

TADEUSZ PABJAN\*

## REALIZM NAUKOWY A HIPOTEZA CIEMNEJ MATERII I CIEMNEJ ENERGII

### Abstract

SCIENTIFIC REALISM AND THE HYPOTHESIS OF DARK MATTER AND DARK ENERGY

One of the essential aspects of the dispute between scientific realism and anti-realism is the question of the ontological status of unobservable objects assumed by scientific theories and models. Scientific realism claims that these objects exist in the natural world, while anti-realism denies this. The missing mass problem is a good example of an issue that requires that this question be resolved. In cosmology, this problem is solved by assuming the presence of dark matter and dark energy. The difficulty, however, is that experience does not provide direct evidence for the existence of these two „substances.” In the first part of the article, the differences between scientific realism and anti-realism are discussed. In the second and third parts, the problem of the missing mass is presented (special attention is paid to the difficulties with the empirical confirmation of the existence of dark matter and dark energy). The fourth part of the article discusses the arguments of the supporters of half-realism, which is a kind of compromise between scientific realism and anti-realism.

*Keywords:* scientific realism, anti-realism, half-realism, dark matter, dark energy, missing mass problem

---

Nie ma wielkiej przesady w stwierdzeniu, że to właśnie spór o realizm dał początek filozofii, ponieważ pierwsze filozoficzne pytania stawiane przez starożytnych myślicieli dotyczyły tego, w jaki sposób istnieją byty i jak można je poznawać. Zagadnienie realizmu początkowo pojawiało się w dyskusjach z zakresu ontologii i epistemologii, ale z czasem przeniknęło do wszystkich innych dziedzin filozofii. Gdy w czasach nowożytnych zaczęły się rozwijać nauki przyrodnicze i gdy metodologiczna refleksja nad sposobem ich uprawiania dała początek filozofii nauki, problem realizmu pojawił się również i w tej dziedzinie.

---

\* Uniwersytet Papieski Jana Pawła II w Krakowie, Wydział Teologiczny, Sekcja w Tarnowie, ul. Piłsudskiego 6, 33-100 Tarnów, e-mail: [tadeusz.pabjan@upjp2.edu.pl](mailto:tadeusz.pabjan@upjp2.edu.pl), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1483-026X>.



Szybko okazało się, że filozofia nauki ujawnia nieznane wcześniej aspekty tego problemu i że w pewien sposób rozszerza jego granice: spór o realizm dotyczy już nie tylko kwestii czysto filozoficznych (np. sposobu istnienia bytów), lecz również obejmuje zagadnienia, które mają charakter filozoficzny, ale zarazem pozostają w bezpośrednim związku z naukami empirycznymi (np. status teorii fizycznych). Uniwersalny charakter tych zagadnień sprawia, że problem realizmu stanowi dziś tło niemal każdej kwestii filozoficznej, a filozofia nauki podpowiada, że podobny wniosek należy sformułować również w wypadku problemów ściśle naukowych. Wiele z nich ma bowiem wyraźne odniesienie do sformalizowanych teorii fizycznych, w których zakłada się, że w świecie przyrody istnieją określone obiekty lub struktury odpowiadające poszczególnym elementom matematycznego formalizmu tych teorii. Takie założenie prowadzi bezpośrednio do problemu realizmu, który w tym wypadku obejmuje swoim zasięgiem również nauki przyrodnicze (Leplin 1984, Psillos 1999, Chakravartty 2007). W tym kontekście spór o realizm dotyczy m.in. tego, jak należy traktować same teorie – np. czy są prawdziwe (a jeśli tak, to w jakim sensie) lub empirycznie adekwatne – i w jaki sposób istnieją (i czy w ogóle istnieją) obiekty i struktury, do których odnosi się formalizm tych teorii. Uczestnicy dyskusji nad tym zagadnieniem w różny sposób rozstrzygają tę trudność, ale przywoływane tu argumenty najczęściej przemawiają na rzecz jednego z dwóch przeciwnych stanowisk: realizmu naukowego bądź antyrealizmu naukowego (Sikora 2011).

Celem artykułu nie jest dokładne omawianie toczącego się we współczesnej filozofii nauki sporu o realizm (realizacja tego zadania wymagałaby napisania obszernej monografii), lecz pokazanie, że rozstrzygnięcie tego zagadnienia ma fundamentalne znaczenie dla jednego z podstawowych problemów współczesnej kosmologii, tzn. dla problemu brakującej masy. Fizycy poszukujący rozwiązania tego problemu postulują istnienie ciemnej materii i ciemnej energii, które umożliwiają domknięcie globalnego bilansu masy wszechświata, ciągle brakuje jednak bezpośrednich<sup>1</sup> empirycznych dowodów na istnienie tych dwóch „substancji”. W tym kontekście omówię argumentację zwolenników realizmu i antyrealizmu naukowego.

## 1. MIĘDZY REALIZMEM I ANTYREALIZMEM NAUKOWYM

Dokładne omówienie tez głoszonych przez zwolenników realizmu naukowego i antyrealizmu naukowego nie jest prostym zadaniem przede wszystkim z tego powodu, że każdy autor włączający się w tę dyskusję w nieco inny sposób

---

<sup>1</sup> O pośrednich dowodach będzie mowa w dalszej części artykułu.

ujmuje to zagadnienie. Każdy z nich – niezależnie od tego, czy jest zwolennikiem realizmu, czy antyrealizmu naukowego – w mniejszym lub większym zakresie modyfikuje stanowiska innych autorów opowiadających się za tą samą koncepcją albo choćby tylko przesuwają akcenty, podkreślając inne aspekty tego samego stanowiska. Ponadto trudności pojawiające się przy próbie obrony realizmu lub antyrealizmu naukowego decydują o tym, że coraz częściej dochodzi do zacierania się granic między tymi stanowiskami (Tomczyk 2006). Autorzy, którzy początkowo bronili jednej z tych dwóch koncepcji, wycofują się z wyraźnych i jednoznacznie określonych pozycji, wybierając rozwiązania kompromisowe, w których tezy realistyczne łączone są z tezami antyrealistycznymi. Powstają w związku z tym różnego rodzaju koncepcje „połowiczne”, „kontekstowe”, „dwuaspektowe” itp. Rosnąca liczba tego typu kompromisowych stanowisk, w których zacierają się granice między realizmem i antyrealizmem naukowym, to kuriozalna sytuacja, która w pewnym sensie stawia pod znakiem zapytania sensowność kontynuowania sporu o realizm naukowy (Tomczyk 2006: 125-126). Pozostawiając jednak na boku tę okoliczność i rezygnując z dokładnego omawiania subtelnych różnic między poszczególnymi modyfikacjami realizmu i antyrealizmu naukowego, warto przyjrzeć się najważniejszym, podstawowym tezom głoszonym przez zwolenników obydwu tych stanowisk (Kulp 1997, Chakravartty 2017).

„Podstawowym roszczeniem realizmu naukowego – pisze Ernan McMullin – jest twierdzenie, że długofalowy sukces teorii naukowej daje podstawę do przekonania, że coś takiego jak byty i struktury postulowane przez daną teorię rzeczywiście istnieje” (McMullin 1984: 26). Tezą realizmu naukowego nie jest więc to, że wszystkie obiekty, o których mowa w teoriach naukowych, istnieją w sposób tak samo realny, jak obiekty makroskopowe (tę interpretację określa się niekiedy mianem realizmu naiwnego). Realizm naukowy głosi jedynie, że terminy teoretyczne, którymi posługują się naukowcy (takie np. jak „elektron”, „fala elektromagnetyczna”, „ciemna energia”), mają charakter transteoretyczny, czyli odnoszą się do czegoś, co rzeczywiście istnieje w świecie przyrody. Nie jest w tym przypadku istotne to, jaki konkretnie termin zostanie wybrany na oznaczenie „bytu lub struktury postulowanej przez daną teorię”, ponieważ byty te i struktury – zgodnie z tezą realizmu naukowego – istnieją niezależnie od terminów teoretycznych wykorzystywanych do opisu przyrody. Inaczej postrzegają tę kwestię zwolennicy antyrealizmu naukowego: ich zdaniem terminy teoretyczne wykorzystywane przez naukowców nie mają jednoznacznie określonych rzeczywistych odpowiedników (Putnam 1998: 483-488). Odniesienia tych terminów są bowiem zawsze zrelatywizowane do danej teorii, a żadna teoria nie jest jednoznacznie określona przez dane empiryczne. Terminy wykorzystywane przez naukowców nie mają więc transteoretycznego odniesienia

(Quine 1969). Obiekty i struktury postulowane przez daną teorię to nic innego jak „użyteczne fikcje”.

Zwolennicy realizmu naukowego wychodzą z założenia, że świat przyrody, badany przez nauki empiryczne, ma jednoznacznie określoną strukturę, którą dzięki metodom naukowym można stopniowo odkrywać i coraz dokładniej poznawać. Doświadczenie daje bowiem naukowcom dostęp do istniejącej obiektywnie rzeczywistości. I choć najczęściej jest to dostęp jedynie pośredni (nie można poznawać przyrody bez odpowiedniej teorii), to i tak umożliwia coraz dokładniejsze poznanie struktury świata przyrody. Nauki przyrodnicze dają więc możliwość stopniowego zbliżania się do prawdy o rzeczywistości istniejącej niezależnie od badających ją naukowców – w tym kontekście zwolennicy realizmu naukowego odwołują się często do Popperowskiej idei prawdopodobienia (Popper 1992: 75-83). Inaczej na tę samą kwestię patrzą antyrealiści, według których naukowcy nie mają możliwości dotarcia do prawdziwej struktury świata przyrody. To, czy taka struktura w ogóle istnieje, jest – ich zdaniem – kwestią dyskusyjną, ale nawet jeśli istnieje, to i tak naukowcy nie mogą tej struktury poznać. Język wykorzystywany do opisu tej struktury zniekształca ją bowiem do tego stopnia, że nie można dowiedzieć się, jak wygląda jej „prawdziwa” wersja. Ponieważ dane empiryczne nie pozwalają na jednoznaczną identyfikację teorii, którą należy wykorzystać przy poznawaniu tej struktury (dane zjawisko może być w zadowalający sposób wyjaśnione przez wiele różnych teorii), nie sposób definitywnie stwierdzić, która z alternatywnych teorii jest bliższa prawdy o rzeczywistości „samej w sobie” (Quine 1997: 148). Poznanie prawdy o świecie przyrody nie jest więc – jak chcieliby realisci naukowcy – celem nauki. Należy zatem zrezygnować z idei prawdziwości rozumianej w kategoriach odniesienia teorii do obiektywnie istniejącej rzeczywistości, poprzestając jedynie na poszukiwaniu sposobów na uprawomocnienie przekonania co do tego, że dana teoria jest pod pewnym względem lepsza niż inne, konkurencyjne teorie. W tym kontekście antyrealiści najczęściej wskazują na względy pragmatyczne: lepszą teorią jest ta, która przynosi naukowcom więcej korzyści, w tym sensie, że na przykład pozwala łatwiej niż inne teorie przewidywać zjawiska, odkrywać nieznanie wcześniej prawa przyrody albo projektować urządzenia ułatwiające życie (Zeidler 1992: 49).

Jak widać, zwolennicy realizmu naukowego i antyrealizmu naukowego zupełnie inaczej postrzegają kwestię statusu teorii naukowej. Różnica ta dotyczy każdej teorii tworzonej przez naukowców, ale najwyraźniej ujawnia się ona w przypadku sformalizowanych teorii fizycznych, w których określona matematyczna struktura odniesiona jest dzięki odpowiedniej interpretacji do dziedziny teorii (jest nią pewien aspekt lub fragment świata przyrody). Realizm naukowy uzasadnia słuszność strukturalizmu, czyli koncepcji, w której podkreśla

się, że tworzonym w nauce teoretycznym strukturalnym strukturalnym (w świecie przyrody) nie obiekty, lecz struktury (Ladyman 2020, Heller 2021: 91-98). Zwolennicy realizmu strukturalnego sądzą, że matematyczna struktura teorii jest podobna do rzeczywistej struktury świata w tym sensie, że badając pierwszą z tych struktur, można uzyskać informacje o drugiej z nich. John Worrall zwraca w tym kontekście uwagę na poznawczy aspekt tego podobieństwa, opowiadając się za epistemicznym realizmem strukturalnym (Worrall 1989), a James Ladyman i Steven French, będąc zwolennikami ontycznego realizmu strukturalnego, podkreślają jego aspekt bytowy (Ladyman 1998, French 2006, French, Ladyman 2011). Wyjaśniając charakter podobieństwa między strukturą świata i matematyczną strukturą teorii, Michał Heller mówi o swego rodzaju rezonansie, dzięki któremu naukowiec „widząc związki inferencyjne, stanowiące strukturę matematyczną, pośrednio zyskuje dostęp do badanej struktury świata” (Heller 2006: 108). Oczywiście świat przyrody nie jest dokładnie taki, jak przedstawia go teoria fizyczna, ponieważ relacja między formalizmem a dziedziną teorii nie jest relacją tożsamości, lecz raczej swego rodzaju relacją podobieństwa. Jeśli jednak teoria – zgodnie z intuicją wypowiedzianą przez McMullina – odnosi sukces, czyli jeśli doświadczenie potwierdza słuszność wyprowadzonych z niej przewidywań, to należy przyjąć, że postulowane przez nią „byty i struktury” rzeczywiście istnieją. Innymi słowy, realista naukowy jest przekonany, że „teoretyczne struktury są czymś podobnym do struktur w rzeczywistości” (McMullin 1984: 26). Wybór właściwej teorii nie jest więc jedynie kwestią uprawnomocnienia własnych przekonań co do tego, że teoria ta pozwala na przykład lepiej niż konkurencyjne teorie przewidywać nowe fakty. Dzięki właściwej teorii naukowcy mogą bowiem przybliżyć się do poznania prawdziwej struktury świata.

Zwolennik antyrealizmu naukowego nie zgadza się z tym wnioskiem. Jego zdaniem teoria naukowa w żaden sposób nie przybliży rzeczywistej struktury świata, lecz jest tylko mniej lub bardziej użytecznym narzędziem służącym do porządkowania danych i przewidywania zjawisk. Sensowny i wartościowy poznawczo jest jedynie naukowy opis samych zjawisk. Matematyczny formalizm teorii nie ujmuje fenomenów i nie odpowiada mu żadna istniejąca rzeczywistość. Teorie „kłamają”, ponieważ nie odzwierciedlają tego, jak faktycznie wygląda świat przyrody (Cartwright 1983).

Omawiając różnice zachodzące między realizmem i antyrealizmem naukowym, warto przywołać jeden z ciekawych argumentów przemawiających na korzyść realizmu naukowego. Hilary Putnam (1975), formułując tzw. argument z cudu, zauważył, że kwestionując realizm naukowy, nie można wytłumaczyć sukcesów nauki inaczej niż jako cud<sup>2</sup>. Odnosząc się do tego argumentu, zwo-

<sup>2</sup> „Pozytywny argument na rzecz realizmu głosi, że jest on jedyną filozofią, na gruncie

lennicy antyrealizmu przywołują najczęściej za Larrym Laudanem tzw. pesymistyczną metaindukcję. Laudan, odwołując się do historycznych przykładów teorii naukowych, które przez długi czas odnosiły sukces, ale później okazały się fałszywe, podkreśla, że nie zachodzi żaden konieczny związek między sukcesem empirycznym teorii i jej prawdziwością (albo choćby przybliżoną prawdziwością) – co oczywiście jest racją przemawiającą przeciwko słuszności realizmu naukowego (Laudan 1981). Argument Putnama ma również inne słabe strony. Zakładanie rzeczywistego istnienia przedmiotów, o których mówią teorie empiryczne – czego domaga się realizm naukowy – nie zawsze bowiem prowadzi do pełnego sukcesu nauki, a sukces jedynie połowiczny trudno uznać za cud. Problem brakującej masy dostarcza dobrej ilustracji tej okoliczności.

## 2. PROBLEM BRAKUJĄCEJ MASY

Trudno dziś nie zgodzić się z tym, że historia nowożytnych nauk przyrodniczych to jedno wielkie pasmo sukcesów. W kilku ostatnich dziesięcioleciach coraz głośniejszymi mówi się jednak o kryzysie, który dotyka zwłaszcza współczesną fizykę i wszystkie inne związane z nią dyscypliny. Problem brakującej masy jest jedną z trudności będących symptomem tego kryzysu: obejmuje swoim zasięgiem kosmologię relatywistyczną, astrofizykę, fizykę cząstek elementarnych oraz kilka innych spokrewnionych z fizyką dyscyplin. Maksymalnie upraszczając całe zagadnienie, można powiedzieć, że trudność z „brakującą masą”<sup>3</sup> polega na tym, że wszystkie znane współczesnej nauce postaci materii dają tylko niewielki wkład (na poziomie niecałych 5%) do całkowitej masy wszechświata. Poszukiwanie rozwiązania tej trudności doprowadziło uczonych do „odkrycia” ciemnej materii i ciemnej energii, które pozwalają na wyrównanie globalnego bilansu masy wszechświata. Problem polega jednak na tym (z tego powodu występujące w poprzednim zdaniu słowo „odkrycie” zostało ujęte w cudzysłów), że ciemna materia i ciemna energia są jedynie terminami czysto teoretycznymi, ponieważ jak na razie żaden z eksperymentów mających wykryć cząstki tworzące ciemną materię nie zakończył się sukcesem, a naukowcy nie mają zbyt wielu pomysłów, w jaki sposób można byłoby poddać empirycznym testom ciemną energię.

Historia problemu brakującej masy jest długa i wielowątkowa (Panek 2011, Pabjan 2014). O tym, że w kosmosie istnieją niewidoczne z Ziemi obiekty, takie jak odległe planety, planetoidy, komety, wygasłe gwiazdy itp., uczeni wiedzieli

---

której sukces nauki nie przedstawia się jako cud” (Putnam 1975: 73).

<sup>3</sup> Określenie „problem brakującej masy” ma swój dokładny odpowiednik w języku angielskim: *the missing mass problem*.

od dawna. W pierwszych dekadach XX wieku pojawiły się jednak argumenty za tym, że we wszechświecie musi być obecna jakaś inna, dodatkowa materia. Astronomowie zauważyli wówczas, że dynamika gwiazd w Drodze Mlecznej i w innych pobliskich galaktykach, a także dynamika samych galaktyk (zgrupowanych w gromady) wskazuje na obecność znacznej ilości dodatkowej niewidocznej masy, która zapewnia grawitacyjną stabilność tym układom (Oort 1932, Zwicky 1933). W drugiej połowie XX wieku pojawiły się kolejne argumenty za tym, że w globalnym bilansie masy wszechświata należy uwzględnić jakiś nowy, nieznanym współczesnej fizyce, rodzaj materii. Takich argumentów dostarczyła analiza krzywych rotacji galaktyk spiralnych. Okazało się, że – wbrew temu, czego oczekiwali astronomowie – poszczególne fragmenty dysków tych galaktyk obracają się ze stałą prędkością kątową (Rubin, Ford, Thonnard 1978). Symulacje przeprowadzone na podstawie fizyki newtonowskiej odniesionej do tego typu wirujących układów pokazały, że galaktyki spiralne mogą zachowywać się w taki sposób tylko wtedy, gdy każda z nich otoczona jest niewidoczną masywną „otoczką”, która decyduje o grawitacyjnej stabilności wirujących galaktyk. Z przeprowadzonych obliczeń wynikało, że masa tego typu *halo* zbudowanego z ciemnej materii powinna wielokrotnie (nawet dziesięciokrotnie) przekraczać masę samej galaktyki (Ostriker, Peebles, Yahil 1974). Jeszcze inny mocny argument przemawiający za obecnością dodatkowej niewidocznej materii ma związek z zaobserwowanymi przypadkami soczewkowania grawitacyjnego. Jest to efekt przewidziany przez ogólną teorię względności, który polega na tym, że docierające do Ziemi światło odległych obiektów (np. galaktyk) ulega ugięciu na skutek grawitacyjnego oddziaływania określonego masywnego obiektu. Takim obiektem może być na przykład inna galaktyka, ale równie dobrze może nim być także masywny obłok lub inny obiekt zbudowany z ciemnej materii. Dokładne zdjęcia wykonane przez teleskopy Hubble’a i Webba, na których widoczne są charakterystyczne łuki, zniekształcenia albo obrazy wielokrotnione, są empirycznymi dowodami obecności właśnie takich obiektów.

Aby dokładnie oszacować ilość ciemnej materii, należy odwołać się do jednego z parametrów wykorzystywanych przy konstrukcji modeli wszechświata budowanych w kosmologii relatywistycznej, a mianowicie do tzw. parametru gęstości (oznaczanego symbolem  $\Omega$ ). Określa on stosunek średniej gęstości materii do tzw. gęstości krytycznej, która charakteryzuje model Einsteina–de Sittera. Parametr gęstości jest skorelowany z krzywizną przestrzeni, dlatego mierząc tę krzywiznę, można określić wartość parametru  $\Omega$ . Wyniki takich pomiarów przeprowadzonych w ostatnich latach przez satelitę Planck (a wcześniej przez satelity COBE i WMAP zaprojektowane do badania kosmicznego promieniowania tła) dowodzą, że przestrzeń obecnego wszechświata jest płą-

ska, co oznacza, że parametr gęstości jest dokładnie równy jedności (średnia gęstość materii jest równa gęstości krytycznej).

Problem brakującej masy zyskuje jasne i precyzyjne sformułowanie, gdy ilość obecnej we wszechświecie materii zostanie wyrażona w jednostkach parametru gęstości. Zwykła materia, zbudowana z cząstek znanych współczesnej fizyce (zwana materią barionową), daje wkład do tego parametru na poziomie  $\Omega_{\text{materia barionowa}} \approx 0,05$ , co oznacza, że ten rodzaj materii stanowi około 5% masy wszechświata. Za obserwowaną dynamikę galaktyk i soczewkowanie grawitacyjne musi zatem odpowiadać jakiś inny rodzaj materii zbudowanej z cząstek nieznanymi współczesnej fizyce. Właśnie ten rodzaj materii określa się dziś mianem ciemnej materii<sup>4</sup> (zwanej też materią egzotyczną lub niebarionową). Jej podstawową własnością jest to, że oddziałuje grawitacyjnie, ale nie wykazuje żadnych innych cech materii barionowej (np. jej cząstki nie tworzą atomów i są bezkolizyjne<sup>5</sup>). Parametr gęstości określony dla materii egzotycznej wynosi  $\Omega_{\text{materia egzotyczna}} \approx 0,26$ , co oznacza, że ta postać materii odpowiada za 26% masy wszechświata. Do tego, by parametr gęstości był równy jedności, należy w globalnym bilansie masy wszechświata uwzględnić jeszcze jakiś rodzaj „substancji”, który daje wkład do tego parametru na poziomie  $\Omega_s \approx 0,69$ . Tą tajemniczą substancją jest ciemna energia, która jest równoważna masie i która odpowiada za 69% masy wszechświata ( $\Omega_{\text{ciemna energia}} \approx 0,69$ ).

W równaniach pola ogólnej teorii względności ciemną energię utożsamia się ze stałą kosmologiczną, którą po raz pierwszy do równań wprowadził Einstein w 1917 roku (Einstein 1917). W jego modelu wielkość ta reprezentuje bliżej nieokreśloną energię, która przeciwdziała sile grawitacji. W podobnym charakterze stała kosmologiczna występuje w innych modelach i teoriach ewolucji wszechświata (np. w teorii stanu stacjonarnego). Gdy w ostatnich dekadach XX wieku okazało się, że sama ciemna materia nie wystarcza do rozwiązania problemu brakującej masy, fizycy zaczęli podejrzewać, że w globalnym bilansie masy wszechświata należy uwzględnić również ten rodzaj energii. Słuszność tych podejrzeń potwierdziły wyniki uzyskane dzięki przeprowadzonym w ostatnich latach ubiegłego wieku obserwacjom supernowych typu *Ia* (Riess i in. 1998). Społeczność naukowa uznała, że za zaobserwowane wówczas przyspieszenie ekspansji wszechświata odpowiada właśnie ciemna energia, którą w równaniach pola reprezentuje dodatnia stała kosmologiczna.

<sup>4</sup> W sensie ścisłym rozróżnia się ciemną materię niebarionową i barionową. Tę drugą stanowią obiekty zbudowane ze zwykłej (barionowej) materii, które nie emitują światła (np. czarne dziury, planety, komety, wygasłe gwiazdy, planetoidy, pył, zimny gaz itp.). Ogólnie jednak rzecz biorąc, pod określeniem „ciemna materia” rozumie się dziś materię egzotyczną, czyli niebarionową.

<sup>5</sup> To znaczy nie oddziałują z materią barionową za pośrednictwem sił elektromagnetycznych i jądrowych, a jeśli nawet oddziałują, to bardzo słabo.



### 3. WĄTPLIWE ROZWIĄZANIE

Czy problem brakującej masy został definitywnie rozwiązany dzięki „odkryciu” ciemnej materii i ciemnej energii? Choć uwzględnienie w globalnym bilansie masy wkładu pochodzącego od tych dwóch „substancji” faktycznie sprawia, że parametr gęstości uzyskuje pożądaną wartość ( $\Omega = 1$ ), i choć obecność ciemnej materii wyjaśnia sposób rotacji galaktyk i soczewkowanie grawitacyjne, a obecność ciemnej energii – akcelerację wszechświata – to jednak rozwiązanie problemu brakującej masy nie jest w tym przypadku całkowicie zadowalające. W przypadku ciemnej materii podstawową wątpliwość budzi to, że jak do tej pory sukcesem nie zakończył się żaden eksperyment mający na celu wykrycie cząstek tworzących ten typ materii. Istnieje długi katalog cząstek, które kandydują do tej roli (są to m.in. masywne neutrina, aksjony, cząstki supersymetryczne albo tzw. WIMPy<sup>6</sup>), a na całym świecie od wielu lat przeprowadza się zaawansowane eksperymenty, w których fizycy bezskutecznie próbują dowieść, że takie cząstki rzeczywiście istnieją.

Nieco innych kłopotów przysparza naukowcom koncepcja ciemnej energii, choć w praktyce podstawowa trudność jest taka sama jak w przypadku ciemnej materii: jest nią problem z bezpośrednim empirycznym potwierdzeniem jej istnienia. Fizycy w różny sposób odpowiadają na pytanie o to, czym w rzeczywistości jest ciemna energia. Większość utożsamia ją z energią próżni kwantowej, która ma ujemne ciśnienie przeciwdziałające hamującej sile grawitacji oraz stałą – a więc niezmienną się w czasie i przestrzeni – gęstość. Niektórzy zakładają, że gęstość ta może się zmieniać i podlegać różnego rodzaju fluktuacjom (ciemną energię określa się wtedy mianem kwintesencji lub dynamicznej ciemnej energii). Obydwie te interpretacje – w których ciemną energię utożsamia się z próżnią kwantową – mają jednak poważne problemy z poprawnym oszacowaniem gęstości tej energii<sup>7</sup>. Nic dziwnego, że w czasopiśmie i internetowych bazach artykułów naukowych, zwłaszcza w ostatnich latach, nieustannie przybywa alternatywnych interpretacji tego, czym w rzeczywistości jest ciemna energia<sup>8</sup>. W tym miejscu mija się z celem wymienianie, a tym bardziej omawianie, wszystkich tych interpretacji. Nie jest tu również potrzebne przywoływanie wszystkich przeprowadzanych do tej pory eksperymentów, które mają umożliwić badanie ciemnej energii albo doprowadzić

---

<sup>6</sup> WIMP to „słabo oddziałująca masywna cząstka” (*weakly interacting massive particle*).

<sup>7</sup> Teoretyczne obliczenia dają absurdalnie wielkie wartości tej gęstości, co z kolei domaga się wprowadzenia arbitralnych założeń, które dotyczą różnego rodzaju procedur renormalizacyjnych (Pabjan 2014: 113-118).

<sup>8</sup> Przykładową listę takich alternatywnych interpretacji przywołuje Richard Panek (2011: 324).

do wykrycia cząstek tworzących ciemną materię. To, że eksperymenty te nie przyniosły oczekiwanych rezultatów i że istnieje tak wiele różnych interpretacji tego, czym są te dwie zagadkowe „substancje”, samo w sobie jest wymownym argumentem za tym, że sytuacja kryzysowa dotycząca problemu brakującej masy wcale nie została zażegnana dzięki „odkryciu” ciemnej materii i ciemnej energii.

Jest to istotna, a zarazem bardzo ciekawa okoliczność, którą należy uwzględnić oceniając metodologiczny status współczesnej kosmologii relatywistycznej. Sukcesy tej dyscypliny w badaniu wszechświata i rekonstrukcji jego historii rozpoczynającej się w momencie Wielkiego Wybuchu (np. standardowy model kosmologiczny) są niekwestionowane. Na sukcesach tych cieniem kładzie się jednak to, że jej elementem jest wyjaśnienie odwołujące się do ciemnej materii i ciemnej energii – dwóch tajemniczych składników wszechświata, których istnienie ciągle jeszcze nie zostało empirycznie dowiedzione. W kosmologii najlepsze dopasowanie do wyników pomiarów od wielu lat uzyskuje model uwzględniający obecność ciemnej energii i zimnej ciemnej materii<sup>9</sup> (to tzw. model  $\Lambda$ CDM, gdzie  $\Lambda$  to stała kosmologiczna oznaczająca ciemną energię, a CDM to zimna ciemna materia), choć to, że w ramach tego modelu nie wyjaśnia się, czym są te dwa składniki wszechświata, z pewnością należy uznać za sytuację nietypową i zarazem niekomfortową. Teorię (lub model kosmologiczny zbudowany na jej podstawie<sup>10</sup>), w której zakłada się obecność określonych przedmiotów, ale zarazem nie wyjaśnia się ich natury, określa się niekiedy mianem teorii efektywnej. Standardowy model kosmologiczny odwołujący się do obecności ciemnej materii i ciemnej energii jest w tym sensie teorią efektywną (Szydłowski, Tambor 2008).

W pierwszej części artykułu w kontekście sporu między zwolennikami realizmu i antyrealizmu naukowego wspomniałem krótko tezę o niedookreśleniu teorii przez dane empiryczne. Intuicja wyrażona w tej tezie ma swój odpowiednik w kosmologii relatywistycznej, w której mówi się niekiedy o tzw. problemie degeneracji. Ma on związek z niedookreśleniem modelu przez dane empiryczne, czyli z tym, że z wynikami obserwacji i innych testów empirycznych jest zgodnych wiele różnych modeli kosmologicznych, a stąd podstawowym problemem jest takie ograniczenie liczby tych modeli, by pozostał tylko jeden – ten,

---

<sup>9</sup> Ze względu na prędkości cząstek tworzących ciemną materię wyróżnia się: a) zimną ciemną materię (*cold dark matter*) o niewielkich prędkościach względem prędkości światła, b) gorącą ciemną materię (*hot dark matter*) o prędkościach zbliżonych do prędkości światła oraz c) ciepłą ciemną materię (*warm dark matter*) o prędkościach pośrednich między a) i b).

<sup>10</sup> W pracach z zakresu kosmologii często zaciera się granica między teorią i modelem. Również same określenia „teoria” oraz „model” stosowane są zamiennie (Tambor 2020: 53-75).

który odpowiada rzeczywistości wszechświata. W tym kontekście Massimi i Lahav (2014: 3.13) zauważają, że z problemem degeneracji można sobie poradzić zasadniczo na dwa sposoby: pierwszy z nich to postulowanie istnienia jakiegoś nowego bytu – z taką sytuacją mamy właśnie do czynienia w kosmologii, w której postuluje się istnienie ciemnej materii i ciemnej energii – drugi to odpowiednie modyfikowanie obowiązującej teorii. Z tego, co zostało do tej pory powiedziane o problemie brakującej masy, wynika, że zdecydowanie łatwiej jest postulować istnienie nowego bytu, niż odważyć się na modyfikowanie teorii – zwłaszcza wtedy, gdy jest to teoria tak dobrze potwierdzona przez doświadczenie, jak ogólna teoria względności albo mechanika newtonowska. Nie oznacza to jednak, że problemu degeneracji w ogóle nie próbuje się rozwiązywać na drodze modyfikowania teorii. Propozycje dotyczące takich zmian stanowią alternatywne – względem hipotezy ciemnej materii i ciemnej energii – wyjaśnienia problemu brakującej masy. Dobrym przykładem jest tu zmodyfikowana dynamika newtonowska (MOND – *Modified Newtonian Dynamics*) Mordehaia Milgroma (1983), która dostarcza wyjaśnienia płaskich krzywych rotacji galaktyk spiralnych niewymagającego odwoływania się do ciemnej materii. Innym przykładem pozwalającym na „pozbycie się” z kosmologii hipotezy ciemnej energii jest teoria Andrzeja Krasieńskiego i Krzysztofa Bolejki, w której odrzuca się zasadę kosmologiczną będącą fundamentalnym założeniem przyjmowanym przy konstruowaniu modeli kosmologicznych (Krasieński 1997, Bolejko, C  lerier, Krasieński 2011). Niestety żadna z zaproponowanych modyfikacji nie spotkała się z g łbszym zainteresowaniem ogółu fizyków. Nic dziwnego, że wi kszo  z nich skłania się ku temu, że to w lwnie obecno  ciemnej materii i ciemnej energii rozwiazuje problem brakujacej masy.

#### 4. REALIZM POŁOWICZNY

Czy ciemna materia i ciemna energia rzeczywiście istnieją, czy też stanowi  jedynie „uzyteczne fikcje”, które nie mają żadnego odniesienia do świata przyrody? Wiele wskazuje na to, że na tak postawione pytanie nie można – bez wprowadzenia dodatkowych rozr znie  i zastrzeżeń – udzielić prostej i jednoznacznej odpowiedzi, która wyraźnie przechyla by szalę sporu na stron  realizmu b d  antyrealizmu naukowego. Omówione problemy z empirycznym potwierdzeniem istnienia ciemnej materii i ciemnej energii przynajmniej do pewnego stopnia oslabiaj  argumentacj  zwolennik  realizmu naukowego i wzmacniają pozycj  strony przeciwniej, ale z oczywistych wzgl d  nie mogą jednoznacznie rozstrzygn  tego sporu.

W dyskusji nad tym zagadnieniem warto najpierw rozróżnić konteksty, w których przywołuje się odpowiednie argumenty (Horwich 1982). Debata między realizmem a antyrealizmem może bowiem odbywać się w kontekście ontologicznym (gdy głosi się tezy dotyczące istnienia bądź nieistnienia przedmiotów postulowanych przez teorie empiryczne), epistemologicznym (gdy podkreśla się, że teorie dostarczają wiedzy na temat rzeczywistego świata lub że tego nie robią) lub semantycznym (gdy zwraca się uwagę na wartości logiczne wypowiedzi o świecie przyrody lub ich brak). W każdym z tych kontekstów zwolennik realizmu naukowego będzie się skłaniał do pozytywnej, a antyrealista do negatywnej odpowiedzi na pytania o ciemną materię i ciemną energię, choć najbardziej istotna różnica będzie w tym przypadku dotyczyć kontekstu ontologicznego i epistemologicznego. Realista będzie twierdził, że obydwie te substancje rzeczywiście istnieją (dotychczasowe niepowodzenia w empirycznym potwierdzeniu ich istnienia usprawiedliwi, wskazując na przykład na technologiczne ograniczenia aparatury wykorzystywanej w dotychczasowych eksperymentach albo na jakąś inną podobną okoliczność<sup>11</sup>) i że teorie i modele zakładające ich obecność mówią o tym, jak wygląda i funkcjonuje rzeczywisty świat. Z kolei antyrealista będzie odmawiał im realnego istnienia (odwoła się do omówionych problemów i potraktuje je jako argument za słusznością swojej koncepcji) i będzie podkreślał, że takie teorie i modele nie dostarczają wiedzy o rzeczywistym świecie, ale na przykład o tym, w jaki sposób uczeni prowadzą badania nad parametrem gęstości albo jak interpretują wyniki dotyczące rotacji galaktyk spiralnych i soczewkowania grawitacyjnego.

Przeglądając opracowania dotyczące tego zagadnienia, można się jednak przekonać, że obydwie te odpowiedzi – zwolennika realizmu i antyrealizmu – są zazwyczaj bardziej zniuansowane i wytonowane, a większość autorów przyłączających się do tej dyskusji opowiada się dziś za rozwiązaniami pośrednimi, które łączą elementy obydwu tych stanowisk. Symptomy takiego synkretyzmu można dostrzec zarówno u zdeklarowanych zwolenników realizmu, jak i antyrealizmu naukowego (Chakravartty 1998). Rezygnując jednak z omawiania poszczególnych wersji tego typu pośrednich stanowisk i nieco upraszczając całe zagadnienie, można wszystkie te ujęcia określić ogólnym mianem połowicznego realizmu.

Punktem wyjścia dla tych, którzy wycofują się ze skrajnych interpretacji realizmu i antyrealizmu naukowego i opowiadają się za połowicznym realizmem,

---

<sup>11</sup> Aby obronić teorię przed falsyfikacją (brak bezpośrednich dowodów na istnienie ciemnej materii i ciemnej energii można potraktować w kategoriach wyniku, który falsyfikuje teorię zakładającą ich istnienie) wystarczy do niej dodać (lub zmodyfikować) odpowiednią „ochronną” hipotezę. W ten sposób każdą teorię można w zasadzie dowolnie długo bronić przed obaleniem.

jest koncepcja określana mianem selektywnego sceptycyzmu. Głosi ona, że wszystkie ontologiczne postulaty teorii fizycznych – teza o realnym istnieniu ciemnej materii i ciemnej energii z pewnością jest tego typu tezą – należy traktować z dużą dozą ostrożności (Kotowski 2014). Selektywny sceptycyzm łączy się (zwłaszcza w kosmologii relatywistycznej) z praktyką tworzenia modeli, którym nie nadaje się automatycznie interpretacji realistycznej, poprzestając jedynie na wymogu, by były to modele „adekwatne empirycznie”, czyli zgodne z wynikami przeprowadzanych doświadczeń. Koncepcja ta nie domaga się przy tym uznania, że przedmioty zakładane przy konstrukcji tych modeli – np. ciemna materia i ciemna energia – w rzeczywistości nie istnieją, ale zarazem domaga się, by z góry nie zakładać, że istnieją. W tym kontekście warto zauważyć, że model  $\Lambda$ CDM, uwzględniający obecność ciemnej materii i ciemnej energii, jest „adekwatny empirycznie” w tym sensie, że wykazuje najlepsze dopasowanie do parametrów kosmologii relatywistycznej, ale nie jest adekwatny w tym sensie, że wyniki doświadczeń dostarczają twardych i bezpośrednich dowodów na istnienie ciemnej materii i ciemnej energii: doświadczenie takich dowodów nie dostarcza, a sam model nie wyjaśnia natury tych przedmiotów.

Dla dyskusji nad omawianym zagadnieniem istotne znaczenie ma zaproponowane przez Iana Hackinga rozróżnienie na realizm odniesiony do różnego rodzaju struktur teoretycznych (*theory-realism*) i realizm odniesiony do przedmiotów zakładanych przez te struktury (*entity-realism*) (Hacking 1983: 27-28). Pierwsza z tych wersji realizmu głosi, że teorie i modele naukowe przybliżają do prawdy o świecie, druga – że istnieje to, o czym te teorie i modele mówią. Hacking przywołuje proste kryterium, które pozwala uznać, że obiekty, o których mówią teorie i modele, rzeczywiście istnieją: jest tak wtedy, gdy można się tymi obiektami posługiwać, by w ramach jakiegoś eksperymentu wpływać na zachowanie innych obiektów (np. neutrony istnieją, skoro można za ich pomocą rozbić jądro atomu). Warto zauważyć, że to kryterium nie pozwala na potwierdzenie istnienia ciemnej materii i ciemnej energii, ponieważ w ramach żadnego eksperymentu nie można – przynajmniej na razie – posłużyć się ciemną materią do tego, by *wywołać* efekt soczewkowania grawitacyjnego lub *sprawić*, że dana galaktyka zacznie wirować ze stałą prędkością kątową, nie można również posłużyć się ciemną energią, by *spowodować* przyspieszenie ekspansji wszechświata. Doświadczenie pozwala jedynie stwierdzić, że zachodzą takie fakty, a hipoteza ciemnej materii i ciemnej energii pojawia się w standardowym modelu kosmologicznym jako wynik poszukiwania najlepszego wyjaśnienia tych faktów<sup>12</sup>. Jest to jednak jedynie wyjaśnienie funkcjonalne – w tym sensie,

---

<sup>12</sup> Z punktu widzenia logiki (nieklasycznej) jest to więc forma rozumowania abdukcyjnego, w którym dla pewnego zbioru faktów poszukuje się najlepszego – najbardziej prawdopodobnego – wyjaśnienia. Typologię wyjaśnień w naukach przyrodniczych, która uwzględnia

że model ten tłumaczy akcelerację wszechświata i mechanizm odpowiedzialny za powstawanie i zachowanie struktur, określając udziały w globalnym bilansie masy wszechświata ciemnej materii i ciemnej energii, ale nie precyzuje, jaki rodzaj cząstek tworzy ciemną materię, ani nie tłumaczy, jaka jest natura ciemnej energii.

Charakterystyczną cechą połowicznego realizmu jest to, że zwolennicy tej koncepcji odrzucają jedną z dwóch wspomnianych wcześniej wersji realizmu. Sam Hacking odrzuca realizm odniesiony do teorii i modeli, podkreślając, że można uznawać pewne przedmioty za istniejące, nie zakładając przy tym, że teorie i modele, w których te przedmioty występują, są prawdziwe w tym sensie, że przybliżają do prawdy o świecie (Hacking 1983: 28-29). Podobna argumentacja pojawia się u innych zwolenników antyrealizmu, którzy skłonni są przyznać, że teoretyczne pojęcia mają swoje odpowiedniki w świecie, ale nie zgadzają się z tym, że celem nauki jest prawda o świecie i że teorie i modele do tej prawdy uczonych przybliżają. „Celem nauki – podkreśla Bas van Fraassen – jest dostarczanie teorii, które są adekwatne empirycznie” (1980: 12). Oznacza to, że naukowcy, którzy tworzą i testują w laboratoriach teorie empiryczne będące podstawą naukowego obrazu świata, mogą zakładać obiektywne istnienie przedmiotów postulowanych przez te teorie, ale zarazem wcale nie muszą przyjmować, że przedmioty te istnieją poza naukowym obrazem świata. Gdy zaś idzie o kategorię prawdziwości (bądź fałszywości), to przysługuje ona według van Fraassena jedynie pewnej klasie zdań naukowych, które mówią o tym, co obserwowalne. Do podobnych wniosków dochodzi Nancy Cartwright (1983), która podkreśla, że prawdziwa (bądź fałszywa) może być jedynie wiedza o zjawiskach i o tych prawach przyrody, które można poddać empirycznym testom. Wiedza czysto teoretyczna jest wiedzą fikcyjną i w ogóle nie można do niej odnosić kategorii prawdy bądź fałszu.

Przywołani autorzy nie uwzględniają w swoich analizach problemu brakującej masy, ale czyni to np. Paweł Tambor (2020: 115-172). Omawiając trudności kosmologii relatywistycznej z empirycznym potwierdzeniem istnienia ciemnej materii i ciemnej energii, wyraźnie opowiada się za „połowicznym realizmem kosmologicznym”, w którym zakłada się obecność ciemnej materii i ciemnej energii (a więc przyjmuje się *entity-realism*), ale jednocześnie odrzuca się tezę o tym, że model  $\Lambda$ CDM przybliża do prawdy o świecie przyrody (odrzuca się *theory-realism*). Zdaniem Tambora to właśnie tak pojęty połowiczny realizm – on sam łączy go z antyrealizmem kontekstualnym, wzorując się przy tym na poglądach Cartwright – jest najbardziej odpowiednią koncepcją, która pozwa-

---

m.in. funkcję wyjaśniającą standardowego modelu kosmologicznego, przedstawia Tambor (2020: 173-196).

la na poprawną ocenę metodologicznego statusu standardowego modelu kosmologicznego uwzględniającego obecność ciemnej materii i ciemnej energii.

W tym kontekście warto jednak zauważyć, że odrzucając realizm odniesiony do teorii i modeli, a więc kwestionując to, że przybliżają one do prawdy o świecie, sprowadza się całą dyskusję o istnieniu obiektów takich jak ciemna materia i ciemna energia do problemu zwykłych założeń przyjmowanych przy konstrukcji danej teorii lub modelu. Innymi słowy, nie chodzi już w tym przypadku o to, czy takie przedmioty rzeczywiście istnieją, lecz tylko o to, czy ich istnienie zakłada dana teoria lub model kosmologiczny. Jest to zatem klasyczny przykład ontologii w sensie Quine'a, w której istnienie ciemnej materii i ciemnej energii jest po prostu zrelatywizowane do modelu (konkretnie do modelu  $\Lambda$ CDM). Takie stanowisko Stephen Hawking i Leonard Mlodinow określają mianem realizmu zależnego od modelu (*model-dependent realism*, Hawking, Mlodinow 2015: 52-71). W tym kontekście warto jednak zauważyć, że istnieje uzasadniona wątpliwość co do tego, czy rzeczywiście interpretację tę można określać mianem realizmu. W tym ujęciu kontynuowanie dyskusji o rzeczywistym, niezależnym od teorii istnieniu takich przedmiotów jak ciemna materia i ciemna energia nie ma bowiem większego sensu, ponieważ „nie istnieje koncepcja rzeczywistości niezależna od teorii” (Hawking, Mlodinow 2015: 52). O istnieniu ciemnej materii i ciemnej energii oraz innych podobnych do nich nieobserwowanych obiektów można więc mówić tylko w takim sensie, że przy konstrukcji danego modelu zakłada się ich obecność. Innymi słowy, istnieją one jedynie w takim czy innym modelu – w przypadku ciemnej materii i ciemnej energii będzie to model  $\Lambda$ CDM – a poza nim nie przysługuje im autonomiczne, niezależne istnienie. Nie istnieją na przykład we wspomnianych wcześniej alternatywnych modelach, w których uczeni próbują wyjaśniać problem brakującej masy bez uwzględniania tych dwóch substancji. Status ciemnej materii i ciemnej energii jest więc taki sam, jak na przykład status epicykli i deferensów, które istnieją w modelu Ptolemeusza, ale nie istnieją w modelu Kopernika<sup>13</sup>. Hawking i Mlodinow podkreślają, że zgodnie z proponowaną przez nich koncepcją „nie ma sensu pytać, czy model jest realny, ważne jest, czy zgadza się z obserwacją” (Hawking, Mlodinow 2015: 55). Warto zauważyć, że to ostatnie kryterium – zgodność z obserwacją – nie jest dokładnie spełnione przez model  $\Lambda$ CDM (doświadczenie jak do tej pory nie potwierdziło przewidywań modelu dotyczących na przykład istnienia cząstek tworzących ciemną materię), ale ten sam problem pojawia się również w przy-

---

<sup>13</sup> W sensie ścisłym Kopernik również musiał w swoim modelu uwzględnić obecność epicykli, bo nie wiedział, że orbitami planet są elipsy (sądził, że planety poruszają się po okręgach).

padku modeli alternatywnych, które obywają się bez tych dwóch zagadkowych składników wszechświata.

## ZAKOŃCZENIE

Czy ciemna materia i ciemna energia rzeczywiście istnieją, czy też są jedynie „użytecznymi fikcjami” modelu kosmologicznego, które nie mają swoich odpowiedników w świecie przyrody? Omówione rozstrzygnięcia tego zagadnienia naznaczone są wyraźną metodologiczną ostrożnością przed formułowaniem jasnej i jednoznacznej interpretacji ontologicznej, która odnosiłaby się do przedmiotów takich jak ciemna materia i ciemna energia. Postulat zrelatywizowania istnienia tych przedmiotów do teorii lub modelu, uzupełniony o zastrzeżenie, że nie ma większego sensu samo stawianie pytań o realność modelu, jest przejawem tej ostrożności. Takie podejście do tego zagadnienia jest jednak raczej próbą ominięcia problemu, a nie jego rozwiązania. Oczywiście słusność tego wniosku zależy przede wszystkim od tego, co rozumie się przez „rozwiązanie problemu”, który jest przedmiotem dyskusji zwolenników realizmu i antyrealizmu naukowego. Z pewnością jednak połowiczny realizm nie usatysfakcjonuje tych, którzy od uczestników tej dyskusji oczekiwali właśnie tego, by wyraźnie określili ontologiczny status przedmiotów takich jak ciemna materia i ciemna energia, czyli by odpowiedzieli na pytanie, czy obiekty te istnieją poza modelem, w rzeczywistym świecie. Nawet jeśli pytanie to nie jest istotne dla tych, którzy tworzą i testują modele kosmologiczne, to z pewnością sam problem ujęty w tym pytaniu jest ważny i to nie tylko dla samej filozofii nauki. Jak na razie jednak nie ma prostej i jednoznacznej odpowiedzi na to pytanie.

## BIBLIOGRAFIA

- Bolejko K., Célérier M. N., Kasiński A. (2011), *Inhomogeneous Cosmological Models: Exact Solutions and Their Applications*, „Classical and Quantum Gravity” 28, 164002, 1-30. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/28/16/164002>
- Cartwright N. (1983), *How the Laws of Physics Lie*, Oxford: Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/0198247044.001.0001>
- Chakravartty A. (1998), *Semirealism*, „Studies in History and Philosophy of Science Part A” 29(3), 391-408. [https://doi.org/10.1016/S0039-3681\(98\)00013-2](https://doi.org/10.1016/S0039-3681(98)00013-2)
- Chakravartty A. (2007), *A Metaphysics for Scientific Realism: Knowing the Unobservable*, Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511487354>



- Chakravartty A. (2017), *Scientific Realism* [w:] *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2017 Edition), E. N. Zalta (ed.), <https://bit.ly/3LS7ZoA>.
- Einstein A. (1917), *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*, „Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften” 1, 142-152.
- Fraassen B. van (1980), *The Scientific Image*, Oxford–New York: Clarendon Press. <https://doi.org/10.1093/0198244274.001.0001>
- French S. (2006), *Structure as a Weapon of the Realist*, „Proceedings of the Aristotelian Society” 106, 1-19. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9264.2006.00143.x>
- French S., Ladyman J. (2011), *In Defence of Ontic Structural Realism* [w:] *Scientific Structuralism*, A. Bokulich, P. Bokulich (eds.), Dordrecht: Springer, 25-42. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-9597-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9597-8_2)
- Hacking I. (1983), *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511814563>
- Hawking S., Mlodinow L. (2015), *Wielki Projekt*, tłum. J. Włodarczyk, Warszawa: Wydawnictwo Albatros.
- Heller M. (2006), *Filozofia i wszechświat*, Kraków: Universitas.
- Heller M. (2021), *Filozofia nauki*, Kraków: Copernicus Center Press.
- Horwich P. (1982), *Three Forms of Realism*, „Synthese” 51, 121-202. <https://doi.org/10.1007/BF00413827>
- Kotowski M. (2014), *O rozwoju realizmu naukowego jako selektywnego sceptycyzmu*, „Filozofia Nauki” 22(3) [87], 105-123.
- Kraśniński A. (1997), *Inhomogeneous Cosmological Models*, Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511721694>
- Kulp C. B. (ed.) (1997), *Realism/Antirealism and Epistemology*, Lanham: Rowman & Littlefield.
- Ladyman J. (1998), *What is Structural Realism?*, „Studies in History and Philosophy of Science” 29, 409-424. [https://doi.org/10.1016/S0039-3681\(98\)80129-5](https://doi.org/10.1016/S0039-3681(98)80129-5)
- Ladyman J. (2020), *Structural Realism* [w:] *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2020 Edition), E. N. Zalta (ed.), <https://bit.ly/4oulk3y>.
- Laudan L. (1981), *A Confutation of Convergent Realism*, „Philosophy of Science”, 48, 19-49. <https://doi.org/10.1086/288975>
- Leplin J. (ed.) (1984), *Scientific Realism*, Berkeley: University of California Press. <https://doi.org/10.1525/9780520337442>
- Massimi M., Lahav O. (2014), *Dark Energy, Paradigm Shifts, and the Role of Evidence*, „Astronomy & Geophysics” 55(3), 3.12-3.15. <https://doi.org/10.1093/astrogeo/atu122>
- McMullin E. (1984), *A Case for Scientific Realism* [w:] *Scientific Realism*, Berkeley: University of California Press, 8-40. <https://doi.org/10.1525/9780520337442-003>

- Milgrom M. (1983), *A Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis*, „The Astrophysical Journal” 270, 365-370. <https://doi.org/10.1086/161130>
- Oort J. H. (1932), *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, 249-287.
- Ostriker J. P., Peebles P. J. E., Yahil A. (1974), *The Size and Mass of Galaxies, and the Mass of the Universe*, „The Astrophysical Journal” 193, L1-L4. <https://doi.org/10.1086/181617>
- Pabjan T. (2014), *Niedomknięty bilans wszechświata. Krótka historia ciemnej materii i ciemnej energii*, Kraków: Copernicus Center Press.
- Panek R. (2011), *Ciemna strona wszechświata. W poszukiwaniu brakujących składników rzeczywistości*, tłum. E. L. Łokas, Warszawa: Prószyński i S-ka.
- Popper K. R. (1992), *Wiedza obiektywna. Ewolucyjna teoria epistemologiczna*, tłum. A. Chmielewski, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Psillos S. (1999), *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*, London: Routledge.
- Putnam H. (1975), *Mind, Language, and Reality*, Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511625251>
- Putnam H. (1998), *Wiele twarzy realizmu i inne eseje*, tłum. A. Grobler, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Quine W. V. O. (1969), *Ontological Relativity and Other Essays*, New York: Columbia University Press. <https://doi.org/10.7312/quinn92204>
- Quine W. V. O. (1997), *Na tropach prawdy*, tłum. B. Stanosz, Warszawa: Wydawnictwo Spacja.
- Riess A. G., Filippenko A. V., Challis P., ..., Tonry J. (1998), *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, „The Astronomical Journal” 116(3), 1009-1038. <https://doi.org/10.1086/300499>
- Rubin V. C., Ford W. K., Thonnard J. N. (1978), *Extended Rotation Curves of High-Luminosity Spiral Galaxies. IV. Systematic Dynamical Properties, Sa→Sc*, „The Astrophysical Journal” 225, L107-L111. <https://doi.org/10.1086/182804>
- Sikora M. (red.) (2011), *Realizm wobec wyzwań antyrealizmu. Multidyscyplinarny przegląd stanowisk*, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Szydlowski M., Tambor P. (2008), *Model kosmologiczny (LCDM, CDM) w schemacie pojęciowym efektywnych teorii Wszechświata*, „Filozofia Nauki” 16(3/4) [63-64], 119-139.
- Tambor P. (2020), *Standardowy model kosmologiczny. Studium metodologiczne*, Lublin: Wydawnictwo KUL.
- Tomeczyk B. (2006), *Rozmycie granic we współczesnym sporze o realizm naukowy*, „Filozofia Nauki” 14(3) [55], 125-142.
- Worrall J. (1989), *Structural Realism: The Best of Both Worlds?*, „Dialectica” 43, 99-124. <https://doi.org/10.1111/j.1746-8361.1989.tb00933.x>

- Zeidler P. (1992), *Spór o status poznawczy teorii. W obronie antyrealistycznego wizerunku nauki*, Poznań: Wydawnictwo UAM.
- Zwicky F. (1933), *Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln*, „*Helvetica Physica Acta*” 6, 110-127.