskalowy rozkład materii wypełniającej wszechświat to, średnio rzecz biorąc, rozkład ten jest jednorodny i izotropowy. Zasada kopernikowska jest więc uogólniającym wnioskiem, wynikającym z astrofizycznych danych obserwacyjnych.

Załóżmy, że obserwator znajduje się w początku układu współrzędnych i obserwuje w chwili obecnej, w czasie t_0 galaktykę, której pozycję wyznacza wektor położenia $\vec{r}_0 = \vec{r}(t_0)$. Niech pozycja tej galaktyki w czasie t będzie określona przez wektor położenia $\vec{r}(t)$. Z faktu izotropowości i jednorodności przestrzennej wszechświata wynika następujący związek pomiędzy wektorami \vec{r}_0 i $\vec{r}(t)$:

$$\vec{r}(t) = a(t)\vec{r}_0 \quad (a(t) \geq 0, a(t_0) = 1), \quad (3)$$

gdzie wielkość $a(t)$, zależna tylko od czasu t , nazywa się czynnikiem skali (ang. *scale factor*). Jako początek czasu przyjmujemy hipotetyczną chwilę $t = 0$, w której $a(t=0) = 0$, a odległości pomiędzy wszystkimi galaktykami zerują się, co niekoniecznie oznacza zerowanie się objętości wszechświata, która może być nieskończona.

Izotropia i jednorodność wszechświata matematycznie wyraża się tym, że czynnik skali $a(t)$ jest tylko funkcją czasu, a nie zależy od współrzędnych przestrzennych. Przestrzenna jednorodność wszechświata umożliwia właśnie wprowadzenie jednego uniwersalnego czasu kosmicznego t , jednakowego dla wszystkich obserwatorów [5].

Gęstość energii wszechświata musi spełniać lokalne prawo zachowania energii, czyli pierwszą zasadę termodynamiki. Stąd oraz na podstawie równań (1) i (3) otrzymujemy wyrażenie [5]

$$\rho = \rho_0 a^{-3(w+1)}, \quad (4)$$

gdzie ρ_0 oznacza gęstość ciemnej energii w obecnym czasie kosmicznym t_0 , wynoszącym około 13,7 miliardów lat.

W naszych dalszych rozważaniach musimy oprzeć się na ogólnej teorii względności Einsteina. Zgodnie z obserwacjami astronomicznymi przyjmujemy, że geometria obserwowalnego wszechświata jest płaska, a wkład do gęstości energii wszechświata daje tylko ciemna energia. Stąd, po uwzględnieniu wyrażenia (4), wzory określające zależność czynnika skali a od czasu kosmicznego t , słuszne dla $t \geq t_0$, przyjmują postać:

$$a = \begin{cases} \left(\frac{t-t_0+t_2}{t_2} \right)^\alpha & \text{dla } w > -1, \\ \exp\left(\frac{t-t_0}{t_1} \right) & \text{dla } w = -1, \\ \left(\frac{t_2}{t_2+t_0-t} \right)^\alpha & \text{dla } w < -1, \end{cases} \quad (5)$$

gdzie

$$\alpha = \left| \frac{2}{3(w+1)} \right|, \quad t_1 = \left(\frac{\kappa}{3} \rho_0 \right)^{-1/2}, \quad t_2 = \alpha t_1$$

oraz κ to einsteinowska stała grawitacyjna. Ze wzoru (5) wynika, że wszechświat rozszerza się z narastającą prędkością tylko dla parametrów równania stanu $w < -1/3$.

Na podstawie aktualnych wartości r_0 oraz opierając się na wyrażeniu (5), szacujemy, że wartość czasu t_1 wynosi około 16 miliardów lat.

Dochodzimy też do wniosku, że dla $w \geq -1$ czynnik skali dąży do nieskończoności dla czasu kosmicznego t zmierzającego do nieskończoności, a gęstość ciemnej energii jest nierosnącą funkcją czasu kosmicznego.

Jeżeli parametr $w = -1$, to gęstość ciemnej energii ρ , zgodnie ze wzorem (4) jest stała i wynosi ρ_0 . W tym przypadku uważa się, że ciemna energia jest właściwością samej przestrzeni – znajduje się nawet w obszarach całkowicie pozbawionych cząstek i promieniowania. Koncepcję tę zaproponował już w 1917 roku Albert Einstein podczas pierwszej próby sformułowania relatywistycznego zamkniętego (o skończonej objętości przestrzeni) i statycznego modelu wszechświata. Einstein wprowadził tę koncepcję w postaci tak zwanej stałej kosmologicznej. Obecnie najczęściej przypadek $w = -1$ interpretuje się w ramach kwantowej teorii pola jako stan próżni fizycznej. Z kwantowej teorii pola wiemy, że stan pola bez cząstek może posiadać różną od zera energię. W stanie próżni nie istnieją cząstki rzeczywiste, lecz pojawiają się tzw. cząstki wirtualne. Cząstki wirtualne tym różnią się od cząstek rzeczywistych, że ich czas istnienia jest ograniczony przez relacje nieoznaczoności Heisenberga dla czasu i ener-

gii. W próżni nieustannie wynurzają się wirtualne pary cząstka – antycząstka. Istnieją one tylko przez czas, który jest właśnie ograniczony przez relację nieoznaczoności. O istnieniu par cząstek wirtualnych w pustej przestrzeni przekonuje nas, między innymi, zjawisko przewidziane teoretycznie w 1948 roku przez holenderskich fizyków Hendrika B.G. Casimira i D. Poldera [6], a potwierdzone eksperymentalnie dopiero 1997 roku przez Steve Lamoreauxa [7]. Cząstki wirtualne mogą, tak jak cząstki rzeczywiste, oddziaływać ze sobą. Z tego powodu mogą istnieć różne stany próżni fizycznej. Stan próżni o nienajniższej gęstości energii nazywa się stanem fałszywej próżni (ang. *false vacuum*). Zatem ciemną energię dla $w = -1$ możemy interpretować jako stan fałszywej próżni wszechświata, który to stan jest efektem działania praw fizyki kwantowej w pustej przestrzeni.

Stan fałszywej próżni o nienajniższej gęstości energii, może być stanem metastabilnym, tzn. stanem nietrwałym, który po pewnym czasie przechodzi spontanicznie i nieprzewidywalnie do stanu o niższej gęstości energii. Z punktu widzenia fizyki kwantowej nieprzewidywalny rozpad stanu fałszywej próżni to proces bezprzyczynowy. Filozof powiedziałby, że przyczyny rozpadu fałszywej próżni są transcendentne względem empiryczno-matematycznej i naturalistycznej metodologii badań fizycznych. Zatem, nie można przewidzieć momentu ewentualnej przemiany ciemnej energii wszechświata w inną formę energii, która może nastąpić w każdej chwili. Moje, nieopublikowane obliczenia, przedstawione tylko w postaci referatu pt. *Physics of the end of the World* na międzynarodowej konferencji JFM, Zakopane 9.07.2001, wskazują, że zanik gęstości ciemnej energii mógłby doprowadzić do zmiany zależności potencjału grawitacyjnego z formy newtonowskiej na potencjał typu Yukawy. Miałyby to katastrofalne skutki dla Ziemi i Układu Słonecznego.

Przypadek parametru równania stanu w z zakresu $-1 < w < 0$ rozpatrywany jest w ramach koncepcji zwanej kwintesencją (ang. *quintessence*) [8]. Termin ten oznaczający dosłownie „piąty pierwiastek” nawiązuje do filozofii Arystotelesa, który uważał, że oprócz ziemi, powietrza, ognia i wody wszechświat składa się z nieuchwytnego, najdoskonalszego tworzywa, z którego ukształtowane są ciała niebieskie.

Kwintesencja to określenie kwantowego pola, charakteryzującego się odpychającym oddziaływaniem grawitacyjnym. Najistotniejszą cechą tego hipotetycznego pola kwantowego, w porównaniu z koncepcją fałszywej próżni, stanowi jego dynamiczny charakter. Kwintesencja oddziałując bowiem z materią ewoluuje w czasie. W ten naturalny sposób może osiągnąć wartość gęstości ciemnej energii, którą właśnie obserwujemy we wszechświecie. To, czy ciemna energia ma charakter statyczny czy dynamiczny, może odegrać decydującą rolę w poszukiwaniu fundamentalnej teorii fizycznej.

Ze względu na osobliwe właściwości fizyczne, kolejny przypadek $w < -1$ został nazwany przez Roberta R. Caldwella [9] z Dartmouth College fantomową ciemną energią

(ang. *phantom dark energy*). W tym przypadku gęstość ciemnej energii jest rosnącą funkcją czasu kosmicznego, podczas gdy czynnik skali a osiąga wartość nieskończoną w skończonym czasie kosmicznym $t_R = t_0 + t_2$, w którym funkcja (5) posiada biegun. Na podstawie wyrażenia (2) oraz wzoru (5) dochodzimy do wniosku, że czas ten jest nie mniejszy niż 50 miliardów lat. Oznacza to, że nieskończona wartość czynnika skali może pojawić się nie wcześniej niż za około 37 miliardów lat.

Korzystając ze wzorów (4) i (5) uzyskujemy wyrażenie na gęstość ciemnej energii w postaci

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{t_2}{t_R - 1} \right)^2, \quad (6)$$

z którego wynika, że w czasie t_R gęstość ciemnej energii wszechświata osiągnie wartość nieskończoną, a ciśnienie $p(t = t_R) = -\infty$ (patrz wzór (1)).

Osobliwy stan wszechświata w czasie t_R nazywa się wielkim rozerwaniem (ang. *big rip*). W tym czasie bowiem objętość zamkniętego wszechświata oraz odległość pomiędzy dowolnymi cząstkami stają się nieskończone.

W miarę zbliżania się do czasu t_R zaczynają się rozpadać struktury kosmosu począwszy od struktur największych. I tak, mniej więcej 1,5 miliarda przed czasem t_R zaczynają rozpadać się gromady galaktyk. Z kolei, około 100 milionów przed chwilą t_R , nastąpi rozerwanie Drogi Mlecznej. Następnie, około 4 miesiące przed momentem t_R nastąpi rozpad Układu Słonecznego, a na około 40 minut przed t_R zajdzie eksplozja Ziemi. W końcu w czasie o 10^{-19} s przed t_R nastąpi rozerwanie atomów, czyli totalna destrukcja struktur wszechświata.

Historia fizyki dowodzi jednak, że w przyrodzie realnie nie występują nieskończone wartości obserwabli (mierzalnych wielkości fizycznych). Dlatego podstawową kwestią jest: Jak małe struktury kosmosu ulegną rozerwaniu w pobliżu czasu t_R ? Czy ulegną rozerwaniu także jądra atomowe oraz protony i neutrony?

Warto zaznaczyć, że na możliwość istnienia fantomowej ciemnej energii wskazują obserwacje astronomiczne, a nie rozważania teoretyczne [10, 11]. Potwierdzenie jej istnienia byłoby poważnym wyzwaniem dla fizyki teoretycznej. Dotychczasowe teoretyczne scenariusze przyszłości wszechświata nie przewidywały bowiem możliwości stopniowego rozrywania jego wszystkich struktur, począwszy od największych, a skończywszy na najmniejszych, z których jesteśmy zbudowani. Możliwość takiego scenariusza dopuszczają jednak obecne astrofizyczne dane obserwacyjne [2].

Ostatnio obserwuje się coraz większe znaczenie kosmologii dla fizyki cząstek elementarnych. Aktualna i potwierdzona doświadczalnie teoria cząstek elementarnych, tzw. standardowy model (ang. *standard model*) cząstek elementarnych nie potrafi na przykład, wyjaśnić ani właściwości fizycznych ciemnej energii ani ciemnej materii,

których istnienie i dominacja (stanowią one 95% gęstości energii wszechświata) wynika z danych kosmologicznych. W ten sposób, na naszych oczach, kosmologia niespodziewanie stała się ważną częścią fizyki cząstek elementarnych.

Literatura

- [1] Strona internetowa NASA: <http://map.gsfc.nasa.gov/result>.
- [2] M.P. Dąbrowski, *Przyszłość wszechświata*. „Postępy Fizyki” 2007, 58, s. 5-13.
- [3] A.G. Riess, A.V. Filippenko, P. Challis et al., *Observational evidence from supernovae for an accelerating Universe and a cosmological constant*. „Astron. J.” 1998, 116, s. 1009-1038.
- [4] S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber et al., *Measurements of (OMEGA) and (LAMBDA) from 42 high-redshift supernovae*. „Astrophys. J.” 1999, 517, s. 565-586.
- [5] Z. Jacyna-Onyszkiewicz, *Kosmogeneza kwantowa*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 2008.
- [6] H.G.B. Casimir and D. Polder, *The influence of retardation on the London–van der Waals forces*, „Phys. Rev.” 1948, 73, s. 360-372.
- [7] S.K. Lamoreaux, *Demonstration of the Casimir force in the 0.6 to 6 μm range*. „Phys. Rev. Lett.” 1997, 78, s. 5-8.
- [8] R.R. Caldwell, R. Dave and P.J. Steinhardt, *Cosmological imprint of an energy component with general equation of state*. „Phys. Rev. Lett.” 1998, 80, s. 1582-1585.
- [9] R.R. Caldwell *A phantom menace? Cosmological consequences of a dark energy component with supernegative equation of state*. „Phys. Lett.” 2002, B 545, s. 23-29.
- [10] S. Hannestad, E. Mörtsell, *Probing the dark side: Constraints on the dark energy equation of state from CMB, large scale structure, and type Ia supernovae*. „Phys. Rev.” 2002, D 66, 063508-063513.
- [11] J.M. Cline, S. Jean, G.D. Moore, *The phantom menaced: Constraints on low-energy effective ghosts*. „Phys. Rev.” 2004, D 70, 043543-043547.

Possibility of gradual rips of the Universe structures

According to a recently published data obtained by the space probe WMAP, as much as 72% of the Universe energy density is the dark energy of the state equation parameter w from -1.29 to -0.75 . The dark energy of $w < -1$ has been named the phantom dark energy as this value w implies the breaking of the Universe structures in a finite time t_R . The phantom dark energy rips apart the Milky Way, the solar system, the Earth and ultimately the molecules and atoms of which we are composed, before the time t_R .

Key words: Universe, dark energy, quintessence, phantom dark energy, big rip