

„Ciemność widzę, widzę ciemność!”, czyli o ciemnej materii słów kilka

* Centrum Fizyki Teoretycznej PAN

Wojciech A. HELLWING*

Współczesna kosmologia i astrofizyka oparte są na modelu Wszechświata, w którym około 30% całej gęstości energii przypada na materię niebarionową, czyli egzotyczną formę materii, zwaną ciemną materią (CM). Jest jej około 6 razy więcej niż zwykłej materii barionowej, czyli takiej, z jakiej składają się nasze ciała, planety, gwiazdy i mgławice. W tym artykule postaram się przybliżyć obecny status i prognozy na przyszłość jakże pasjonującego problemu ciemnej materii.

Co mówią niebiosa?

Obserwacyjne przesłanki za ciemną materią

Idea, że w naszym kosmosie jest o wiele więcej materii nieświecącej oraz że występuje ona w postaci egzotycznych cząstek, dojrzała w umysłach uczonych bardzo długo. Jednak gwałtowny rozwój technik obserwacyjnych w astronomii pozagalaktycznej, jaki miał miejsce w ciągu ostatnich kilku dekad, dostarczył nam tak wielu przesłanek obserwacyjnych istnienia ciemnej materii, że obecnie niebarionowa ciemna materia jest powszechnie akceptowanym składnikiem standardowego modelu kosmologicznego. Model ten to spójny obraz opisujący Wszechświat i jego ewolucję, od skal subatomowych do horyzontu Hubble’a oraz od ułamków sekundy po Wielkim Wybuchu do czasów obecnych – prawie 14 miliardów lat później. Kluczowe dla rozwoju idei ciemnej materii były obserwacje gromad galaktyk i zaskakujący problem brakującej masy w zewnętrznych częściach galaktyk spiralnych. Obecnie bardzo silne przesłanki o istnieniu ciemnej materii pochodzą z pomiarów obejmujących znacznie szersze skale czasowe i przestrzenne.

Chyba najsilniejszego argumentu dostarczają nam obserwacje mikrofalowego promieniowania relikowego, czyli mikrofalowej poświaty, jaka dotrwała do naszych czasów, a która pochodzi z epoki, gdy kosmos był młody i gorący. Analiza fluktuacji temperatury promieniowania relikowego na sferze niebieskiej ujawniła szereg charakterystycznych skal, dla których pojawiają się maksima. Za piki te odpowiadają oscylacje akustyczne w gorącej zupie pierwotnej plazmy, promieniowania i ciemnej materii, która wypełniała Wszechświat, gdy ten był bardzo młody. Okazuje się, że prosta fizyka oscylacji akustycznych w plazmie przewiduje, jak na rozmiary oraz amplitudę tych pików wpływają dwa podstawowe, a niezależne od siebie czynniki: ilość materii barionowej we Wszechświecie oraz całkowita ilość materii we Wszechświecie. Obserwatoria kosmiczne, takie jak COBE, WMAP i Planck, dostarczyły nam tak dokładnych pomiarów fluktuacji promieniowania tła, że z obserwowanej zależności pozycji i amplitudy maksimów akustycznych z bardzo dużym statystycznym prawdopodobieństwem (40 sigma!) wynika, że w młodym Wszechświecie było 6 razy więcej całkowitej materii niż materii barionowej, a zatem wskazują na $\Upsilon = 7$

uśrednione dla całego Kosmosu (Υ to tzw. *stosunek masy do światła*, o którym pisałem w poprzednim numerze, czyli z grubsza stosunek całkowitej masy do masy materii barionowej).

Inne silne dowody na istnienie niebarionowej ciemnej materii dostarcza nam Ogólna Teoria Względności. OTW przewiduje istnienie takiego zjawiska jak soczewkowanie grawitacyjne, gdzie masywne ciało (jak np. gromada galaktyk lub duża galaktyka eliptyczna) powoduje na tyle mocne zniekształcenie czasoprzestrzeni, że bieg promieni świetlnych w okolicach takiego obiektu ulega zakrzywieniu. W konsekwencji obserwator może rejestrować zniekształcone i wzmocnione obrazy galaktyk tła znajdujących się daleko za taką „soczewką”. Takie zjawiska nazywamy silnym soczewkowaniem grawitacyjnym. Słabe soczewkowanie, w odróżnieniu od silnego, polega na bardzo niewielkich zniekształceniach obrazów odległych galaktyk tła przez materię zgromadzoną na wielkich skalach w kosmicznych strukturach pomiędzy tłem a obserwatorem. Efekty silnego soczewkowania możemy rejestrować dla pojedynczych obrazów i pojedynczych soczewek, zaś efekty słabego soczewkowania są mierzalne dopiero po uśrednieniu efektu z obrazów setek lub nawet tysięcy galaktyk tła. Liczne silne soczewki, jakie obserwujemy, umożliwiają nam oszacowanie na Υ od 10 do 100 w galaktykach i $\Upsilon \sim 10$ w gromadach galaktyk, zaś pomiary słabego soczewkowania sugerują $\Upsilon = 7$ dla wielkoskalowej struktury.

Soczewkowanie grawitacyjne pozwala na relatywistyczne oszacowanie całkowitej masy. W przypadku wielu gromad galaktyk otrzymujemy również pomiary temperatury gorącego zjonizowanego gazu znajdującego się pomiędzy galaktykami. Gaz ten rozgrzany przez ściskające działanie grawitacji gromady emituje promieniowanie rentgenowskie. Jeżeli gaz pozostaje w równowadze z resztą gromady, to jego temperatura zależy od całkowitej grawitacji (a więc i masy) gromady. Dodając do tego informację o dyspersji prędkości składników gromady, możemy porównać wszystkie trzy niezależne oszacowania całkowitej masy grawitującej. W przypadku większości znanych gromad, co do których dysponujemy pomiarami pozwalającymi dokonać oszacowania masy wszystkimi trzema metodami, obserwacje znowu wskazują na $\Upsilon \sim 10$, a zatem na istnienie ciemnej materii.

Kolejny istotny pośredni dowód na istnienie ciemnej materii w postaci innych cząstek niż dobrze znane nam bariony pochodzi z rozważań dotyczących pierwotnej obfitości pierwiastków lekkich (głównie takich jak Deuter, Hel-3, Hel-4 i Lit-7). Pierwiastki lekkie, do Berylu włącznie, powstały w ciągu pierwszych trzech minut po Wielkim Wybuchu w procesie tzw. pierwotnej nukleosyntezy. Wszystkie cięższe pierwiastki powstały znacznie później w procesach związanych z ewolucją gwiazd (z wyjątkiem oczywiście Helu-4, który jest nieustannie syntezowany w jądrach gwiazd ciągu głównego). Mierząc obfitość tych lekkich pierwiastków w jałowej materii międzygalaktycznej, można dość dokładnie oszacować, jaka była obfitość pierwotna. Okazuje się, że obserwowane obfitości nakładają bardzo silne ograniczenia na ogólną liczbę nukleonów, które mogą istnieć we Wszechświecie. Najnowsze pomiary wskazują, że całkowity wkład do gęstości Wszechświata od nukleonów nie może przekraczać 5%, co w zestawieniu z tym, że szacunkowa całkowita ilość materii (np. wynikająca z pomiarów fluktuacji promieniowania tła) daje wkład około 35%, znowu kieruje nas do konstatacji, że musi istnieć około 6 razy więcej ciemnej materii niż materii zawartej w nukleonach.

W końcu jeszcze jedną bardzo ważną przesłanką na korzyść hipotezy ciemnej materii, jaką warto tutaj przytoczyć, są obserwowane własności wielkoskalowej struktury Wszechświata. Wcześniej dyskutowane obserwacje albo dotyczyły skal galaktyk i ich gromad, które są małe, jeżeli zestawione z rozmiarami całego Wszechświata, albo wczesnych etapów jego ewolucji. Toteż pomiary ewolucji i własności struktury, w jaką układają się galaktyki w największych skalach, uzupełniają nam ważną lukę w skalach czasowych i przestrzennych, z których czerpiemy argumenty za istnieniem ciemnej materii. Gdy zestawimy ze sobą obserwowaną obfitość galaktyk, fakt ich układania się w strukturę wielkiej pajęczyny (tzw. kosmiczną sieć) oraz prędkości, z jakimi galaktyki pola (czyli te, które nie należą do żadnych gromad) poruszają się w Kosmosie, dojdziemy do wniosku, że wszystkie te obserwacje dają się wyjaśnić tylko wtedy, gdy przyjmujemy, że wkład CM do całkowitej gęstości energii Wszechświata jest na poziomie 20–40%. Uwzględniając niepewność tych pomiarów, wynik ten doskonale zgadza się z ilością ciemnej materii, na jaką wskazują wszystkie poprzednio wspomniane obserwacje.

Co w detektorze piszczy?

Detekcja ciemnej materii, stan obecny

Naukowcy na przestrzeni lat zaproponowali wiele hipotez dotyczących fizycznej natury ciemnej materii. Po drodze udało się wykluczyć, że za ciemną materię mogą odpowiadać „kosmiczne śmieci”, czyli gruz w postaci roju małych planet, gwiazd i asteroid. Tutaj niepoślednią rolę odegrał polski program OGLE (*The Optical Gravitational Lensing Experiment*, Eksperyment Soczewkowania Grawitacyjnego). Ciemną materię

nie okazały się też kosmiczne neutrino. Mimo że cząstki te mają wszystkie pożądane cechy kandydata na ciemną materię, ich masa spoczynkowa jest za mała, by odpowiadać za więcej niż zaledwie 3% całej CM. Nie udało się też wyjaśnić zagadki brakującej masy za pomocą różnych propozycji zmieniających prawa fizyki, takich jak np. słynna hipoteza MOND (*MOdified Newtonian Dynamics*). MOND działał nieźle na skalach galaktycznych, ale nie był w stanie wyjaśnić ani własności mikrofalowego promieniowania tła, ani dynamiki gromad galaktyk bez dodatkowej ciemnej materii. W końcu i hipoteza o tym, że za ciemną materię odpowiada wielka liczba pierwotnych czarnych dziur, które są reliktem z czasów młodości Wszechświata, również nie przetrwała próby czasu.

Jak więc wygląda obecnie sytuacja? Otóż w ramach standardowego modelu kosmologicznego, Λ -CDM, przyjmuje się, że za ciemną materię odpowiadają nieodkryte jeszcze cząstki elementarne, tzw. WIMP-y (*Weakly Interacting Massive Particle*), czyli oddziałujące słabo jądrowo masywne cząstki. Od lat najpoważniejszym kandydatem są tzw. neutralina, tj. cząstki pojawiające się w teorii supersymetrii, złożone ze zmieszanych supersymetrycznych odpowiedników fotonu, bozonu Z i dwóch skalarnych bozonów Higgsa. Takie hipotetyczne neutralina mogły powstać we wczesnym Wszechświecie jako produkt uboczny pierwotnej kipieli termicznej – w obfitości odpowiedniej, by być idealnym kandydatem na tzw. zimną ciemną materię.

Alternatywą dla supersymetrycznych neutralin jest sterylne neutrino. To też WIMP, ale nie wymaga wprowadzenia supersymetrii. Cząstka taka pojawia się w minimalnym rozszerzeniu modelu standardowego cząstek elementarnych. Sterylne neutrino byłoby znacznie lżejsze od neutralin, ale wciąż tysiącrotnie masywniejsze niż zwykle neutrino. Z uwagi na swoją małą masę taka cząstka byłaby kandydatem na ciepłą ciemną materię. Detekcja sterylnego neutrino w ziemskich warunkach jest bardzo trudna, a to z uwagi na fakt, że te hipotetyczne cząstki poza grawitacją oddziałują nieznacznie tylko z pozostałymi neutrinami, ignorując całą resztę cząstek elementarnych.

Zimna, ciepła czy gorąca? Nierelatywistyczne vs Relatywistyczne prędkości resztkowe. Ciemna materia jako taka nie oddziałuje z materią normalną w zwykły sposób, toteż gdybyśmy do wiadra pełnego ciemnej materii wsadzili zwykły termometr, to nie pokazałby on wcale jej temperatury. Mówiąc o ciemnej materii *gorąca* lub *zimna*, mamy na myśli to, jak duże są prędkości resztkowe cząstek danego typu CM. Jeżeli ciemna materia powstała w młodym, gęstym Wszechświecie, kiedy znajdowała się z resztą Wszechświata w równowadze termodynamicznej, to do dzisiaj jej cząstki zachowałyby charakterystyczne prędkości resztkowe związane z temperaturą, jaką miał Kosmos, gdy ciemna materia powstawała. Jeżeli cząstki ciemnej materii są lekkie, to oddzieliły się od reszty pierwotnej zupy, kiedy Wszechświat był jeszcze bardzo gorący, i zachowały duże prędkości resztkowe (porównywalne z prędkością światła). O takiej ciemnej materii mówimy, że jest *gorąca* (są nią np. kosmiczne neutrino). Jeżeli cząstki CM są bardzo masywne (jak np. WIMP-y), to oddzieliłyby się od kosmicznej zupy znacznie później, gdy Wszechświat zdążyłby nieco ostygnąć. Taka ciemna materia ma bardzo małe prędkości resztkowe (rzędu m/s) i mówimy, że jest *zimna*. Pomiędzy tymi dwoma scenariuszami znajduje się całe spektrum innych możliwości. Na przykład sterylne neutrino nazywane są *ciepłą ciemną materią*, gdyż spodziewamy się, że ich prędkości resztkowe są znacząco większe niż w przypadku WIMP-ów.

W latach 80. XX wieku siła i jakość argumentów obserwacyjnych wysuwanych przez astronomów spowodowały, że fizycy cząstek zaczęli na poważnie brać pomysł istnienia niebarionowej ciemnej materii. Od tamtego czasu fizycy przeprowadzają różne eksperymenty, których celem jest bezpośrednia detekcja cząstki CM na Ziemi. Idea detekcji ciemnej materii w laboratorium opiera się na zasadzie, jaką stosuje się, obecnie już rutynowo, dla zwykłych neutrin. Otóż oczekujemy, że cząstki ciemnej materii z halo Drogi Mlecznej, przelatujące nieustannie przez Ziemię, od czasu do czasu zderzać się będą elastycznie z jądrami ziemskich atomów. Takie zderzenia powodują efekt odrzutu jądra (gdyż część pędu cząstki CM jest przekazana jądru). Choć energia tego zjawiska jest bardzo mała, to przy odpowiedniej konstrukcji detektora jest możliwa do zaobserwowania. Spotykamy się powszechnie z czterema typami detektorów ciemnej materii: kryształowe detektory kriogeniczne, scyntylatory gazów szlachetnych, scyntylatory krystaliczne i komory pęcherzykowe. Stosowane tutaj techniki są bardzo różne, lecz we wszystkich detektorach kluczem do sukcesu jest odpowiednie poznanie szumu, który produkuje sygnał tła. Ponieważ spodziewamy się, że zderzenia cząstek CM z jądrami zachodzą bardzo rzadko, to w ziemskich laboratoriach dominującym sygnałem jest statystyczne tło. Czulość takich detektorów zależy również od własności fizycznych kandydata na cząstkę ciemnej materii. Chodzi tutaj głównie o masę spoczynkową, ale ważne jest również, czy w zderzeniach z jądrami istotny jest spin cząstek CM. Dotychczas żaden spośród bardzo wielu eksperymentów nie potwierdził bezpośredniej detekcji ciemnej materii. Wiele wstępnie pozytywnych wyników później zweryfikowano jako sygnały pochodzące od słabo rozpoznanego tła. Jedynym wyjątkiem jest wieloletni program DAMA/NaI i DAMA/Libra, w którym czulość na detekcję jest stosunkowo mała, ale sygnał jest całkowany względem czasu. W tym podejściu szuka się rocznej modulacji w sygnale, która powinna pojawiać się na skutek poruszania się Ziemi dookoła Słońca i Słońca dookoła centrum Galaktyki. Tło pochodzące z ziemskich źródeł nie powinno podlegać takiej rocznej zależności. Toteż można spodziewać

się, że obserwowana modulacja z roczną częstością powinna pochodzić od sygnału pozaziemskiego, czyli od halo ciemnej materii, w którym porusza się Ziemia. W ciągu ostatnich dwóch dekad obserwacji eksperymenty DAMA rzeczywiście zanotowały taki sygnał o rocznej częstości. Interpretacja, że źródłem sygnału DAMA jest ciemna materia, stoi jednak w sprzeczności z brakiem bezpośredniej detekcji we wszystkich pozostałych eksperymentach. Dlatego kwestia ta jest wciąż przedmiotem żywej debaty uczonych.

W czasie gdy w ziemskich laboratoriach fizycy polują na nieuchwytną cząstkę ciemnej materii, swojej broni nie złożyli jeszcze astronomowie. Okazuje się bowiem, że zarówno neutralina, jak i sterylne neutrino mogą nam dać o sobie znać za pomocą sygnałów z obiektów astrofizycznych. Neutralina są swoimi własnymi antycząstkami, a zatem ulegają same ze sobą procesowi anihilacji, w którym emitują kwant promieniowania gamma. Taki sygnał jest proporcjonalny do kwadratu gęstości neutralinowej ciemnej materii, a więc byłby możliwy do wykrycia tylko z najbardziej centralnych obszarów halo ciemnej materii. Tylko środek halo naszej własnej Drogi Mlecznej oraz kilka galaktyk satelitarnych są na tyle blisko, by móc oczekiwać rejestracji takiego sygnału. Nasze orbitalne teleskopy gamma (takie jak FERMI-sat) wciąż go poszukują. Niestety są inne astronomiczne obiekty, które mogą imitować sygnał gamma od anihilacji neutralin. Mowa tutaj na przykład o dużej populacji gwiazd neutronowych. Toteż wyłuskanie czystego sygnału gamma od ewentualnej ciemnej materii z tła astrofizycznego jest nie lada problemem. Podobnie sprawa ma się w przypadku sterylne neutrino. Ta cząstka nie ulega samoanihilacji, ale jest niestabilna i rozpada się, emitując foton promieniowania rentgena. Sygnał pochodzący od tego typu rozpadów byłby proporcjonalny do gęstości ciemnej materii. Obecnie również trwają poszukiwania śladów takich sygnałów i chociaż pojawiały się doniesienia o zaobserwowaniu sygnałów z kierunku galaktyki w Andromedzie czy Gromady w Perseuszu, to wciąż trwa debata, czy sygnały te pochodzą z rozpadu ciemnej materii, czy od zwyczajnych obiektów astrofizycznych.

Dlaczego to jest istotne?

Wiedza o fizycznej naturze i elementarnych własnościach cząstek ciemnej materii jest kluczowa dla lepszego poznania i zrozumienia procesów rządzących powstawaniem struktur i galaktyk w Kosmosie. Bez konkretnej wiedzy o CM nie sposób zrozumieć, w jakiej części za ewolucję i powstawanie galaktyk odpowiadają skomplikowane procesy związane z powstawaniem gwiazd i ewolucją gazowego ośrodka międzygwiazdowego, a w jakiej bardziej fundamentalne prawa fizyki (np. teoria grawitacji) i sam model kosmologiczny, który opisuje cały Wszechświat. Gdybyśmy znali dokładnie własności ciemnej materii na poziomie kwantowym i cząsteczkowym, to wtedy można by przewidzieć, jak jej własności powinny manifestować się w obserwowanych cechach oraz w ewolucji galaktyk i ich satelitów. Byłby to wówczas bardzo poważny test całej naszej wiedzy o fizyce powstawania galaktyk i o ewolucji Wszechświata. Dobrze też byłoby w końcu wiedzieć, z czego tak naprawdę składa się 6/7 masy grawitującej we Wszechświecie!