

O naukowych i filozoficznych implikacjach problemu brakującej masy

Tadeusz Pabjan

Uniwersytet Papieski Jana Pawła II, Kraków

On the Scientific and Philosophical Implications of the Missing Mass Problem

Summary

The article deals with the so called missing mass problem which during the last three decades has become one of the most serious difficulties in physics. There is some strong empirical evidence that the Universe contains not only matter that can be seen (by telescopes or radio telescopes) but the huge quantities of the unseen matter as well. The ordinary matter known to physics is but a small part of all matter the Universe is composed of. The missing mass is supposed to be in the form of the dark matter and the dark energy. In the paper the arguments in favor of the existence of these two entities are outlined, and some scientific as well as philosophical implications of the missing mass problem are discussed. It is argued that all the proposed solutions of this problem lead to serious changes in the scientific and philosophical worldview.

Keywords

Missing Mass Problem, dark matter, dark energy, cosmology, philosophy of physics.

1. Teorie naukowe a obraz świata

W filozofii nauki od dawna toczy się spór dotyczący tego, w jakiej relacji teorie fizyczne pozostają do świata przyrody. Nie ulega wątpliwości, że teorie muszą się w jakiś sposób odnosić do świata i go opisywać. Co do tego zgadzają się z sobą zarówno fizycy, jak i filozofowie nauki, choć wiadomo skądinąd, że „odnoszenie się” teorii do świata i jego „opisywanie” to kategorie wyjątkowo niejednoznaczne i mało precyzyjne. W przypadku teorii zmatematyzowanych można mówić o swego rodzaju odniesieniu zachodzącym pomiędzy matematycznym formalizmem i dziedziną teorii, którą stanowi właśnie świat przyrody (lub przynajmniej pewien jego fragment lub aspekt). Problem pojawia się wtedy, gdy przedmiotem dyskusji staje się „wyjaśnianie” świata. Czy teorie fizyczne tylko świat opisują, czy również dostarczają jego wyjaśnienia? Dwie możliwe odpowiedzi na to pytanie dzielą dyskutantów na dwa obozy gromadzące zwolenników pierwszej (teorie tylko opisują) i drugiej (teorie również wyjaśniają) możliwości. Jest też kontrowersja dotycząca „realizmu” i „istnienia” świata opisywanego (względnie wyjaśnianego) przez teorie fizyczne. „Realizm” i „istnienie” to kategorie filozoficzne, a nie naukowe, dlatego fizyka – w sensie

ściłym – nie zajmuje się ani istnieniem świata, ani problemem jego rzeczywistości. To właśnie z tego powodu uczeni mogą z powodzeniem tworzyć i testować teorie fizyczne, całkowicie ignorując problematykę realnego istnienia tego, co w danym przypadku opisuje (lub wyjaśnia) teoria, którą aktualnie się zajmują. Oczywiście nie zmienia tego stanu rzeczy to, że w gronie fizyków trudno byłoby znaleźć kogoś, kto wątpi w realne istnienie aparatury pomiarowej lub choćby kartki papieru służącej do zapisania równań tworzących formalizm teorii.

Polemika dotycząca „opisywania” i „wyjaśniania” świata przyrody oraz jego „realnego istnienia” nie jest tylko – wbrew temu, co mogłoby się wydawać postronnemu obserwatorowi – czysto akademicką dyskusją, której wynik nie ma żadnego praktycznego znaczenia. Wiele wskazuje na to, że przyjęte w tej dyskusji rozstrzygnięcia w zasadniczy sposób decydują na przykład o tak zwanym naukowym obrazie świata. Tego, czym jest naukowy obraz świata, nie da się ująć w żadnej prostej i zarazem jednoznacznej „definicji”¹, ale na potrzeby niniejszego opracowania wystarczy przyjąć, że jest to ogół informacji dotyczących struktury świata przyrody i zasad decydujących o funkcjonowaniu jego poszczególnych elementów, które mają swoje

¹ Por. np. M. Lubański, *Uwagi w sprawie tzw. naukowego obrazu świata*, [w:] *Obrazy świata w teologii i naukach przyrodniczych*, red. M. Heller, S. Budzik, S. Wszolek, Biblos, Tarnów 1996, s. 28–42; J. Życiński, *Metafizyka i wyobrażenia w przyrodniczym obrazie świata*, [w:] tamże, s. 78–93; M. Heller, *Naukowy obraz świata a zadanie teologa*, [w:] tamże, s. 13–27.

źródło w teoriach naukowych obowiązujących w danej epoce. Co istotne, informacje te niejako z założenia dotyczą nie „jakiegokolwiek” świata, ale tego, który realnie istnieje i który w języku potocznym określa się najczęściej intuicyjnie zrozumiałymi przymiotnikami „prawdziwy” albo „fizyczny”. To właśnie z tego powodu istnieje wyraźny związek między tak pojmowanym obrazem świata i relacją zachodzącą pomiędzy teoriami fizycznymi a światem przyrody. Tytułem przykładu – jeśli jakaś teoria jest dobrze potwierdzona empirycznie, to nie ma żadnych podstaw, by wątpić w to, że świat „prawdziwy”, to znaczy ten, który realnie istnieje, charakteryzuje się własnościami ujawnionymi podczas eksperymentów przeprowadzanych w celu potwierdzenia tej teorii. Jeśli zaś wyniki doświadczeń stawiają poprawność tej teorii pod znakiem zapytania, to przypisywanie realnie istniejącemu światu wynikających z niej cech jest w najwyższym stopniu nieuzasadnione – zbudowany na jej podstawie obraz świata będzie bowiem najzwyczajniej w świecie nieprawdziwy.

Historia nauki dostarcza wielu wymownych przykładów na to, że wyniki eksperymentów potwierdzających różnego rodzaju teorie fizyczne prowadziły niejednokrotnie do istotnych korektur w naukowym obrazie świata. Od momentu narodzin nowożytnej nauki liczba tych korektur systematycznie spada, co można traktować jako istotną rację za tym, że nauka w coraz bardziej wiarygodny sposób mówi, jak *naprawdę* wygląda świat. Chronologicznie ostatnie „poprawki”, które w zasadniczy sposób wpłynęły na obraz świata, zostały wprowadzone w pierwszych dekadach XX wieku za sprawą teorii względno-

ści (i zbudowanej na jej podstawie kosmologii relatywistycznej) oraz mechaniki kwantowej. To właśnie te dwie teorie mają obecnie status fundamentu, na którym wznosi się cały gmach współczesnej fizyki. Co prawda fundament ten ciągle jeszcze nie jest spójną całością – jak do tej pory nikomu nie udało się połączyć z sobą tych teorii (w kwantową teorię grawitacji) – ale i bez tego niekwestionowane sukcesy kosmologii relatywistycznej i mechaniki kwantowej sprawiły, że w drugiej połowie XX wieku w świecie naukowym utrwaliło się przekonanie o zasadniczej poprawności obrazu świata zbudowanego na bazie tych teorii. Dzięki publicystyce popularnonaukowej przekonanie to w niedługim czasie przeniknęło również do świadomości laików.

Niestety, w ostatnich dekadach ubiegłego stulecia na fundamencie fizyki zaczęła pojawiać się rysa, która z każdym rokiem stawała się coraz większym i coraz bardziej wyraźnym pęknięciem. Mowa o problemie brakującej masy. Pęknięcie na fundamencie zagraża konstrukcji całego gmachu, nic więc dziwnego, że przedstawiciele kilku odrębnych dyscyplin naukowych – m.in. astrofizyki, astronomii, kosmologii relatywistycznej i fizyki cząstek elementarnych – od kilkunastu lat starają się znaleźć rozwiązanie tego problemu. Jak na razie usiłowania te nie zostały uwieńczone pełnym sukcesem. Wiele jednak wskazuje na to, że – niezależnie od tego, które z proponowanych rozwiązań tej trudności okaże się właściwe – problem brakującej masy przyczyni się do kolejnej i na dodatek bardzo radykalnej zmiany naukowego, a w konsekwencji również filozoficznego, obrazu świata.

2. Masa, której nie widać

Istnieje interesujący mechanizm dotyczący założeń lub przesłanek przyjmowanych podczas przeprowadzania różnego rodzaju analiz naukowych. Założeniom nieoczywistym i wątpliwym poświęca się zawsze więcej uwagi niż tym, które nie budzą żadnych wątpliwości. Im bardziej dane założenie wydaje się naturalne i oczywiste, tym mniejsze budzi zainteresowanie. O najbardziej oczywistych założeniach najczęściej w ogóle się nie dyskutuje – przyjmuje się je milcząco, zakładając, że nie potrzebują żadnego uzasadnienia (co samo w sobie jest swego rodzaju metazałożeniem, czyli założeniem dotyczącym założenia). Mechanizm ten funkcjonuje również w filozofii, ale jego działanie jest w tym przypadku osłabione; charakter tej dyscypliny decyduje bowiem o tym, że wszelkiego rodzaju założenia – również te „oczywiste” – niejako *z założenia* są tu przedmiotem starannych analiz. Ale nawet w filozofii dosyć często się zdarza, że określone prawdy lub idee przyjmuje się, w punkcie wyjścia pomijając ich uzasadnienie. Nawet jeśli formalnie nie mają one rangi aksjomatu, który decyduje o poprawności wszystkich pozostałych analiz lub twierdzeń formułowanych w ramach danego systemu filozoficznego, to i tak przynajmniej do pewnego stopnia warunkują one jego spójność. Ponieważ zaś analizy filozoficzne opierają się na naukowym obrazie świata, „oczywiste” przesłanki przyjmowane milcząco w naukach empirycznych stają się zarazem „oczywistymi” prawdami filozofii.

Najlepszym przykładem założenia, które zdaje się nie potrzebować żadnego uzasadnienia i które występuje zarówno w analizach ściśle naukowych, jak i filozoficznych, jest to, że fizyczny Wszechświat jest zbudowany z materii. Czy można sobie wyobrazić stwierdzenie bardziej oczywiste? Z czego miałyby być zbudowany fizyczny Wszechświat jeśli nie z materii? Zarówno doświadczenie potoczne, jak i ściśle naukowe wydają się nie pozostawiać co do tego żadnych wątpliwości. Od wczesnej starożytności to właśnie materii poświęcali swoją uwagę myśliciele wszystkich epok filozoficznych, a w czasach nowożytnych dodatkowo stała się ona przedmiotem zainteresowania fizyków, chemików i przedstawicieli wszystkich innych nauk empirycznych. Mówiąc o materii, obydwie grupy zasadniczo posługiwały się nieco innymi terminami (ponieważ określenie „materia” jest pojęciem filozoficznym i nie ma sensu operacyjnego, w naukach empirycznych termin ten zastąpiono „masą”, „energiją” itp.²), ale co do jednego były zgodne: materię można bez większego problemu – za pomocą samych zmysłów albo odpowiednich urządzeń, takich jak mikroskopy, teleskopy, różnego rodzaju detektory itp. – zidentyfikować. Nikt nie miał również większych wątpliwości co do tego, że „ilość materii” – czyli jej masę³ – przynajmniej teoretycznie można oszacować, dodając

² Por. M. Heller, *Ewolucja pojęcia masy*, „Analecta Cracoviensia” 1982, 14, s. 79–91.

³ Przejście od filozoficznego pojęcia „materii” do fizykalnego (operacyjnego) rozumienia „masy” po raz pierwszy wykonał Newton: „Ilość materii jest jej miarą wynikającą z jej gęstości i objętości (...)

do siebie masy wszystkich ciał, z których zbudowany jest Wszechświat. Mocne argumenty za słusnością tego wniosku pojawiły się zwłaszcza wtedy, gdy rozwój astronomii i radioastronomii umożliwił dokładne poznawanie wielkoskalowych struktur Wszechświata. Wydawało się czymś oczywistym to, że aby określić ilość materii zawartej w danym obszarze przestrzeni, należy jedynie dodać do siebie masy wszystkich gwiazd, planet, pyłu, gazu i innych obiektów tworzących galaktyki, a następnie pomnożyć uzyskany wynik przez liczbę galaktyk znajdujących się w tym obszarze. Zakładając, że słuszna jest zasada kosmologiczna, która głosi, iż Wszechświat w największej skali jest jednorodny i izotropowy, można w ten sposób uzyskać wiarygodne oszacowanie całkowitej masy Wszechświata. Innymi słowy: można ustalić, ile znajduje się w nim materii.

W ostatnich dekadach XX wieku zaczęło jednak pojawiać się coraz więcej argumentów przemawiających za tym, że Wszechświat w większej części zbudowany jest z czegoś, co nie jest zwykłą materią, i że jego całkowita masa jest wielokrotnie większa, niż wcześniej sądzono, opierając się na wynikach prostego sumowania mas obiektów znanych z obserwacji astronomicznych i radioastronomicznych. Oznaczało to, że dotychczasowe ustalenia dotyczące całkowitej masy Wszechświata nie były poprawne i że muszą gdzieś istnieć znaczne ilości dodatkowej, niezidentyfikowanej materii, którą należy uwzględnić przy

tę właśnie ilość materii będą rozumiał pod pojęciem ciała lub masy”;

I. Newton, *Matematyczne zasady filozofii przyrody*, tłum. J. Wawrzycycki, Copernicus Center Press, Kraków 2011, s. 185–186.

tego typu oszacowaniach. Z przeprowadzanych obliczeń wynikało, że wszystkie znane do tej pory postaci materii stanowią zaledwie niecałe 5% całkowitej masy Wszechświata. Co odpowiada za pozostałe 95% jego masy? Poszukiwanie odpowiedzi na to pytanie doprowadziło do odkrycia ciemnej materii i ciemnej energii.

3. Ciemna materia

Historia problemu brakującej masy przypomina obszerną i wielowątkową powieść kryminalną, w której pracujący niezależnie od siebie detektywi analizują ślady pozostawione przez ukrywającego się przestępcę i na podstawie tych analiz próbują ujawnić jego tożsamość oraz określić miejsce, gdzie aktualnie się znajduje⁴. Pierwsze rozdziały tej historii zostały napisane na początku XX wieku przez kilku astronomów – m.in. Jamesa Jeansa, Jacobusa Kapteyna i Ernsta Öpika⁵ – którzy zwrócili

⁴ Por. np.: D.W. Sciama, *Modern Cosmology and the Dark Matter Problem*, Cambridge University Press, Cambridge 1993; *Particle Dark Matter: Observations, Models and Searches*, red. G. Bertone, Cambridge University Press, Cambridge 2010; R. Panek, *Ciemna strona Wszechświata. W poszukiwaniu brakujących składników rzeczywistości*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2011.

⁵ J.H. Jeans, *The Motion of Stars in a Kapteyn Universe*, „Monthly Notices of the Royal Astronomical Society” 1922, 82, s. 122–132; J.C. Kapteyn, *First Attempt at a Theory of the Arrangement and Motion of the Sidereal System*, „The Astrophysical Journal” 1922, 55, s. 302; E. Öpik, *Selective Absorption of Light in Space, and the*

uwagę na to, że przestrzeń kosmiczną zapełniają nie tylko ciała niebieskie możliwe do zaobserwowania za pomocą teleskopów, ale również obiekty, które z różnych przyczyn nie emitują światła (planety, księżycy planet, wygasłe gwiazdy itp.) lub emitują go zbyt mało (np. gasnące lub odległe gwiazdy), by udało się je zaobserwować. W latach 30. ubiegłego wieku tę prostą sugestię zaczęto uzupełniać argumentami opartymi na obserwacjach ruchów gwiazd w galaktykach oraz ruchów galaktyk w gromadach. W roku 1932 holenderski astronom Jan Hendrik Oort zauważył, że obserwowane prędkości kątowe gwiazd (zwłaszcza w gromadach kulistych) Drogi Mlecznej można wyjaśnić jedynie obecnością znacznych ilości oddziałującej grawitacyjnie niewidocznej materii, która zalega w płaszczyźnie dysku⁶. Uwzględniając wielkość siły grawitacji koniecznej do zapewnienia stabilności galaktyce, Oort wyliczył, że niewidocznej materii powinno być co najmniej dwukrotnie więcej niż materii świecącej.

Podobne analizy przeprowadził również w tym samym czasie inny astronom – Fritz Zwicky, który zainteresował się dynamiką ośmiu galaktyk w gromadzie Coma (Abell 1656) w Warkoczu Bereniki⁷. Okazało się, że obserwowane prędkości galaktyk

Dynamics of the Universe, „Bulletin de la Société Astronomique de Russie” 1915, 21, s. 150–158.

⁶ J.H. Oort, *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” 1932, 6, s. 249–287.

⁷ F. Zwicky, *Die Rotveschiebung von extragalaktischen Nebeln*, „Helvetica Physica Acta” 1933, 6, s. 110–127.

znacznie przekraczają prędkość ucieczki wynikającą z oddziaływania grawitacyjnego określonego na podstawie ilości światła emitowanego przez tę gromadę. Zwicky doszedł do wniosku, że tak znaczne prędkości nie rozrywają gromady, ponieważ generowana przez nią siła grawitacji (od której zależy prędkość ucieczki) jest w rzeczywistości znacznie większa, niż wcześniej zakładano. Zwicky zaproponował następujące wyjaśnienie tej rozbieżności: „średnia gęstość systemu Coma musi być co najmniej 400 razy większa niż ta, która wynika z obserwacji materii świecącej”, co oznacza, że „gęstość ciemnej materii jest [tam] nieporównywalnie większa niż materii świecącej”⁸. Do podobnych wniosków doszedł w 1936 roku Sinclair Smith, który przeprowadził obserwacje galaktyk należących do gromady w konstelacji Panny (Abell 1882)⁹. Również i w tym przypadku gromada nie ulegała rozrywaniu, mimo że galaktyki poruszały się z prędkościami przekraczającymi prędkość ucieczki z gromady. Zdaniem Smitha nie można tego wytłumaczyć inaczej jak tylko obecnością „olbrzymiej masy międzygwiazdowej materii”¹⁰.

Kolejne argumenty za obecnością ciemnej materii pojawiły się w związku z rozwojem radioastronomii, która pozwoliła na badanie przestrzeni kosmicznej w zakresie fal radiowych pochodzących od neutralnego wodoru międzygwiazdowego, a także promieni rentgenowskich i promieni γ . Wyniki obserwacji

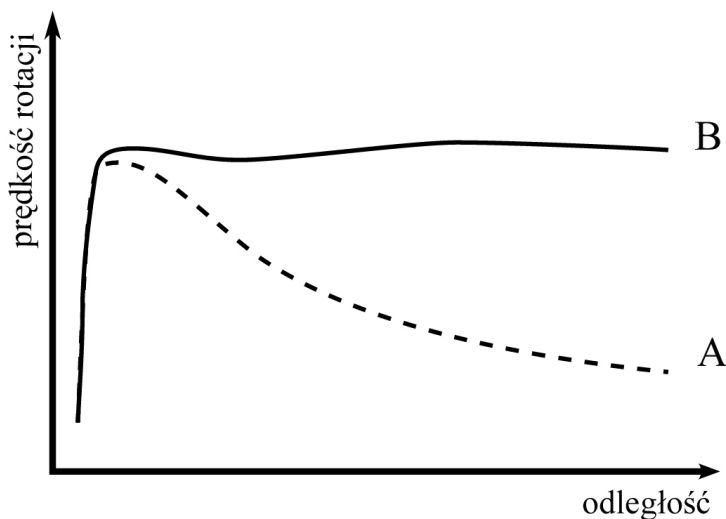
⁸ Tamże, s. 125.

⁹ S. Smith, *The Mass of the Virgo Cluster*, „The Astrophysical Journal” 1936, 83, s. 23–30.

¹⁰ Tamże, s. 23.

radioastronomicznych, które umożliwiły wgląd w wewnętrzną strukturę galaktyk, potwierdziły wcześniejsze przypuszczenia dotyczące obecności niewidocznej materii towarzyszącej galaktykom. Najciekawszych argumentów dostarczyła tu analiza krzywych rotacji galaktyk spiralnych.

Krzywa rotacji jest wykresem ukazującym zależność pomiędzy prędkością rotacji poszczególnych fragmentów dysku a ich odległością od centralnego zgrubienia galaktyki. Przez długi czas – aż do początku lat 70. ubiegłego wieku – astronomowie sądzili, że gwiazdy w galaktykach spiralnych poruszają się w sposób analogiczny do planet w Układzie Słonecznym: im dalej od centrum, tym mniejsza prędkość rotacji. Jak wiadomo, tego typu „planetarny” (keplerowski) rozkład prędkości charakteryzuje dowolny układ orbitalny, w którym całkowita masa układu jest skoncentrowana wewnątrz orbit. Siła grawitacji generowana przez tę masę maleje wówczas z kwadratem odległości i dlatego ciała orbitujące bliżej środka układu poruszają się szybciej niż te, które są od niego bardziej oddalone. Jeśli na osi pionowej wykresu zaznaczone są prędkości kątowe, a na osi poziomej odległości od centrum, to krzywa rotacji takiego układu łagodnie opada. Inaczej jest wtedy, gdy masa nie jest skoncentrowana wewnątrz orbit, po których poruszają się analizowane ciała, ale znajduje się na peryferiach całego układu (tworzy na przykład sferyczne halo rozciągające się poza orbity). W takim przypadku rozkład prędkości nie będzie już „planetarny”: prędkości kątowe orbitujących ciał będą w przybliżeniu stałe, a krzywa rotacji będzie płaska.



Krzywa rotacji: A – keplerowska (planetarna) krzywa rotacji, B – płaska krzywa rotacji.

Kiedy w 1939 roku amerykański astronom Horace Babcock po raz pierwszy wyznaczył krzywą rotacji galaktyki Andromedy, okazało się, że krzywa ta ma właśnie taki – to znaczy płaski – kształt¹¹. W roku 1962 identyczny wynik – tym razem dla Drogi Mlecznej – uzyskała Vera Rubin. Zmierzywszy prędkości orbitalne 888 gwiazd zlokalizowanych w bliskim sąsiedztwie Słońca, stwierdziła ona, że prędkości te nie maleją wraz ze wzrostem odległości od centrum galaktyki; w szczególności zaś „dla $R > 8,5$ kpc krzywa rotacji jest płaska i nie obniża się, jak

¹¹ H.W. Babcock, *The Rotation of the Andromeda Nebula*, „Lick Observatory Bulletin” 1939, 498, s. 41–51.

należałoby się spodziewać w przypadku orbit keplerowskich”¹². W następnych latach analogiczne wyniki zaczęli uzyskiwać inni astronomowie, którzy dowiedli, że płaskie krzywe rotacji charakteryzują nie tylko galaktykę Andromedy i Drogę Mleczną, ale również wiele innych galaktyk spiralnych¹³. Jedynym rozsądnym wyjaśnieniem tych wyników – na co po raz pierwszy zwrócił uwagę w 1970 roku Kenneth Freeman¹⁴ – było to, że musi istnieć w owych galaktykach dodatkowa materia, której nie można wykryć za pomocą obserwacji ani astronomicznych, ani radioastronomicznych. Komputerowe symulacje przeprowadzone między innymi przez Jeremiaha Ostriker’a i Jima Peebles’a dowiodły, że materia ta musi mieć kształt sferycznego lub trójosiowego halo, które z zewnątrz otacza dysk galaktyczny. Z wykonanych obliczeń wynikało, że masa halo powinna być nawet 10 razy większa niż masa samych dysków.

Jednym z najmocniejszych argumentów za obecnością ciemnej materii są zaobserwowane przypadki soczewkowania grawitacyjnego. Efekt soczewkowania pojawia się wtedy,

¹² V.C. Rubin i in., *Kinematic Studies of Early-Type Stars, I: Photometric Survey, Space Motions, and Comparison with Radio Observations*, „Astronomical Journal” 1962, 67, s. 491.

¹³ V.C. Rubin, 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” 1980, 238, s. 471–487; A. Bosma, *The Distribution and Kinematics of Neutral Hydrogen in Spiral Galaxies of Various Morphological Types*, Groningen 1978.

¹⁴ K.C. Freeman, *On the Disks of Spiral and S0 Galaxies*, „The Astrophysical Journal” 1970, 160, s. 811–830.

gdy na osi łączącej obserwatora i odległe źródło światła znajdzie się masywny obiekt – może nim być na przykład czarna dziura, galaktyka lub gromada galaktyk – który zagina i skupia promienie świetlne, wpływając na mniej lub bardziej wyraźne zniekształcenie tego, co jest przedmiotem obserwacji. Metoda badania rozkładu masy grawitacyjnej polegająca na wykorzystaniu tego mechanizmu ma fundamentalne znaczenie dla problemu ciemnej materii przede wszystkim z tego powodu, że efekt soczewkowania zachodzi również wtedy, gdy sam obiekt będący soczewką nie jest widoczny. Wystarczy, by obiekt taki miał odpowiednią masę: to właśnie masa – zgodnie z ogólną teorią względności – decyduje o zakrzywieniu czasoprzestrzeni i w konsekwencji o optycznym zniekształceniu odległego źródła światła.

Samo soczewkowanie grawitacyjne ma długą historię, ale dla problemu brakującej masy istotne okazały się te jej epizody, które nastąpiły w ostatnich dwóch dekadach ubiegłego wieku. W 1986 roku astronom Bohdan Paczyński opracował opartą na efekcie soczewkowania metodę wykrywania niewidocznych masywnych zwartych obiektów zlokalizowanych w halo Drogi Mlecznej¹⁵ określanych akronimem MACHO (*massive compact halo object*). Metoda ta dotyczy tzw. mikrosoczewkowania i sprowadza się do rejestrowania pojaśnienia odległej gwiazdy spowodowanego tym, że linię łączącą obserwatora i gwiazdę

¹⁵ B. Paczyński, *Gravitational Microlensing by the Galactic Halo*, „The Astrophysical Journal” 1986, 304, s. 1–5.

przecina MACHO. W niedługim czasie okazało się, że można w ten sposób wykrywać nie tylko masywne obiekty zlokalizowane w galaktycznym halo, ale również czarne dziury i planety pozasłoneczne znajdujące się w obrębie dysku Drogi Mlecznej. Soczewkę grawitacyjną mogą jednakże stanowić także obiekty takie jak galaktyki lub gromady galaktyk – dochodzi wówczas do „słabego” lub „mocnego” soczewkowania, które powoduje już nie pojaśnienie obserwowanego źródła światła (może nim być na przykład odległa galaktyka lub grupa galaktyk), ale jego wyraźne zniekształcenie bądź zwielokrotnienie. W połowie ostatniej dekady ubiegłego wieku Kosmiczny Teleskop Hubble’a zaczął dostarczać spektakularnych fotografii przedstawiających efekty właśnie takiego soczewkowania (np. Krzyż Einsteina, gromada Abell 2218, gromada Pocisk). Z przeprowadzonych obliczeń wynikało, że obiekty tworzące soczewki grawitacyjne muszą zawierać wielokrotnie (od ośmiu do dziesięciu razy) więcej ciemnej materii niż materii świecącej.

4. Bilans masy

Dla problemu brakującej masy kluczowe znaczenie ma to, ile we Wszechświecie jest ciemnej materii, albo raczej: w jakiej proporcji ciemna materia pozostaje do materii świecącej. Jeśli galaktyki i gromady galaktyk faktycznie są zdominowane przez niewidoczną masę, to jaki jest stosunek tej masy do zsumowanej masy gwiazd, gorącego gazu i wszystkich innych form materii,

która emituje światło? Aby odpowiedzieć na to pytanie, warto odwołać się do tzw. parametru gęstości Ω . Wielkość ta jest definiowana przez stosunek średniej gęstości materii Wszechświata do gęstości krytycznej, która charakteryzuje płaski model Friedmana (z zerową stałą kosmologiczną). Ponieważ wartość parametru gęstości jest zależna od ilości materii obecnej w czasoprzestrzeni, parametr ten w rzeczywistości decyduje o globalnej dynamice Wszechświata: dla płaskiego Wszechświata $\Omega = 1$, co oznacza, że gęstość materii jest w tym przypadku dokładnie równa gęstości krytycznej (gravitacja powstrzyma ekspansję Wszechświata, ale nie doprowadzi do jego kontrakcji); dla zamkniętego Wszechświata $\Omega > 1$, co oznacza, że gęstość materii jest większa od gęstości krytycznej (gravitacja zatrzyma ekspansję i doprowadzi do kontrakcji); dla otwartego Wszechświata $\Omega < 1$, co oznacza, że gęstość materii jest mniejsza od gęstości krytycznej (gravitacja nie zatrzyma ekspansji).

W obecnym Wszechświecie parametr gęstości jest niemal dokładnie równy jedności. Przemawia za tym kilka niezależnych racji, ale najbardziej przekonujące są wyniki pomiarów krzywizny przestrzeni wykonane przez sondy kosmiczne (COBE, WMAP, Planck) badające anizotropię mikrofalowego promieniowania tła. Z pomiarów tych wynika, że Wszechświat jest płaski; to zaś oznacza, że parametr gęstości w obecnym Wszechświecie musi być równy jedności.

Problem brakującej masy ujawnia się w całej swej okazałości, gdy ilość zwykłej materii stanowiącej budulec Wszechświata zostanie wyrażona właśnie w jednostkach parametru

gęstości. Okazuje się, że parametr ten dla gwiazd wynosi $\Omega_{\text{gwiazdy}} = 0,005$. Gwiazdy w połączeniu ze wszystkimi innymi znanymi obecnie postaciami materii barionowej, takimi jak międzygalaktyczny gaz, gwiazdy karłowate i neutronowe, czarne dziury, planety jowiszowe, komety, planetoidy, MACHO itd., dają swój wkład do parametru gęstości na poziomie 4,9% ($\Omega_{\text{bariony}} = 0,049$)¹⁶. Oznacza to, że „zwykła” materia – zbudowana z cząstek znanych współczesnej fizyce – stanowi jedynie 4,9% całkowitej masy materii tworzącej Wszechświat. W tym miejscu pojawia się frapujące pytanie: w jakiej postaci występuje pozostałe 95% tej masy? Naturalnym kandydatem do roli „substancji” wypełniającej dziurę globalnego bilansu masy jest ciemna materia, za której obecnością przemawiają argumenty przywołane w poprzednim paragrafie. Ponieważ materia ta oddziałuje grawitacyjnie (na przykład odpowiada za powstawanie soczewek grawitacyjnych i wpływa na kształt krzywych rotacji galaktyk spiralnych), ale zarazem nie może być zbudowana z barionów¹⁷, określa się ją mianem egzotycznej lub niebarionowej

¹⁶ Zob. P.A.R. Ade i in., (Planck Collaboration), 22 March 2013, *Planck 2013 Results. Cosmological Parameters*, arXiv:1303.5076v1, 20 III 2013, dostęp: 20 XI 2013.

¹⁷ Ilość barionów powstałych podczas pierwotnej nukleosyntezy wystarcza jedynie do uzyskania niecałych 5% gęstości krytycznej Wszechświata ($\Omega_{\text{bariony}} \approx 0,049$); por. np.: C.J. Copi, D.N. Schramm, M.S. Turner, *Big-Bang Nucleosynthesis and the Baryon Density of the Universe*, „Science” 1995, 267, s. 192–199; K. Jedamzik, M. Pospelov, *Particle Dark Matter and Big Bang Nucleosynthesis*, [w:] red. G. Bertone, dz. cyt., s. 565–585.

ciemnej materii. Parametr gęstości ustalony dla tej postaci materii wynosi $\Omega_{\text{nie bariony}} = 0,268$, co oznacza, że ciemnej egzotycznej materii jest ponad pięciokrotnie więcej niż materii zbudowanej z barionów. Fizycy od wielu lat poszukują cząstek, które można byłoby uznać za budulec tej formy materii. Wiadomo, że cząstki te nie tworzą atomów i nie niosą żadnych ładunków elektrycznych; nie mają wpływu ani na proces nukleosyntezy i rekombinacji, ani na powstawanie pierwiastków we wnętrzach gwiazd, i zasadniczo są bezkolizyjne, to znaczy nie oddziałują ze zwykłą (barionową) materią za pośrednictwem sił elektromagnetycznych i jądrowych silnych¹⁸. Istnieje długa lista cząstek kandydujących do roli egzotycznej ciemnej materii – znajdują się na niej m.in. neutrino, cząstki supersymetryczne, aksjony, słabo oddziałujące masywne cząstki, czyli WIMPY (*weakly interacting massive particles*) – jednakże jak do tej pory żaden z przeprowadzanych eksperymentów zmierzających do ich wykrycia nie zakończył się sukcesem.

Fiasko programu poszukiwania cząstek tworzących egzotyczną ciemną materię nie jest jedynym zmartwieniem fizyków usiłujących rozwiązać problem brakującej masy. Jeśli parametr gęstości określony dla materii barionowej i niebarionowej wynosi $\Omega_{\text{bariony}} + \Omega_{\text{nie bariony}} = 0,049 + 0,268 = 0,317$, to do uzyskania wartości $\Omega = 1$ wynikającej z pomiarów promieniowania tła ciągle jeszcze brakuje „czegoś”, co odpowiada

¹⁸ Por. M. Taoso, G. Bertone, A. Masiero, *Dark Matter Candidates: A Ten-Point Test*, arXiv:0711.4996v2, 25 I 2008, dostęp: 20 XI 2013.

za 68,3% całkowitej masy Wszechświata. Co może wypełnić aż tak wielką dziurę w kosmicznym budżecie? Z obserwacji astronomicznych przeprowadzonych w ostatnich latach ubiegłego wieku wynika, że jest to nieznaną bliżej rodzaj tajemniczej „ciemnej” energii, która na mocy Einsteinowskiej zasady równoważności masy i energii daje swój wkład do parametru gęstości. Co istotne – wkład ten ($\Omega_{\text{ciemna energia}} = 0,683$) jest ponad dwukrotnie większy niż wkład samej materii (zarówno zwykłej, jak i egzotycznej).

5. Ciemna energia

Chociaż ciemna energia na dobre zagościła w fizyce dopiero w ostatniej dekadzie ubiegłego wieku, to jednak pierwsze epizody składające się na historię tej koncepcji nastąpiły kilkadziesiąt lat wcześniej. Historia ta w dużej mierze pokrywa się bowiem z historią stałej kosmologicznej, którą do równań pola grawitacyjnego po raz pierwszy wprowadził Einstein w roku 1917 i która później co jakiś czas pojawiała się w różnego rodzaju teoriach i modelach kosmologicznych (na przykład w teorii stanu stacjonarnego albo w hipotezie kosmicznej inflacji) – zawsze w charakterze czynnika reprezentującego bliżej nieokreśloną siłę lub energię przeciwdziałającą grawitacji. Istotny argument za koniecznością uwzględnienia tego typu energii w globalnym bilansie masy wynikał między innymi z mechaniki kwantowej, która przypominała o tym, że na poziomie kwanto-

wym każdy układ – nawet całkowicie „pusty” z punktu widzenia fizyki klasycznej – charakteryzuje się pewnym niezerowym poziomem energii. Stała kosmologiczna mogła spełniać funkcję parametru opisującego gęstości tej energii.

Na przełomie lat 80. i 90. ubiegłego wieku stała kosmologiczna zaczęła coraz częściej pojawiać się w dyskusjach dotyczących problemu brakującej masy – zwłaszcza wtedy, gdy okazało się, że problemu tego nie da się rozwiązać, odwołując się jedynie do obecności ciemnej materii. Wielu fizyków zaczęło w tym okresie coraz poważniej rozważać hipotezę istnienia tajemniczej energii, która daje swój wkład do parametru gęstości i którą w równaniach pola należy utożsamić właśnie ze stałą kosmologiczną. Status tej hipotezy zmienił się w sposób nagły i nieoczekiwany w roku 1998, kiedy to dwie grupy astronomów (*Supernova Cosmology Project* kierowana przez Saula Perlmuttera oraz *High-Z Supernova Search* kierowana przez Briana Schmidta) przedstawiły wyniki kilkuletnich obserwacji supernowych typu Ia¹⁹. Charakterystyczna jasność absolutna tych gwiazd decyduje o tym, że we współczesnej kosmologii uchodzą one za „świece standardowe”, to znaczy obiekty służące do wyznaczania odległości – aby dowiedzieć się, jak daleko od Ziemi znajduje się supernowa typu Ia, wystarczy jedynie

¹⁹ G. Riess i in., *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, „The Astronomical Journal” 1998, 16, s. 1009–1038; J. Glanz, *Astronomers See a Cosmic Antigravity Force at Work*, „Science” 1998, 279, s. 1298–1299.

porównać jej widomą jasność z jasnością absolutną lub z jej przesunięciem ku czerwieni.

Obydwa zespoły zaobserwowały, że odległe supernowe – o dużym przesunięciu ku czerwieni – mają o około 25% mniejszą jasność widomą, niż wcześniej sądzono na podstawie pomiarów bliskich supernowych, a to oznacza, że ich odległość od Ziemi jest znacznie większa, niż to wynika z oszacowań zakładających stałą prędkość ekspansji Wszechświata. Jak należy interpretować ten wynik? Z kilku możliwych wyjaśnień wybrano najprostsze, ale zarazem najbardziej niezwykle: widocznie rośnie tempo ekspansji Wszechświata i dlatego obecnie supernowe oddalają się od Ziemi szybciej niż w przeszłości. Taka interpretacja pociemnienia supernowych prowadzi jednakże natychmiast do pytania o przyczynę tego rodzaju akceleracji ekspansji Wszechświata. Wcześniejsze dyskusje nad problemem brakującej masy sprawiły, że w zasadzie jedynym poważnym kandydatem do roli czynnika przeciwdziałającego hamującej sile grawitacji i przyspieszającego proces rozszerzania była ciemna energia reprezentowana w równaniach pola przez dodatnią stałą kosmologiczną. Wyjaśnienie to z jednej strony tłumaczyło efekt pociemnienia supernowych, z drugiej zaś dostarczało brakującego elementu, który wskazywał kierunek poszukiwania rozwiązania kłopotliwego problemu globalnego bilansu masy: to prawda, że Wszechświat zawiera zbyt mało materii, by parametr gęstości był równy jedności, ale do parametru tego swój znaczący wkład – na poziomie aż 68,3% – wnosi również ciemna energia: $\Omega_{\text{materia}} + \Omega_{\text{ciemna energia}} = 0,317 +$

$0,683 = 1$. W ten sposób rozprawiono się z uporczywą niezgodnością pomiędzy wynikami pomiarów krzywizny przestrzeni i obserwowaną we Wszechświecie ilością materii.

Należy pamiętać o tym, że interpretacja ta – wyjaśnienie pociemnienia supernowych odwołujące się do przyspieszonej ekspansji Wszechświata, za którą stoi ciemna energia – choć cieszy się obecnie wielką popularnością, jest też przez niektórych fizyków kwestionowana. Przykładem alternatywnej interpretacji tłumaczącej ten sam fakt obserwacyjny (pociemnienie supernowych) bez konieczności odwoływania się do ciemnej energii jest teoria, zgodnie z którą we współczesnej kosmologii w całkowicie nieuprawniony sposób zakłada się słuszność zasady kosmologicznej i w konsekwencji wszystkie ważne problemy – w tym również problem brakującej masy – rozwiązuje się zawsze w ramach modelu Wszechświata jednorodnego i izotropowego. W rzeczywistości jednak – argumentują zwolennicy tego podejścia (np. Andrzej Krasieński i Krzysztof Bolejko²⁰) – nie ma żadnych podstaw do tego, by wierzyć, że zasada kosmologiczna faktycznie jest spełniona. Odrzucenie tej zasady i przyjęcie w punkcie wyjścia jednego z modeli niejednorodnych (np. modelu Lemaître’a-Tolmana) pozwala na wyjaśnienie zaobserwowanego pociemnienia supernowych bez konieczności postu-

²⁰ Por.: A. Krasieński, *Inhomogeneous Cosmological Models*, Cambridge University Press, Cambridge 1997; K. Bolejko, M.N. Célérier, A. Krasieński, *Inhomogeneous Cosmological Models: Exact Solutions and their Applications*, „Classical and Quantum Gravity” 2011, 28, s. 164002(1–30).

lowania przyspieszonej ekspansji Wszechświata i tym samym bez uwzględniania hipotetycznej ciemnej energii.

Dla zachowania pewnej symetrii warto w tym miejscu wspomnieć o tym, że nie tylko ciemna energia, ale także ciemna materia ma swoich przeciwników, którzy proponują alternatywne wyjaśnienia omawianych wcześniej wyników obserwacji astronomicznych. Najbardziej znaną teorią kwestionującą hipotezę ciemnej materii jest tzw. zmodyfikowana dynamika newtonowska oznaczana akronimem MOND (*Modified Newtonian Dynamics*). Jej twórca – izraelski fizyk Mordehai Milgrom – twierdzi, że płaskie krzywe rotacji galaktyk spiralnych można wyjaśnić bez odwoływania się do ciemnej materii; wystarczy w tym celu tak zmodyfikować wzory fizyki newtonowskiej, by siła grawitacji nie malała wraz ze wzrostem odległości od centrum galaktyki²¹. Podstawową słabością tej teorii jest to, że choć faktycznie wystarcza ona to wytłumaczenia kształtu krzywych rotacji, to jednak nie jest w stanie wyjaśnić efektu soczewkowania grawitacyjnego. Nie jest to również teoria relatywistyczna i dlatego nie można jej potwierdzić za pomocą obserwacji dotyczących na przykład promieniowania tła albo ekspansji Wszechświata.

²¹ M. Milgrom, *A Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis*, „The Astrophysical Journal” 1983, 270, s. 365–370.

6. Nowy paradygmat?

Jeśli problem brakującej masy jest rysą na fundamencie współczesnej fizyki, to ciemną materię i ciemną energię można potraktować jako dwa zmieszane z sobą składniki spoiwa, które ma za zadanie wypełnić powstałe pęknięcie i zabezpieczyć fundament – a pośrednio również cały spoczywający na nim gmach – przed katastrofą budowlaną. Wiele przemawia za tym, że spoiwo to związało się już na stałe z fundamentem; może o tym świadczyć choćby to, że model kosmologiczny, w którym zasadniczy wkład do parametru gęstości wnosi ciemna materia i ciemna energia – tzw. model Λ CDM²² – w kosmologii relatywistycznej nazywany jest dziś po prostu modelem „standardowym” i traktowany w kategoriach naukowego paradygmatu²³. Ogłoszenie pełnego sukcesu w kwestii problemu brakującej masy jest jednakże przedwczesne, ponieważ na samym spoiwie także zaczynają pojawiać się rysy, które domagają się kolejnych wypełnień. Jeśli bowiem faktycznie istnieje tajemnicza

²² W skrócie tym symbol Λ oznacza ciemną energię, a CDM (*cold dark matter*) – tzw. zimną ciemną materię, to znaczy materię złożoną z cząstek poruszających się z prędkościami nierelatywistycznymi.

²³ „Modern cosmologists are, like most scientists (not to mention science journalists), fond of the revolution metaphor, which they use repeatedly and somewhat indiscriminately. They routinely speak of ‘the CDM paradigm’ and the current ‘revolution’ constituted by the discovery of the accelerating universe supposedly filled with dark matter and energy”; H. Kragh, *Conceptions of Cosmos. From Myths to Accelerating Universe: A History of Cosmology*, Oxford University Press, Oxford 2007, s. 245.

ciemna materia – za czym przemawiają na przykład płaskie krzywe rotacji albo zaobserwowane przypadki soczewkowania grawitacyjnego – to dlaczego nikomu jak do tej pory nie udało się wykryć tworzących ją cząstek? Co najmniej od kilkunastu lat przeprowadzane są liczne i zakrojone na szeroką skalę eksperymenty mające na celu realizację tego zadania, lecz jak na razie żaden z nich nie zakończył się powodzeniem. Podobne wątpliwości pojawiają się w przypadku ciemnej energii, o której nie wiadomo prawie niczego poza tym, że należy ją uwzględnić w globalnym bilansie masy Wszechświata. Sytuacja ta jest dla fizyków mało komfortowa również z tego powodu, że alternatywne teorie, kwestionujące obecność ciemnej materii i ciemnej energii – na przykład MOND lub teoria oparta na modelach niejednorodnych – z jednej strony domagają się zbyt daleko posuniętych modyfikacji obecnie akceptowanych rozwiązań (np. prawa grawitacji albo zasady kosmologicznej), z drugiej zaś dostarczają jedynie częściowego (a nie całościowego) wyjaśnienia problemu brakującej masy²⁴. Nic dziwnego, że zainteresowani znalezieniem tego wyjaśnienia z niecierpliwością oczekują na dalszy rozwój sytuacji – to znaczy albo na uzyskanie empirycznych dowodów na obecność ciemnej energii i cząstek tworzących ciemną materię, albo na odkrycie jakiegoś fundamen-

²⁴ Teoria MOND wyjaśnia jedynie płaskie krzywe rotacji, ale nie tłumaczy na przykład efektu soczewkowania grawitacyjnego i pociemnienia supernowych; z kolei teoria kwestionująca słuszność zasady kosmologicznej wyjaśnia pociemnienie supernowych, ale nie tłumaczy płaskich krzywych rotacji.

talnego błędu w dotychczasowych analizach tego zagadnienia – błędu, który sprawi, że problem brakującej masy uda się rozwiązać bez ciemnej materii i ciemnej energii.

Jak widać, tylko na niektóre pytania pojawiające się w związku z tym problemem można obecnie udzielić jednoznacznej odpowiedzi. Wskazanie na ciemną materię i ciemną energię jako na „składniki” Wszechświata, które bilansują jego całkowitą masę, to dopiero pierwszy krok na drodze do ostatecznego rozwiązania tej zagadki. Warto jednak zwrócić uwagę na to, że nawet na wstępnym etapie poszukiwania tego rozwiązania problem brakującej masy już doprowadził zarówno w kosmologii relatywistycznej, jak i w innych dyscyplinach współczesnej nauki do zmian na tyle istotnych, że można je rozpatrywać w kategoriach kuhnowskiej rewolucji naukowej²⁵. Argumentem za słusnością tego bądź co bądź kontrowersyjnego wniosku może być to, że w kosmologii relatywistycznej faktycznie mówi się dziś o nowym paradygmacie, w którym to właśnie ciemna materia i ciemna energia mają największy wpływ (znacznie większy niż „zwykła” materia) na globalną ewolucję Wszechświata.

Ale przywoływana w tym kontekście metafora rewolucji ma również swój głębszy sens. Jeśli ciemna materia i ciemna energia rzeczywiście odpowiadają aż za 95% masy Wszech-

²⁵ Por. S. Tremaine, *A Historical Perspective on Dark Matter*, [w:] *Dark Matter in the Universe. Proceedings of the IAU Symposium, Princeton, NJ, June 24–28, 1985*, red. J. Kormendy, G.R. Knapp, Reidel, Dordrecht 1987, s. 547–565; J. Einasto, *Dark Matter*, arXiv:0901.0632v2, 19 X 2010, dostęp: 23 XI 2013.

świata, to znaczy, że rewolucyjnych zmian musi też doświadczyć naukowy obraz świata, który dostarcza swego rodzaju konceptualnego tła będącego milcząco przyjmowanym fundamentem nie tylko dla całej fizyki, ale i dla wszystkich innych dyscyplin współczesnej nauki – także tych, które wydają się najmniej zainteresowane rozstrzygnięciem problemu brakującej masy. Katalizatorem tych zmian powinna być świadomość, że naukowa działalność całych pokoleń fizyków, chemików i biologów od samego początku – od kiedy tylko narodziła się nauka – dotyczyła jedynie znikomo małego fragmentu Wszechświata, i że nie ma żadnej pewności co do tego, iż fragment ten stanowi reprezentatywną próbkę całości. Ze zrozumiałych powodów analogiczne zmiany muszą się również pojawić w filozoficznym obrazie świata, który jest zależny od obrazu naukowego. Wiele wskazuje na to, że konsekwencje tych zmian będą poważne i dalekosiężne – choćby z tego powodu, że jeśli *wszystkie* dotychczasowe ustalenia naukowe i analizy filozoficzne poświęcone materii dotyczyły zaledwie niewielkiego fragmentu fizycznej rzeczywistości, to pojawia się uzasadniona wątpliwość, czy ustalenia te i analizy są poprawne.

„Rewolucyjny” charakter tych zmian ujawnia się także w tym, że zachodzą one w sposób bardzo zbliżony do tego, co działo się w fizyce na początku XX wieku, kiedy to poszukiwanie wyjaśnienia na pozór mało istotnych trudności interpretacyjnych dotyczących na przykład promieniowania ciała doskonale czarnego, efektu fotoelektrycznego, problemu eteru itd. doprowadziło do powstania teorii względności i mechaniki kwanto-

wej – dwóch wielkich teorii fizycznych, które zrewolucjonizowały zarówno naukowe, jak i filozoficzne postrzeganie fizycznej rzeczywistości. Problem brakującej masy pojawił się w analogicznych okolicznościach i nie jest wykluczone, że jego konsekwencje będą porównywalne do tych sprzed stu lat. Co ciekawe, istnieje też wyraźne podobieństwo pomiędzy zmianą, której współczesny obraz świata doświadcza za sprawą ciemnej materii i ciemnej energii, a przewrotem kopernikańskim. Jak wiadomo, doniosłe konsekwencje tego przewrotu dotyczyły nie tyle szczegółów mechanizmu związanego z ruchem ciał niebieskich (Ziemia krąży wokół Słońca, a nie odwrotnie), ile raczej tego, że zamieszkujący Ziemię człowiek został usunięty z wyróżnionego, centralnego miejsca we Wszechświecie. Zmiana obrazu świata spowodowana problemem brakującej masy jest swego rodzaju kontynuacją tej rewolucji: człowiek nie tylko nie zajmuje wyróżnionego miejsca, ale również nie jest zbudowany z tej materii, która wnosi największy wkład do całkowitej masy Wszechświata.

Przyszłość pokaże, czy stosowanie tej „rewolucyjnej” retoryki w kontekście problemu brakującej masy jest zasadne, czy nie. Co do jednego nie ma obecnie wątpliwości: sam problem jest realny, a na horyzoncie fizyki jak na razie nie widać żadnego łatwego sposobu jego rozwiązania – łatwego to znaczy takiego, który nie wymuszałby radykalnej rewizji naukowego i zarazem filozoficznego obrazu świata.

Bibliografia

- Ade P.A.R. i in., (Planck Collaboration), 22 March 2013, *Planck 2013 Results. Cosmological Parameters*, arXiv:1303.5076v1, 20 III 2013, dostęp: 20 XI 2013.
- Babcock H.W., *The Rotation of the Andromeda Nebula*, „Lick Observatory Bulletin” 1939, 498, s. 41–51.
- Bertone G. (red.), *Particle Dark Matter: Observations, Models and Searches*, Cambridge University Press, Cambridge 2010.
- Bolejko K., Célérier M.N., Krasiński A., *Inhomogeneous Cosmological Models: Exact Solutions and their Applications*”, „Classical and Quantum Gravity” 2011, 28, s. 164002(1–30).
- Bosma A., *The Distribution and Kinematics of Neutral Hydrogen in Spiral Galaxies of Various Morphological Types*, Groningen 1978.
- Copi C.J., Schramm D.N., Turner M.S., *Big-Bang Nucleosynthesis and the Baryon Density of the Universe*, „Science” 1995, 267, s. 192–199.
- Einasto J., *Dark Matter*, arXiv:0901.0632v2, 19 X 2010, dostęp: 23 XI 2013.
- Freeman K.C., *On the Disks of Spiral and S0 Galaxies*, „The Astrophysical Journal” 1970, 160, s. 811–830.
- Glanz J., *Astronomers See a Cosmic Antigravity Force at Work*, „Science” 1998, 279, s. 1298–1299.
- Heller M., *Naukowy obraz świata a zadanie teologa*, [w:] *Obrazy świata w teologii i naukach przyrodniczych*, red. M. Heller, S. Budzik, S. Wszolek, Biblos, Tarnów 1996, s. 13–27.

- Heller M., *Ewolucja pojęcia masy*, „*Analecta Cracoviensia*” 1982, 14, s. 79–91.
- Jeans J.H., *The Motion of Stars in a Kapteyn Universe*, „*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*” 1922, 82, s. 122–132.
- Jedamzik K., Pospelov M., *Particle Dark Matter and Big Bang Nucleosynthesis*, [w:] *Particle Dark Matter: Observations, Models and Searches*, red. G. Bertone, Cambridge University Press, Cambridge 2010, s. 565–585.
- Kapteyn J.C., *First Attempt at a Theory of the Arrangement and Motion of the Sidereal System*, „*The Astrophysical Journal*” 1922, 55, s. 302–328.
- Kragh H., *Conceptions of Cosmos. From Myths to Accelerating Universe: A History of Cosmology*, Oxford University Press, Oxford 2007.
- Kraśniński A., *Inhomogeneous Cosmological Models*, Cambridge University Press, Cambridge 1997.
- Lubański M., *Uwagi w sprawie tzw. naukowego obrazu świata*, [w:] *Obrazy świata w teologii i naukach przyrodniczych*, red. M. Heller, S. Budzik, S. Wszolek, Biblos, Tarnów 1996, s. 28–42.
- Milgrom M., *A Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis*, „*The Astrophysical Journal*” 1983, 270, s. 365–370.
- Newton I., *Matematyczne zasady filozofii przyrody*, tłum. J. Wawrzycki, Copernicus Center Press, Kraków 2011.
- Oort J.H., *The Force Exerted by the Stellar System in the Direction Perpendicular to the Galactic Plane and Some Related Prob-*

- lems, „Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands” 1932, 6, s. 249–287.
- Öpik E., *Selective Absorption of Light in Space, and the Dynamics of the Universe*, „Bulletin de la Société Astronomique de Russie” 1915, 21, s. 150–158.
- Paczyński B., *Gravitational Microlensing by the Galactic Halo*, „The Astrophysical Journal” 1986, 304, s. 1–5.
- Panek R., *Ciemna strona Wszechświata. W poszukiwaniu brakujących składników rzeczywistości*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2011.
- Riess G. i in., *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, „The Astronomical Journal” 1998, 16, s. 1009–1038.
- Rubin V.C. i in., *Kinematic Studies of Early-Type Stars, I: Photometric Survey, Space Motions, and Comparison with Radio Observations*, „Astronomical Journal” 1962, 67, s. 491–531.
- Rubin V.C., Ford W.K., Thonnard J.N., *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” 1980, 238, s. 471–487.
- Sciama D.W., *Modern Cosmology and the Dark Matter Problem*, Cambridge University Press, Cambridge 1993.
- Smith S., *The Mass of the Virgo Cluster*, „The Astrophysical Journal” 1936, 83, s. 23–30.
- Taoso M., Bertone G., Masiero A., *Dark Matter Candidates: A Ten-Point Test*, arXiv:0711.4996v2, 25 I 2008, dostęp: 20 XI 2013.

Tremaine S., *A Historical Perspective on Dark Matter*, [w:] *Dark Matter in the Universe. Proceedings of the IAU Symposium, Princeton, NJ, June 24–28, 1985*, red. J. Kormendy, G.R. Knapp, Reidel, Dordrecht 1987, s. 547–565.

Zwicky F., *Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln*, „*Helvetica Physica Acta*” 1933, 6, s. 110–127.

Życiński J., *Metafizyka i wyobrażenia w przyrodniczym obrazie świata*, [w:] *Obrazy świata w teologii i naukach przyrodniczych*, red. M. Heller, S. Budzik, S. Wszolek, Biblos, Tarnów 1996, s. 78–93.