

Tadeusz PABJAN*

*Uniwersytet Papieski Jana Pawła II w Krakowie

O kłopotliwym problemie brakującej masy

Streszczenie

Poważną i kłopotliwą trudnością, która pojawiła się w fizyce końca XX wieku, jest kwestia brakującej masy. Naukowcy odkryli bowiem, że Wszechświat zawiera znacznie więcej materii niż dotychczas sądzono. Okazało się, że znane nam rodzaje materii stanowią tylko niewielką część całkowitej masy materii, z której zbudowany jest Wszechświat. Aby rozwiązać ten problem, należało znaleźć i zidentyfikować ową brakującą masę. Te poszukiwania doprowadziły fizyków do wysunięcia hipotezy o istnieniu tak zwanej ciemnej materii i ciemnej energii. W pierwszej części artykułu przytoczono argumenty przemawiające za istnieniem brakującej masy. W drugiej części omówiono hipotezy ciemnej materii i ciemnej energii, a w części trzeciej przedstawiono pewne alternatywne próby wyjaśnienia problemu brakującej masy. Na zakończenie poczyniono kilka uwag związanych z konsekwencjami tego „kłopotliwego problemu” dla przyszłego rozwoju nauki. Jedną z nich może być radykalna rewizja naukowego i filozoficznego obrazu świata.

Słowa kluczowe: brakująca masa – ciemna materia –
ciemna energia

W ostatnich latach coraz częściej mówi się o kryzysie dotyczącym współczesną fizykę. Przejawem tego kryzysu jest to, że pomi-

mo znacznego zaawansowania technologicznego i konceptualnego, z upływem lat pojawia się w ramach tej dyscypliny coraz więcej ważnych problemów, które nie znajdują rozwiązania. Najlepszym przykładem, który w tym kontekście wymienia się na pierwszym miejscu, jest niemożność połączenia mechaniki kwantowej z ogólną teorią względności. Nie jest to jednakże przykład odosobniony. Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie innej trudności, która pojawiła się na terenie fizyki w połowie lat 70. ubiegłego wieku i która w niedługim czasie zdominowała tematykę naukowych prac z zakresu kosmologii relatywistycznej, astrofizyki, fizyki cząstek elementarnych i kilku innych dyscyplin związanych z fizyką. Trudność ta dotyczy interpretacji wyników obserwacji astronomicznych przemawiających za tym, że wszystkie znane obecnie postaci materii stanowią zaledwie niewielką część – nie więcej niż 5% – całkowitej masy Wszechświata. Poszukiwanie rozwiązania tego problemu doprowadziło do odkrycia ciemnej materii i ciemnej energii – dwóch tajemniczych „substancji” wypełniających Wszechświat i decydujących o jego globalnej dynamice. Mimo że jest to rozwiązanie jedynie tymczasowe (wciąż nie wiadomo, czym jest ciemna energia i jakie cząstki tworzą ciemną materię), to już teraz domaga się ono radykalnej rewizji naukowego – i w konsekwencji również filozoficznego – obrazu świata.

1. Brakująca masa

O tym, że w przestrzeni kosmicznej mogą istnieć obiekty, których nie widać gołym okiem – ewentualnie okiem uzbrojonym w teleskop lub inne urządzenie służące do obserwacji ciał niebieskich – astronomowie wiedzieli od dawna. Do niewidocznych obiektów zaliczano przede wszystkim planety, księżycy planet, planetoidy i komety (oczywiście, przynajmniej niektóre z tych ciał można w pewnych warunkach zaobserwować, ponieważ odbijają one światło gwiazd), a także gwiazdy, które z różnych powodów są „ciemne” (np. są całkowicie wygasłe lub świecą zbyt słabym światłem, by obserwator z Ziemi mógł je

zauważyć)¹. Pierwsze istotne argumenty przemawiające za tym, że oprócz tego typu niewidocznych obiektów w przestrzeni kosmicznej musi istnieć jakaś inna, dodatkowa materia, o której wcześniej w ogóle nie wiedziano, pojawiły się w latach 30. XX wieku za sprawą obserwacji przeprowadzonych przez dwóch astronomów – Jana Hendrika OORTA i Fritza ZWICKY’EGO. Pierwszy z nich przeprowadził analizę rozkładu prędkości kątowych gwiazd Drogi Mlecznej², drugi zmierzył prędkości galaktyk w gromadzie Coma (Abell 1656) w Warkoczu Bereniki³. W obydwu przypadkach okazało się, że dynamika analizowanych układów (odpowiednio gwiazd w dysku Drogi Mlecznej i galaktyk w gromadzie Coma) wskazuje na obecność znacznych ilości dodatkowej, niewidocznej masy, która odpowiada za grawitacyjną stabilność tych układów⁴. W tym samym czasie do podobnych wniosków doszedł również astronom Sinclair SMITH, który przeanalizował ruchy galaktyk w gromadzie Abell 1882 w konstelacji Panny⁵. Obserwowaną stabilność gromady również i tu można było wyjaśnić, jedynie zakładając obecność dodatkowej masy, która generuje odpowiednio mocne pole grawitacyjne.

Kolejnych argumentów dostarczyła analiza tzw. krzywych rotacji galaktyk spiralnych. Krzywa rotacji jest wykresem ilustrującym zależność pomiędzy prędkością kątową orbitujących ciał – w przy-

¹ Na początku XX wieku określenie „ciemne gwiazdy” stanowiło swego rodzaju termin techniczny występujący w publikacjach wielu astronomów, którzy w różny sposób szacowali stosunek masy tych gwiazd do masy materii świecącej. Tytułem przykładu – Agnes M. CLARKE w książce o astrofizyce, wydanej w roku 1903, stwierdza, że masa „ciemnych gwiazd” może „przewyższać masę tych, które świecą” (CLARKE, *Problems*, s. 400). Nieco później – w roku 1922 – astronom James H. JEANS przeprowadził obliczenia dowodzące, że liczba „ciemnych gwiazd” trzykrotnie przewyższa liczbę gwiazd świecących (zob. JEANS, *The Motion*).

² OORT, *The Force*.

³ ZWICKY, *Die Rotveschiebung*.

⁴ Z obliczeń OORTA wynikało, że niewidocznej materii powinno być dwukrotnie więcej, a wg ZWICKY’EGO – aż 400 razy więcej niż materii świecącej. ZWICKY w swoich oszacowaniach przyjmował jednakże ośmiokrotnie zawyżoną wartość stałej HUBBLE’A (558 km/s/Mpc), dlatego jego obliczenia w rzeczywistości wskazują, że w gromadzie Coma jest 50 (a nie 400) razy więcej ciemnej materii niż materii świecącej.

⁵ SMITH, *The Mass*.

padku galaktyk spiralnych są to gwiazdy i obłoki gazowe – i ich odległością od centrum układu. Przez długi czas astronomowie badający strukturę galaktyk spiralnych sądzili, że poszczególne fragmenty dysków galaktycznych zachowują się w sposób analogiczny do planet, w przypadku których prędkości kątowe maleją wraz ze wzrostem odległości od Słońca. Jeśli na osi odciętych zaznaczone zostaną odległości, a na osi rzędnych prędkości kątowe, to krzywa rotacji takiego „planetarnego” układu łagodnie opada. Pierwszych dowodów na to, że krzywa rotacji galaktyki spiralnej wygląda zupełnie inaczej – że prędkości kątowe gwiazd nie maleją wraz ze wzrostem odległości od jądra – dostarczył w roku 1939 Horace W. BABCOCK, który przeprowadził obserwacje galaktyki Andromedy (M31)⁶. Okazało się, że krzywa rotacji tej galaktyki jest płaska, to znaczy, że poszczególne fragmenty spiralnych ramion dysku galaktycznego wirują ze stałą prędkością kątową. Analogiczny wynik – tym razem dla Drogi Mlecznej – uzyskała w roku 1962 Vera C. RUBIN⁷. W następnych latach inni astronomowie wyznaczyli krzywe rotacji dla kilkudziesięciu kolejnych galaktyk spiralnych, otrzymując za każdym razem taki sam rezultat⁸.

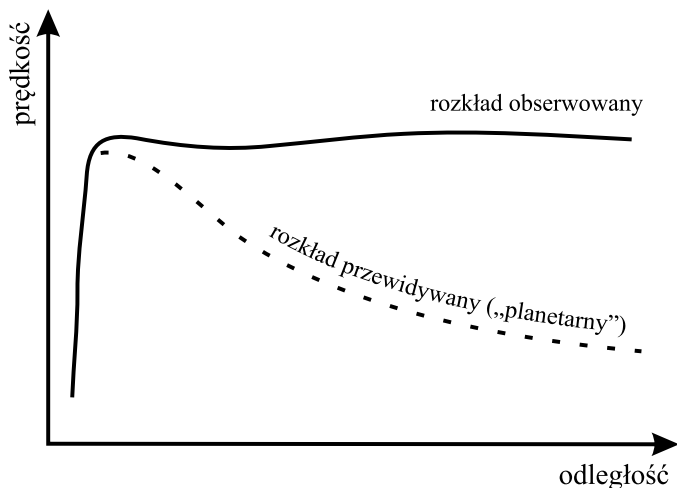
Dlaczego krzywe rotacji galaktyk spiralnych są płaskie? Innymi słowy: dlaczego gwiazdy w tego typu galaktykach orbitują – w przeciwieństwie do planet Układu Słonecznego – ze stałą prędkością kątową? Z zasad dynamiki newtonowskiej wiadomo, że stała prędkość rotacji dowolnego układu orbitalnego możliwa jest tylko wtedy, gdy większa część masy tego układu nie jest skoncentrowana w jego centrum (jak jest np. w Układzie Słonecznym), ale zlokalizowana jest na zewnątrz orbit. Aby wyjaśnić płaskie krzywe rotacji galaktyk spiralnych, należy zatem przyjąć, że każda z tych galaktyk otoczona jest maszyną, sferoidalną otoczką zbudowaną z niewidocznej materii. Wniosek ten pojawił się po raz pierwszy w roku 1973 w pracy Jeremiaha P. OSTRIKERA i Jima PEEBLESA, którzy na podstawie przeprowadzanej przez siebie komputerowej symulacji stwierdzili, że przyjęty model

⁶ BABCOCK, *The Rotation*.

⁷ RUBIN, BURLEY et al. *Kinematic Studies*.

⁸ Zob. np. ROBERTS, *The Rotation Curves*; RUBIN, FORD & THONNARD, *Rotational Properties*; BOSMA, *The Distribution*.

galaktyki spiralnej jest stabilny tylko wtedy, gdy zostanie otoczony sferycznym halo materii o masie zbliżonej do całkowitej masy wszystkich składników galaktyki⁹. Późniejsze oszacowania zmieniły jednakże ten stosunek mas: okazało się, że halo niewidocznej materii może być nawet dziesięć razy bardziej masywne niż sama galaktyka¹⁰.



Krzywa rotacji.

Trzecia grupa argumentów, przemawiających za koniecznością uwzględnienia w globalnym bilansie masy dodatkowej materii, związana jest z efektem soczewkowania grawitacyjnego. Z ogólnej teorii względności wiadomo, że jeśli odpowiednio masywny obiekt znajduje się na linii łączącej obserwatora i źródło światła (np. gwiazdę, galaktykę lub gromadę galaktyk), wówczas może odgrywać rolę soczewki grawitacyjnej, która zakrzywia promienie świetlne i przez to zniekształca obraz tego, co w danym przypadku podlega obserwacji. Co istotne, do tego aby wystąpił ten efekt, wcale nie jest konieczne, by był widoczny sam obiekt będący soczewką. Dla problemu brakującej masy najważniejsze znaczenie ma tzw. słabe i mocne soczewkowanie, które polega na tym, że masywny i najczęściej całkowicie

⁹ OSTRIKER & PEEBLES, A Numerical Study.

¹⁰ OSTRIKER, PEEBLES & YAHIL, The Size.

niewidoczny obiekt – zwykle jest to galaktyka lub gromada galaktyk – w mniej lub bardziej wyraźny sposób zniekształca obraz tego, co znajduje się za nim. Wyraźne ślady tego typu zniekształceń (huki, pierścienie, obrazy zwielokrotnione) można zobaczyć na spektakularnych fotografiach wykonywanych – począwszy od połowy lat 90. ubiegłego wieku – przez kosmiczny teleskop HUBBLE’A¹¹. Fotografie te stały się swego rodzaju namacalnym dowodem na obecność niewidocznej materii. Z przeprowadzanych oszacowań wynika, że zaobserwowane zniekształcenia są wynikiem działania soczewek zawierających kilka (osiem do dziesięciu) razy więcej materii ciemnej niż świecącej.

2. Ciemna materia i ciemna energia

Niewidoczna materia, która zapewnia grawitacyjną stabilność gromadom galaktyk, decyduje o kształcie krzywych rotacji galaktyk spiralnych i wyjaśnia zaobserwowane przypadki soczewkowania grawitacyjnego, nazywana jest po prostu „ciemną” materią. Czym jest ten rodzaj materii? Aby odpowiedzieć na to pytanie, należy najpierw rozróżnić ciemną materię barionową i niebarionową, czyli egzotyczną¹². Barionową ciemną materię tworzą obiekty zbudowane z cząstek dobrze znanych współczesnej fizyce – przede wszystkim z barionów (są nimi np. protony i neutrony wchodzące w skład jąder atomowych), choć – wbrew temu, co sugeruje nazwa – mogą ją również tworzyć mezony i leptony. Do tej kategorii zalicza się planety (zwłaszcza gazowe olbrzymy o rozmiarach Jowisza), księżyce planet, planetoidy, komety, czarne dziury, całkowicie wygasłe lub słabo świejące gwiazdy (szczególnie karły i gwiazdy neutronowe), zimny międzygalaktyczny gaz itp. Barionowej ciemnej materii jest około dziesięć razy więcej niż barionowej materii świecącej (gwiazdy i gorący gaz emitujący promieniowanie), choć należy w tym miejscu zaznaczyć, że samo rozróżnienie na bariony „ciemne” i „świeące” nie jest zbyt precyzyjne, dlatego że przynajmniej niektóre obiekty zbudowane z ciemnych

¹¹ Zob. np. *Gravitational Lens*.

¹² Na ten temat por. np. SCIAMA, *Modern Cosmology*; BERTONE, *Particle Dark Matter*; PANEK, *Ciemna strona*.

barionów można, przy użyciu odpowiednio czułych urządzeń, „zobaczyć” (bo np. odbijają światło gwiazd albo emitują fotony promieni X o niskich energiach).

Niebarionowa ciemna materia oddziałuje grawitacyjnie, ale nie wykazuje żadnych innych własności charakterystycznych dla materii barionowej. To właśnie z tej racji określa się ją mianem materii „egzotycznej”. Wiadomo, że cząstki tej materii nie tworzą atomów i są elektrycznie obojętne, że w młodym Wszechświecie nie miały wpływu na proces nukleosyntezy i rekombinacji, a obecnie nie wpływają na proces powstawania pierwiastków we wnętrzach gwiazd i wreszcie, że zasadniczo nie oddziałują (a jeśli tak, to słabo) z materią barionową¹³. Od dłuższego czasu — co najmniej od początku lat 80. ubiegłego wieku — fizycy poszukują takich cząstek (do tej roli kandydują m.in. masywne neutrina, aksjony, cząstki supersymetryczne albo tzw. WIMPy). Jednak żaden z przeprowadzanych eksperymentów nie potwierdził — jak na razie — ich istnienia¹⁴. Szacuje się, że materii egzotycznej jest ponad 5 razy więcej niż materii barionowej. Ponieważ jednak tylko niewielka część „zwykłej” (barionowej) materii emituje światło, faktyczna dysproporcja, charakteryzująca globalny bilans masy Wszechświata, jest znacznie większa: ciemnej materii (barionowej i niebarionowej) jest w rzeczywistości ponad 60 razy więcej niż materii świecącej.

Dla bardziej wyraźnego ukazania tej dysproporcji warto odwołać się do tzw. parametru gęstości Ω , występującego w modelach kosmologicznych ogólnej teorii względności. Wielkość tę definiuje się jako stosunek średniej gęstości materii Wszechświata do jego gęstości krytycznej. Gęstość krytyczna charakteryzuje płaski model FRIEDMANA (o zerowej krzywiznie), w którym ilość materii — a dokładniej: generowana przez tę materię grawitacja — wystarcza do zatrzymania ekspansji Wszechświata, ale zarazem nie wystarcza do tego, by rozpoczął

¹³ TAOSO, BERTONE & MASIERO, Dark Matter Candidates.

¹⁴ Nie ma wątpliwości co do istnienia neutrin. Oscylacje tych cząstek dowodzą, że mają one różną od zera masę spoczynkową, jednakże ich dokładna masa ciągle nie jest znana. Wstępne oszacowania wskazują, że masa ta jest zbyt mała, by same neutrina mogły wyjaśnić dyskutowany problem — por. np. THOMAS, ABDALLA & LAHAV, Upper Bound; ADAMSON, Measurement.

się proces kontrakcji. Średnia gęstość materii jest w tym przypadku dokładnie równa gęstości krytycznej, co oznacza, że parametr $\Omega = 1$. Jeśli średnia gęstość materii jest większa od gęstości krytycznej (czyli jeśli $\Omega > 1$), to grawitacja nie tylko zatrzyma ekspansję Wszechświata, ale również doprowadzi do jego kontrakcji. Ten scenariusz charakteryzuje zamknięty model FRIEDMANA (o dodatniej krzywiznie). Jest wreszcie trzecia możliwość: gdy średnia gęstość jest mniejsza od gęstości krytycznej (czyli $\Omega < 1$), grawitacja nie zdoła zatrzymać ekspansji Wszechświata (model otwarty, ujemna krzywizna).

Pomiary krzywizny czasoprzestrzeni wykonane przez sondy kosmiczne zaprojektowane do badania anizotropii mikrofalowego promieniowania tła (COBE, WMAP, Planck) z minimalnym marginesem błędu (nie większym niż 1%) wskazują na to, że Wszechświat jest płaski. To zaś oznacza, że średnia gęstość materii jest w obecnym Wszechświecie dokładnie równa gęstości krytycznej, czyli że parametr gęstości musi być dziś równy jedności.

Problem polega jednakże na tym, iż wszystkie znane obecnie postaci materii barionowej – w tym również materii ciemnej, złożonej z wymienionych powyżej obiektów takich jak planety jowiszowe, karły, czarne dziury itp. – dają swój wkład do tego parametru na poziomie niecałych 5% ($\Omega_{bariony} = 0,049$). Same gwiazdy dają w tym przypadku jedynie 0,5% masy ($\Omega_{gwiazdy} = 0,005$). Liczby te w wymowny sposób ilustrują całą złożoność problemu brakującej masy i zarazem uzasadniają nagłą potrzebę rozwiązania tej trudności: jeśli „zwykła” materia – zbudowana z cząstek znanych współczesnej fizyce – stanowi jedynie niecałe 5% całkowitej masy Wszechświata, to co odpowiada za pozostałe 95% jego masy?

Fizycy poszukujący odpowiedzi na to pytanie wskazują najpierw na egzotyczną (niebarionową) ciemną materię. Parametr gęstości określony dla tej formy materii wynosi $\Omega_{niebariony} = 0,268$, co oznacza, że choć materii tej jest kilkakrotnie więcej niż materii barionowej, to również i ona nie jest w stanie wypełnić dziury w globalnym bilansie masy Wszechświata. „Zwykła” materia (świecąca i ciemna) dodana do materii egzotycznej daje w sumie tylko 31,7% ($\Omega_{materia} = 0,317$) masy potrzebnej do „domknięcia” Wszechświata, czyli do uzyskania

gęstości krytycznej, która sprawi, że parametr Ω przyjmie wynikającą z pomiarów wartość 1. Do zbilansowania masy ciągle jeszcze potrzeba jakiejś „substancji”, która da swój wkład do tego parametru na poziomie 68, 3%. Co może być aż tak masywne? Przeprowadzone w ostatniej dekadzie ubiegłego wieku obserwacje supernowych typu Ia wskazują na to, że do parametru gęstości Wszechświata daje swój istotny wkład tajemnicza „ciemna” energia, która (na mocy znanej zasady sformułowanej przez EINSTEINA) jest równoważna masie. Obecnie wiadomo, że wkład tej energii ($\Omega_{ciemna\ energia} = 0,683$) jest ponaddwukrotnie większy niż wkład samej materii¹⁵.

Pierwsze epizody składające się na historię ciemnej energii wiążą się ze stałą kosmologiczną, którą po raz pierwszy do równań pola ogólnej teorii względności wprowadził EINSTEIN w swojej pracy kosmologicznej z roku 1917¹⁶. W modelu EINSTEINA stała ta reprezentuje bliżej nieokreśloną siłę lub energię, która przeciwdziała grawitacji. Wielkość ta pojawia się również w innych teoriach i modelach kosmologicznych — np. w teorii stanu stacjonarnego albo w teorii inflacji — zawsze w tym samym charakterze czynnika działającego przeciwnie do hamującej siły grawitacji. Kiedy na przełomie lat 80. i 90. ubiegłego wieku stało się jasne, że problemu brakującej masy nie da się rozwiązać, odwołując się jedynie do ciemnej materii, fizycy coraz częściej zaczęli myśleć o ponownym włączeniu stałej kosmologicznej do równań pola i o zinterpretowaniu tej wielkości właśnie jako pewnej formy energii, która daje swój wkład do globalnego parametru gęstości. O słuszności tej interpretacji przekonali fizyków¹⁷ wyniki obserwacji supernowych typu Ia opublikowane w roku 1998 przez dwa niezależne zespoły astronomów kierowane przez Saula PERMUTTERA (*Supernova Cosmology Project*) i Briana P. SCHMIDTA (*High-z Supernova Search*)¹⁸.

¹⁵ ADE, Planck 2013 Results.

¹⁶ EINSTEIN, Kosmologische Betrachtungen.

¹⁷ O tym, że nie wszyscy fizycy przekonali się co do słuszności tej interpretacji, będzie mowa w następnym paragrafie.

¹⁸ RIESS, Observational Evidence ; GLANZ, Astronomers.

Supernowe typu Ia – ze względu na charakterystyczną jasność absolutną – traktowane są we współczesnej kosmologii jako tzw. świece standardowe, czyli obiekty służące do wyznaczania odległości. Obserwacje obydwu zespołów ujawniły, że odległe supernowe mają o ok. 25% mniejszą jasność widomą niż powinny mieć, jeśli słuszne jest prawo HUBBLE’A i jeśli poprawne są wyniki pomiarów bliższych supernowych. Ich odległość od Ziemi musi być zatem znacznie większa, niż to wynika z wcześniejszych oszacowań. Obydwa zespoły uznały, że wynik ten dowodzi, iż rośnie tempo ekspansji Wszechświata i dlatego odległe supernowe obecnie oddalają się od Ziemi szybciej niż w przeszłości. Wcześniejsze dyskusje nad problemem brakującej masy i nad potrzebą przywrócenia stałej kosmologicznej do równań pola przyczyniły się do tego, że świat naukowy bardzo szybko uznał, iż za akcelerację ekspansji odpowiada właśnie ciemna energia, którą w równaniach pola reprezentuje dodatnia stała kosmologiczna¹⁹.

Problem ciemnej energii nie ma jednej prostej interpretacji, na którą zgodziliby się wszyscy fizycy. Większość z nich opowiada się za tym, że ciemną energię należy utożsamić z energią próżni, która ma stałą (to znaczy niezmienną się ani w czasie, ani w przestrzeni) gęstość. Niektórzy jednak przyjmują również możliwość fluktuacji tej energii przejawiających się tym, że jej gęstość zmienia się w czasie – w tym ostatnim przypadku ciemna energia nazywana jest kwintesencją (lub dynamiczną ciemną energią)²⁰. W obydwu interpretacjach ciemnej energii przypisuje się ujemne ciśnienie, które przeciwdziała grawitacji spowalniającej proces ekspansji Wszechświata.

3. Wyjaśnienia alternatywne

Czy ciemna materia i ciemna energia faktycznie wyjaśniają problem brakującej masy? Z oczywistych powodów jest to wyjaśnienie jedynie częściowe i tymczasowe.

To prawda, że te koncepcje pozwalają na domknięcie globalnego bilansu masy Wszechświata (po uwzględnieniu materii barionowej

¹⁹ Zob. np. TSUJIKAWA, Dark Energy.

²⁰ Zob. np. PEEBLES & RATRA, Cosmology.

i egzotycznej oraz ciemnej energii parametr gęstości jest równy jedności: $\Omega_{\text{materia}} + \Omega_{\text{ciemna energia}} = 0,317 + 0,683 = 1$), ale trudno mówić o pełnym sukcesie w sytuacji, gdy żaden z przeprowadzanych dotychczas eksperymentów nie dowiódł istnienia cząstek tworzących ciemną materię i gdy o ciemnej energii nie wiadomo niczego więcej ponad to, że powoduje przyspieszenie ekspansji Wszechświata i że jej obecność należy uwzględnić w globalnym bilansie masy. Nie bez znaczenia jest również i to, że istnieje grupa fizyków, którzy traktują hipotezę ciemnej materii i ciemnej energii jako wyjaśnienie całkowicie nieprzekonujące i którzy proponują różnego rodzaju alternatywne teorie tłumaczące omawiane powyżej wyniki obserwacji astronomicznych.

Najbardziej znanym przykładem teorii kwestionującej ideę ciemnej materii jest zmodyfikowana dynamika newtonowska (MOND – *Modified Newtonian Dynamics*), stworzona w 1983 roku przez izraelskiego fizyka Mordehaia MILGROMA²¹. Twierdzi on, iż do wyjaśnienia kształtu krzywych rotacji galaktyk spiralnych nie jest konieczne odwoływanie się do tajemniczej ciemnej materii. Stałą prędkość kątową orbitujących gwiazd można wytłumaczyć, nieznacznie modyfikując newtonowskie prawo grawitacji, tzn. przyjmując, że siła grawitacji nie maleje równomiernie z kwadratem odległości od centrum galaktyki i dlatego w zewnętrznych fragmentach dysku jest odpowiednio większa, co – przy odpowiednim doborze parametrów – daje stałą prędkość kątową rotacji. Chociaż teoria MILGROMA faktycznie wystarcza do wyjaśnienia płaskich krzywych rotacji, to jednak nie spotyka się ona z większym zainteresowaniem fizyków przede wszystkim z tego powodu, że w rzeczywistości sprowadza się ona do jednego arbitralnego założenia, które nie dość, że nie tłumaczy pozostałych wyników przemawiających za obecnością ciemnej materii (zwłaszcza soczewkowania grawitacyjnego i dynamiki gromad galaktyk), to nie znajduje również żadnego zastosowania w innych problemach współczesnej fizyki. Ponadto nie jest to teoria relatywistyczna i dlatego nie można jej zweryfikować za pomocą danych dotyczących np. promieniowania tła albo ekspansji Wszechświata.

²¹ MILGROM, A Modification.

Zwolennicy MILGROMA podjęli wiele prób zbudowania relatywistycznej wersji teorii MOND – zwłaszcza takiej wersji, która byłaby w stanie wyjaśnić efekt soczewkowania grawitacyjnego bez udziału ciemnej materii. Dwie najbardziej znane próby takiego uogólnienia to teoria grawitacji tensorowo-wektorowo-skalarnej, czyli TeVeS (*Tensor-Vector-Skalar*), zaproponowana w roku 2004 przez Jacoba D. BECKENSTEINA²², oraz pochodząca z roku 2006 teoria oznaczana akronimami STVG (*SkalarTensor-Vector Gravity*) lub MOG (*Modified Gravity*) autorstwa Johna W. MOFFATA²³. W obydwu przypadkach teoria względności zostaje zmodyfikowana w taki sposób, by siła grawitacji rosła tam, gdzie powinna się znajdować – jak wynika z obserwacji – dodatkowa, niewidoczna masa (np. na peryferiach dysków galaktycznych albo w miejscach, w których znajdują się soczewki grawitacyjne). Niestety, żadna z tych teorii nie spotkała się z większym zainteresowaniem fizyków – przede wszystkim z tego powodu, że postulat modyfikacji dobrze potwierdzonych teorii fizycznych (teorii Newtona i OTW) wydaje się bardziej radykalny i zarazem mniej uzasadniony niż postulat ciemnej materii.

Ciemna energia również ma swoich przeciwników, którzy przede wszystkim kwestionują interpretację wiążącą zaobserwowane pociemnienie supernowych z przyspieszeniem ekspansji Wszechświata. Sądzą oni, że mniejszą jasność supernowych można wyjaśnić bez przyjmowania ciemnej energii, jeśli interpretację uzyskanych wyników przeprowadzi się w ramach jednego z modeli niejednorodnych – np. modelu LEMAÎTRE’A-TOLMANA. Zwolennicy tego poglądu – np. Andrzej KRASIŃSKI i Krzysztof BOLEJKO²⁴ – uważają, że we współczesnej kosmologii relatywistycznej przyjmuje się zasadę kosmologiczną, która nie jest spełniona w fizycznym Wszechświecie (przemawiają za tym najnowsze odkrycia struktur takich jak Wielki Mur SŁOANA, Wielki Mur CfA2 albo Hüge-LQG). W konsekwencji, znakomitą większość ważnych zagadnień kosmologicznych – w tym również pro-

²² BECKENSTEIN, *Relativistic Gravitation Theory*.

²³ MOFFAT, *Scalar*.

²⁴ Por. KRASIŃSKI, *Inhomogeneous Cosmological Models*; BOLEJKO, CÉLÉRIER & KRASIŃSKI, *Inhomogeneous Cosmological Models*.

blem brakującej masy – rozwiązuje się w ramach modeli jednorodnych i izotropowych (modeli FRIEDMANA-LEMAÎTRE’A-ROBERTSONA-WALKERA), które maksymalnie upraszczają całą dynamikę czasoprzestrzeni. Uproszczenie takie co prawda ułatwia rachunki, ale zarazem prowadzi do błędnego interpretowania wyników obserwacji astronomicznych – takich np. jak pociemnienie supernowych. Ten ostatni wynik w modelach symetrycznych jest bowiem wiązany z przyspieszeniem ekspansji Wszechświata i dlatego samo przyspieszenie traktowane jest w kategoriach zaobserwowanego wyniku, który domaga się wyjaśnienia. W rzeczywistości jednak – argumentuje KRASIŃSKI – „przyspieszona ekspansja nie jest obserwowanym zjawiskiem wymagającym wyjaśnienia, tylko elementem interpretacji, związanym z przyjętą *a priori* klasą modeli [FL]RW”²⁵. Wyjaśniać zatem należy nie przyspieszenie ekspansji, ale związek zachodzący pomiędzy obserwowaną jasnością supernowych i ich przesunięciem ku czerwieni. Relacja pomiędzy tymi wielkościami jest identyczna w modelu FLRW i w modelu LEMAÎTRE’A-TOLMANA, co oznacza, że obydwa modele tak samo dobrze wyjaśniają pociemnienie supernowych. Z jedną wszakże istotną różnicą: w modelu LEMAÎTRE’A-TOLMANA ten sam wynik zostaje uzyskany przy zerowej stałej kosmologicznej, to znaczy przy opóźnionej (a nie przyspieszonej) ekspansji Wszechświata²⁶.

Teoria ta stanowi interesującą alternatywę dla idei ciemnej energii, choć – podobnie jak wspomniana wcześniej teoria MOND – nie spotkała się ona z entuzjazmem fizyków, którzy nie chcą tak łatwo zrezygnować z zasady kosmologicznej, będącej jednym z kluczowych założeń przyjmowanych w kosmologii relatywistycznej. Poza tym, nawet jeśli koncepcja ta faktycznie pozwala wyjaśnić zaobserwowane pociemnienie supernowych bez konieczności odwoływania się do ciemnej energii, to jednak nie rozwiązuje to wszystkich innych trudności związanych z problemem brakującej masy – zwłaszcza tych jego aspektów, które dotyczą ciemnej materii.

²⁵ KRASIŃSKI, O modelach, s. 102.

²⁶ BOLEJKO, KRASIŃSKI et al. Imitating Accelerated Expansion.

4. Uwagi na zakończenie

W ostatnich dwóch dekadach ubiegłego wieku wyniki przeprowadzonych obserwacji przekonały fizyków, że problem brakującej masy nie jest jedynie pozorną, ale bardzo realną trudnością interpretacyjną, która domaga się pilnego wyjaśnienia. Poszukiwanie tego wyjaśnienia doprowadziło do „odkrycia” ciemnej materii i ciemnej energii – słowo „odkrycie” ujęte zostało w cudzysłowie z tej racji, że jak na razie zarówno ciemną materię, jak i ciemną energię należy raczej zaliczyć do tworów czysto hipotetycznych. Żadne z doświadczeń zmierzających do eksperymentalnego wykrycia cząstek tworzących ciemną materię nie zakończyło się bowiem sukcesem; nie ma również zbyt wielu pomysłów na to, w jaki sposób można by w laboratoriach testować fizyczne własności ciemnej energii. Pomimo tych problemów idea ciemnej materii i ciemnej energii – dwóch tajemniczych „składników” Wszechświata, które bilansują jego masę – została włączona do kanonu współczesnej fizyki i wiele wskazuje na to, że zadomowiła się ona na dobre, zwłaszcza w kosmologii relatywistycznej. W ramach tej dyscypliny mianem modelu „standardowego” czy wręcz „paradygmatycznego” określa się dziś właśnie ten model, w którym zasadniczy wkład do parametru gęstości daje ciemna materia i ciemna energia (jest to tzw. model Λ CDM)²⁷. Co prawda, istnieją wspomniane w poprzednim paragrafie teorie alternatywne, w których kwestionuje się koncepcje ciemnej materii i ciemnej energii, ale obecnie spotykają się one ze stosunkowo niewielkim zainteresowaniem.

Wiele wskazuje na to, że współczesna fizyka jest skazana na ciemną materię i ciemną energię. Pojęcia te pojawiły się na arenie nauki nagle i w ciągu zaledwie kilku dekad do tego stopnia zmieniły naukowy obraz świata, że niekiedy wprost mówi się o nowej rewolucji naukowej, która dokonała się za sprawą odkrycia ciemnej materii i ciemnej energii²⁸. W sensie ścisłym rewolucja ta dopiero zaczęła się

²⁷ Symbol Λ oznacza stałą kosmologiczną interpretowaną jako ciemna energia, a CDM (*cold dark matter*) tzw. zimną ciemną materię, tzn. materię złożoną z cząstek poruszających się z relatywnie małymi (względem c) prędkościami.

²⁸ „Współcześni kosmolodzy, podobnie jak większość naukowców (nie wspominając o popularyzatorach nauki), lubią metaforę rewolucji, i trochę bezkrytycznie się do

dokonywać: fizycy doskonale zdają sobie sprawę z tego, że rozwiązanie problemu brakującej masy poprzez wskazanie na ciemną materię i ciemną energię to dopiero początek drogi prowadzącej do ostatecznego wyjaśnienia tej trudności. Niemożność wykrycia cząstek tworzących ciemną materię doprowadziła obecnie do pewnego impasu, i nic dziwnego, że w publikacjach naukowych, poświęconych tej tematyce w kilku ostatnich latach, można dostrzec oznaki nerwowego wyczekiwania na dalszy rozwój sytuacji – to znaczy albo na uzyskanie empirycznych dowodów na obecność ciemnej materii i ciemnej energii, albo na znalezienie jakiegoś fundamentalnego błędu w dotychczasowym rozumowaniu lub jakiejś dodatkowej przesłanki, która sprawi, że fizycy przekonają się do słuszności teorii alternatywnych lub znajdą rozwiązanie problemu brakującej masy na jakiejś innej drodze.

Nie ulega wątpliwości, że niezależnie od tego, która z tych dwóch możliwości się zrealizuje, naukowy obraz świata czekają radykalne zmiany. Jeśli faktycznie istnieje wypełniająca Wszechświat ciemna materia i przyspieszająca jego ekspansję ciemna energia, to znaczy że nauka (a pośrednio również filozofia, oparta na naukowym obrazie świata) miała do tej pory dostęp jedynie do niecałych 5% tego, co tworzy fizyczny Wszechświat. Czy w związku z tym można zakładać, że tak niewielki fragment jest reprezentatywną próbką całości? Nie widać żadnej racji, dla której odpowiedź na to pytanie miałyby być *a priori* pozytywna. Jeśli zaś jest negatywna, to cały dorobek nowożytnej nauki – wszystkie ustalenia poczynione nie tylko w ramach fizyki, ale także wielu innych dyscyplin przyrodniczych – można łatwo zakwestionować. Porównywalne konsekwencje ma również odrzucenie ciemnej materii i ciemnej energii oraz rozwiązanie problemu brakującej masy na drodze modyfikacji dotychczasowych ustaleń nauki (np. zakwestionowanie powszechnej obowiązywalności prawa grawitacji albo rezygnacja z zasady kosmologicznej).

niej bez przerwy odwołują. Stale mówią o ‘paradygmacie CDM’ i obecnej ‘rewolucji’ wynikającej z odkrycia przyspieszającego wszechświata rzekomo wypełnionego ciemną materią i ciemną energią” (KRAUGH, *Conceptions of Cosmos*, s. 245).

A może zasada *tertium non datur* w tym przypadku nie obowiązuje? Może istnieje taki sposób rozwiązania problemu brakującej masy, który nie będzie domagał się radykalnej rewizji obrazu świata? Na horyzoncie nauki, jak na razie, nie widać rozstrzygających odpowiedzi na te pytania.

Summary

The missing mass problem is a serious and troublesome difficulty which appeared in physics at the end of the 20th century. At that time, scientists discovered that the Universe contains much more matter than was previously thought to be the case. It turned out that the matter we can see is only a small part of all of the matter that the Universe is composed of. To solve this problem, it was necessary to identify the missing mass. Physicists identified it as "dark matter" and "dark energy". In the first part of this paper, the arguments in favor of the existence of the missing mass are presented, while in the second, the hypotheses of dark matter and dark energy are introduced. In the third, some alternative explanations of the missing mass problem are discussed. The closing summary then contains some remarks on the consequences of this problem for the future development of science, and it is argued that one of these corresponds to a serious change in our scientific and philosophical worldview.

Key words: missing mass – dark matter – dark energy

Literatura

- ADAMSON, P., Measurement of the Neutrino Mass Splitting and Flavor Mixing by MINOS, *Physical Review Letters* 106, arXiv:1103.0340v1 [hep-ex] (2011), 181801(1–6), URL : <http://arxiv.org/pdf/1103.0340v1.pdf>, 127 additional authors not shown.
- ADE, P.A.R., Planck 2013 Results. Cosmological Parameters, [w:] arXiv:1303.5076v1 [astro-ph.CO] (2013), URL : <http://arxiv.org/pdf/1303.5076v2.pdf>, 260 additional authors not shown.

- BABCOCK, H.W., The Rotation of the Andromeda Nebula, *Lick Observatory Bulletin* 498 (1939), s. 41–51.
- BECKENSTEIN, J.D., Relativistic Gravitation Theory for the Modified Newtonian Dynamics Paradigm, *Physical Review D* 70 (2004), 083509(1–28), arXiv:0403694v6 [astro-ph], URL : <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0403694v6.pdf>.
- BERTONE, G., [red.] *Particle Dark Matter: Observations, Models and Searches*, Cambridge : Cambridge University Press, 2010.
- BOLEJKO, K., M.N. CÉLÉRIER & A. KRASIŃSKI, Inhomogeneous Cosmological Models: Exact Solutions and their Applications, *Classical and Quantum Gravity* 28 (2011), 164002(1–30), arXiv:1102.1449v2 [astro-ph.CO], URL : <http://arxiv.org/pdf/1102.1449.pdf>.
- BOLEJKO, K., A. KRASIŃSKI, C. HELLABY & M.N. CÉLÉRIER, Imitating Accelerated Expansion of the Universe by Matter Inhomogeneities – Corrections of Some Misunderstandings, *General Relativity and Gravitation* 42(10) (2010), s. 2453–2475.
- BOSMA, A., *The Distribution and Kinematics of Neutral Hydrogen in Spiral Galaxies of Various Morphological Types (PhD dissertation)*, Groningen : The University of Groningen, 1978.
- CLARKE, A.M., *Problems in Astrophysics*, London : Adam & Charles Black, 1903.
- EINSTEIN, A., Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie, *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften* 1 (1917), s. 142–152.
- GLANZ, J., Astronomers See a Cosmic Antigravity Force at Work, *Science* 279 (1998), s. 1298–1299.
- Gravitational Lens*, HubbleSite – NewsCenter, 4 grud. 2013, URL : <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/exotic/gravitational-lens/>.
- JEANS, J.H., The Motion of Stars in a Kapteyn Universe, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 82 (1922), s. 122–132.
- KRAGH, H., *Conceptions of Cosmos. From Myths to Accelerating Universe: A History of Cosmology*, Oxford : Oxford University Press, 2007.

- KRASIŃSKI, A., *Inhomogeneous Cosmological Models*, Cambridge : Cambridge University Press, 1997.
- KRASIŃSKI, A., O modelach kosmologicznych i niektórych związanych z nimi nieporozumieniach, *Postępy Fizyki* 60(3) (2009), s. 98–108, URL :
<http://users.camk.edu.pl/akr/2009modkosm.pdf>.
- MILGROM, M., A Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis, *The Astrophysical Journal* 270 (1983), s. 365–370.
- MOFFAT, J.W., Scalar-Tensor-Vector Gravity Theory, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 03 (2006), 004, arXiv:0506021v7 [gr-qc], URL :
<http://arxiv.org/pdf/gr-qc/0506021.pdf>.
- OORT, J.H., The Force Exerted by the Stellar System in the Direction Perpendicular to the Galactic Plane and Some Related Problems, *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands* 6 (1932), s. 249–287.
- OSTRIKER, J.P. & P.J.E. PEEBLES, A Numerical Study of the Stability of Flattened Galaxies: or, Can Cold Galaxies Survive?, *The Astrophysical Journal* 186 (1973), s. 467–480.
- OSTRIKER, J.P., P.J.E. PEEBLES & A. YAHIL, The Size and Mass of Galaxies, and the Mass of the Universe, *The Astrophysical Journal* 193 (1974), s. L1–L4.
- PANEK, R., *Ciemna strona Wszechświata. W poszukiwaniu brakujących składników rzeczywistości*, Warszawa : Prószyński i S-ka, 2011.
- PEEBLES, P.J.E. & B. RATRA, Cosmology with a Time-Variable Cosmological «Constant», *The Astrophysical Journal* 325 (1988), s. L17–L20.
- RIESS, G., Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant, *The Astronomical Journal* 116(3), arXiv: 9805201 v1 [astro-ph] (1998), s. 1009–1038, URL :
<http://arxiv.org/pdf/astro-ph/9805201v1.pdf>, 18 additional authors not shown.

- ROBERTS, M.S., The Rotation Curves of Galaxies, [w:] *Dynamics of Stellar Systems*, [red.] A. HAYLI, Dordrecht : Reidel, 1975, s. 331–340.
- RUBIN, V.C., J. BURLEY, A. KIASATPOOR, B. KLOCK, G. PEASE, E. RUTSCHEIDT & C. SMITH, Kinematic Studies of Early-Type Stars, I: Photometric Survey, Space Motions, and Comparison with Radio Observations, *Astronomical Journal* 67 (1962), s. 491–531.
- RUBIN, V.C., W.K. FORD & J.N. THONNARD, Rotational Properties of 21 Sc Galaxies with a Large Range of Luminosity and Radii, from NGC 4605 ($R = 4$ kpc) to UGC 2885 ($R = 122$ kpc), *The Astrophysical Journal* 238 (1980), s. 471–487.
- SCIAMA, D.W., *Modern Cosmology and the Dark Matter Problem*, Cambridge : Cambridge University Press, 1993.
- SMITH, S., The Mass of the Virgo Cluster, *The Astrophysical Journal* 83 (1936), s. 23–30.
- TAOSO, M., G. BERTONE & A. MASIERO, Dark Matter Candidates: A Ten-Point Test, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 03, arXiv:0711.4996v2 [astro-ph] (2008), URL : <http://arxiv.org/pdf/0711.4996.pdf>.
- THOMAS, S.A., F.B. ABDALLA & O. LAHAV, Upper Bound of 0.28 eV on Neutrino Masses from the Largest Photometric Redshift Survey, *Physical Review Letters* 105(3), arXiv:0911.5291v2 [astro-ph.CO] (2010), 031301(1–4), URL : http://arxiv.org/pdf/0911.5291.pdf?origin=publication_detail.
- TSUJIKAWA, S., Dark Energy: Investigation and Modeling, [w:] *Dark Matter and Dark Energy. A Challenge for Modern Cosmology*, [red.] S. MATARRESE, M. COLPI, V. GORINI & U. MOSCHELLA, Dordrecht, New York : Springer, 2011, s. 331–402.
- ZWICKY, F., Die Rotveschiebung von extragalaktischen Nebeln, *Helvetica Physica Acta* 6 (1933), s. 110–127.