



## Ciemna materia

*Paweł F. Góra  
Instytut Fizyki UJ*

Trudno w to uwierzyć, ale w kosmicznej skali cała materia, z której zbudowane są nasze ciała, Ziemia, Słońce i wszystkie gwiazdy, jest nieledwie zanieczyszczeniem. Większość materii Wszechświata jest dla nas niewidzialna – wedle obecnych szacunków, aż 84% materii Wszechświata stanowi tajemnicza substancja, zwana ciemną materią.

### Odkrycie ciemnej materii

Jako pierwszy istnienie ciemnej materii zasugerował szwajcarski astronom, Fritz Zwicky, już w roku 1933. Badał on gromadę galaktyk leżącą w gwiazdozbiornie Warkocz Bereniki i ze zdumieniem stwierdził, iż galaktyki poruszają się tam ze znacznie większymi prędkościami, niż wynikałoby to z ich wzajemnego oddziaływania grawitacyjnego – wyglądało to tak, jakby jakaś niewidzialna materia rozpędzała galaktyki swoim grawitacyjnym wpływem. Skoro materia ta była niewidzialna, nie mogła oddziaływać elektromagnetycznie, nie mogła emitować ani pochłaniać fal elektromagnetycznych w żadnym zakresie. Nie świeciła, a więc była „ciemna”. Stąd właśnie wzięła się jej nazwa.

W późniejszych latach kolejni astronomowie dokładali swoje dane do obserwacji Zwicky’ego. W końcu zrozumiano, że także gwiazdy w galaktykach poruszają się znacznie szybciej, niż wynikałoby to z grawitacyjnego wpływu widzialnej materii. Astronomowie wiedzą, że tylko 1/9 (około 11%) zwykłej materii stanowi budulec gwiazd, planet i innych „normalnych” obiektów astronomicznych – reszta, czyli 8/9 zwykłej, podkreślamy, zwykłej materii występuje w postaci bardzo rozrzedzonego, zjonizowanego gazu, wypełniającego galaktyki i niezmierzone przestrzenie pomiędzy galaktykami w gromadach galaktyk. Gaz ten pochłania i wysyła fale elektromagnetyczne, możemy go więc obserwować, ale i tego rozrzedzonego gazu było za mało, aby utrzymać galaktyki i gromady galaktyk w ich obserwowanym kształcie. Gdyby nie ciemna materia, galaktyki, w tym nasza Droga Mleczna, po prostu by się rozpadły. W latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX wieku zgromadzono w końcu tak wiele danych, iż większość astronomów i fizyków nabrała przekonania, że jakaś forma ciemnej materii musi istnieć. Co ciekawe, najnowsze badania pokazują, że pewne typy galaktyk nie zawierają ciemnej materii i nie potrzebują jej do zachowania stabilności!

### Pierwsze próby wyjaśnienia

Czym jest ciemna materia? Początkowo przypuszczano, że ciemna materia to mniej więcej normalne obiekty astronomiczne, których dotąd po prostu *nie udało się* zaobserwować, gdyż emitują one zbyt mało światła. Mogły to być brązowe karły, gwiazdy neutronowe lub czarne dziury, rezydujące na obrzeżach galaktyk, w tak zwanym halo. Nadano im wobec tego nazwę MACHO (*Massive – Compact Halo Object* – masywny, zwarty obiekt halo), zgodnie z coraz bardziej popularną zasadą, iż połowa sukcesu w fizyce polega na wymyśleniu chwytliwej nazwy dla badanych zjawisk<sup>1</sup>. Skrupulatne, wieloletnie poszukiwania MACHOs pokazały, że choć w galaktycznych halo występują obiekty tego typu, najwyraźniej jest ich o wiele za mało, aby ich sumaryczny wpływ mógł odpowiadać ciemnej materii.

Zaczęto zatem przypuszczać, iż ciemną materię stanowią jakieś cząstki elementarne, być może nieznanie ziemskiej nauce. Cząstkom tym nadano nazwę WIMP<sup>2</sup> (*Weakly Interacting Massive Particle* – słabo oddziałująca masywna cząstka). Kosmologowie uświadomili też sobie, iż ciemna materia musiała wywrzeć wpływ na bardzo wczesne etapy ewolucji Wszechświata. Cenne informacje o anizotropii promieniowania relikтового, zdobyte przez satelitę COBE (Nagroda Nobla w roku 2006) i jego następcę, satelitę WMAP, narzuciły pewne ograniczenia na modele ciemnej materii. Po licznych dyskusjach i kontrowersjach, większość specjalistów – choć bynajmniej nie wszyscy! – zgodziła się, że ciemną materię stanowią pewne cząstki elementarne, obdarzone masą i poruszające się raczej powoli. Model taki nazywa się modelem *zimnej ciemnej materii*.

W modelu tym ciemna materia w normalnych warunkach oddziałuje ze zwykłą materią, i z sobą samą, tylko grawitacyjnie. Jeśli jednak energia oddziaływania jest dostatecznie duża, ciemna materia może dodatkowo oddziaływać z materią zwykłą – efekty takiego oddziaływania mogą być widoczne za pomocą zwykłych (choć bardzo czułych) metod. Można powiedzieć, że przy dostatecznie wysokich energiach ciemna materia nieco się rozjaśnia.

I to właściwie wszystko, co o ciemnej materii można zakładać od strony teoretycznej.

### Soczewkowanie grawitacyjne

Jedną z konsekwencji Ogólnej Teorii Względności jest zakrzywienie toru promieni świetlnych przelatujących koło masywnego obiektu. Masywne, rozległe przestrzennie obiekty astronomiczne, takie jak gromady galaktyk, mogą działać jak soczewki – mogą zniekształcać, a nawet rozszczepiać obraz jakiegoś odległego obiektu, którego światło przez nie przechodzi. Choć możliwość tę prze-

---

<sup>1</sup> Macho oznacza silnego mężczyznę, skłonnego do dominacji nad innymi, ale na ogół niezbyt rozcgarniętego.

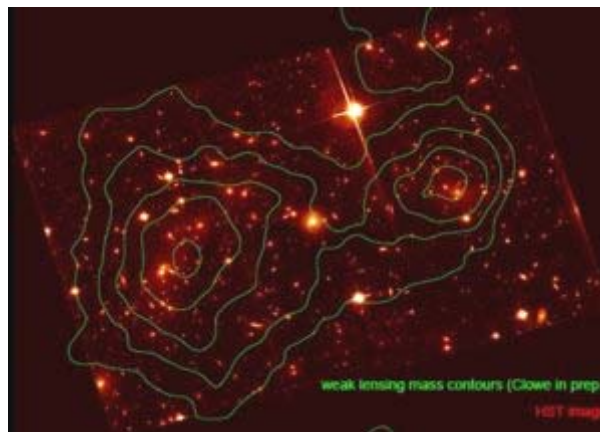
<sup>2</sup> Wimp (ang.) – słabeusz, tchórz, ciamajda.

widziano już w latach trzydziestych XX wieku, przy udziale Alberta Einsteina i znanego już nam Fritza Zwicky'ego, soczewkowanie grawitacyjne po raz pierwszy zaobserwowano dopiero w roku 1979. Od tego czasu stało się ono jednym z najważniejszych narzędzi badawczych astronomii pozagalaktycznej. Narzędzia tego możemy użyć także niejako w drugą stronę: jeśli wiemy, jak powinno wyglądać to, czego zniekształcony na skutek soczewkowania grawitacyjnego obraz oglądamy, możemy na tej podstawie obliczyć rozkład masy obiektu, który zadziałał jako soczewka. Tego właśnie sposobu użyto do potwierdzenia istnienia ciemnej materii.

W sierpniu 2006 ogłoszono wyniki badania gromady galaktyk Pocisk za pomocą kosmicznego teleskopu Chandra. Okazało się, że gromada ta składa się naprawdę z dwu gromad, ulegających kosmicznemu zderzeniu. Galaktyki z tych gromad właściwie nie odczuły zderzenia – minęły się jak rzadkie chmury pyłu pędzące w przeciwne strony i tylko nieznacznie spowolniły swój lot. Co innego międzygalaktyczny gaz, stanowiący zdecydowaną większość zwykłej materii wchodzącej w skład zderzających się gromad: gaz oddziałuje elektromagnetycznie, a zatem gaz z jednej gromady dosłownie zderzył się z gazem z drugiej. Obie chmury gazu znacząco wyhamowały swój lot. W efekcie prawie cały międzygalaktyczny gaz gromady Pocisk zgromadził się w stosunkowo niedużym obszarze zderzenia (rysunek 1). Natomiast ciemna materia oddziałuje ze wszystkim – także z ciemną materią z drugiej gromady – tylko grawitacyjnie i praktycznie rzecz biorąc nie odczuwa zderzenia. Za pomocą soczewkowania grawitacyjnego udało się odtworzyć rozkład pola grawitacyjnego wytwarzanego przez zderzające się gromady galaktyk (rysunek 2). Pole to, jak widać, nie jest związane ze zderzającym się gazem. Nie może też być wytwarzane przez widzialne galaktyki, bo te stanowią znikomą część masy całej gromady. Zatem źródłem pola grawitacyjnego musi być ciemna materia, wokół której uformowała się cała gromada i której rozkład nie jest praktycznie naruszony przez zderzenie.



Rysunek 1. Gromada galaktyk Pocisk



Rysunek 2. Linie stałego potencjału grawitacyjnego nałożone na zdjęcie gromady Pocisk

To jest bardzo piękny wynik. Wykorzystano kosmiczne zderzenie do usunięcia międzygalaktycznego gazu z obszaru, który powoduje grawitacyjne soczewkowanie, a więc który musi zawierać mnóstwo materii. To bardzo sprytny pomysł. W ten sposób dostarczono mocnego dowodu świadczącego o istnieniu ciemnej materii i w dodatku pozwalającego na oszacowanie ile tej ciemnej materii jest. Pomiar ten przekonał większość zatwardziałych sceptyków, którzy dotychczas wątpili w istnienie ciemnej materii.

### Wielkie lowy

Wierzmy zatem, że ciemna materia naprawdę istnieje, ale pojęcia nie mamy z czego jest ona zbudowana. Ten, kto pierwszy zdobędzie bezpośrednio, namacalne ślady cząstek ciemnej materii, zdobędzie wielką sławę i, zapewne, Nagrodę Nobla. Wyścig po odkrycie natury ciemnej materii staje się jednym z najbardziej ekscytujących wyścigów współczesnej fizyki. Liczy się przede wszystkim to, kto pierwszy dostarczy niezbitych dowodów. Wszyscy inni będą się cieszyć mizerną sławą tego, kto potwierdził wyniki uzyskane przez kogoś innego.

Poszukiwania utrudnia brak dobrego modelu teoretycznego, nie wiadomo bowiem czego i gdzie szukać. Z drugiej strony, nie mamy dobrego modelu teoretycznego, gdyż mamy zbyt mało danych obserwacyjnych potrzebnych do jego sformułowania. Wygląda to na błędne koło, ale fizycy nie załamują rąk.

Specjaliści od fizyki cząstek elementarnych przypuszczają, że ciemną materię stanowią tak zwane cząstki supersymetryczne. Liczą oni na to, iż cząstki te uda się odkryć w akceleratorze LHC, gdy tylko odzyska on pełną funkcjonalność po awarii, której uległ zaledwie kilka dni po swoim oficjalnym uruchomieniu. Spodziewamy się, że przy zderzeniach wysokoenergetycznych cząstek zwykłej materii, produkowane będą także cząstki supersymetryczne.

Konkurencyjne grupy poszukują ciemnej materii bezpośrednio w przestrzeni kosmicznej. Od czasu do czasu powinno dochodzić do zderzeń cząstek ciemnej materii, w wyniku których produkowane będą zwykłe cząstki i antycząstki. Śladów takich procesów szuka europejski satelita PAMELA<sup>3</sup> (*Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*). Ostatnio grupa zawiadująca PAMELĄ doniosła o odkryciu strumieni wysokoenergetycznych pozytonów (antyelektronów), a wyniki te zostały potwierdzone przez innych badaczy, analizujących dane zarejestrowane przez aparaturę umieszczoną na balonach stratosferycznych. Być może świadczy to o zaobserwowaniu zderzeń cząstek ciemnej materii – być może, ale nie z całą pewnością. Są bowiem pewne trudności w interpretacji tej kategorii danych. W szczególności zarejestrowany sygnał jest zbyt silny! Gdyby faktycznie miał on pochodzić od ciemnej materii, musiałoby to świadczyć o tym, iż Ziemia właśnie znajduje się w wyjątkowo gęstym obłoku tej substancji. Tak więc wydaje się, że PAMELA i balony faktycznie *coś* wykryły, ale tym czymś niekoniecznie jest ciemna materia. Równie dobrze może to być sygnał pochodzący od jakiegoś nieodkrytego jeszcze pulsara lub mikrokwazara.

Z publikacją danych PAMELI wiąże się ciekawa historia. Otóż autorzy tego eksperymentu przedstawili swoje dane przed ich oficjalną publikacją, na pewnej konferencji w sierpniu 2008 roku. Danych tych jednak nikomu nie udostępniłi do analizy, jako że przedwczesne upublicznienie danych mogłoby uniemożliwić im publikację w najbardziej prestiżowych czasopismach. Ktoś jednak sfotografował wyświetlony na konferencji slajd, a uzyskane w ten sposób dane umieścił w swojej publikacji, zaznaczając jednak, iż pochodzą one z PAMELI. W ten sposób wilk był syty i owca cała: Autorzy PAMELI nie utracili możliwości publikacji na skutek przedwczesnego ujawnienia danych, a zarazem świat naukowy uzyskał dostęp do wartościowej informacji na skutek ni mniej, ni więcej, tylko naukowego szpiegostwa. Czy można powiedzieć, że było to szpiegostwo w słusznej sprawie?

Jeszcze inne podejście prezentują autorzy eksperymentu DAMA/LIBRA, ulokowanego w tunelu pod masywem Gran Sasso w Apeninach. Eksperyment ten rejestruje nadlatujące z kosmosu cząstki, skupiając się na zdarzeniach, których nie udaje się wytłumaczyć konwencjonalnymi metodami. Autorzy eksperymentu donieśli, iż zaobserwowali słaby, ale wyraźny sygnał wykazujący roczną modulację i na tej podstawie twierdzą, że jest to sygnał pochodzący od cząstek ciemnej materii, owych tajemniczych WIMPów. Dlaczego? Spójrzmy na to w ten sposób: umieszczony na Ziemi detektor zderza się z oceanem WIMPów. Energia zderzenia zmienia się w zależności od tego, jaka jest prędkość Ziemi względem „wiatru WIMPów” (WIMPy poruszają się nierelatywistycznie). Ziemia, wraz z całym Układem Słonecznym, porusza się wokół centrum Galaktyki z prędkością około

---

<sup>3</sup> Kolejna fajna nazwa.

200 km/s. Ponadto Ziemia porusza się wokół Słońca z prędkością rzędu 30 km/s. Przez pół roku okołosłoneczny ruch Ziemi zwiększa energię zderzenia z WIM-Pami, przed drugie pół roku – osłabia. Im większa energia zderzenia, tym większe prawdopodobieństwo zajścia reakcji, którą detektor może zarejestrować. Stąd właśnie miałyby wynikać roczna modulacja sygnału. Wszystko pięknie, ale ponieważ eksperyment DAMA/LIBRA nie mówi absolutnie nic o naturze rejestrowanych cząstek, nie wiadomo co tak naprawdę widzimy – nie muszą to być cząstki ciemnej materii, może to być coś innego, na przykład wysokoenergetyczne neutrino słoneczne, których strumień także powinien wykazywać roczną modulację na skutek zmiany odległości Ziemi od Słońca.

### **Zważyć niewidzialne**

Informacje, których dostarczyły pomiary prędkości gwiazd w galaktykach i galaktyk w gromadach, soczewkowanie grawitacyjne oraz analiza anizotropii promieniowania tła, pozwalają oszacować całkowitą ilość ciemnej materii we Wszechświecie. Aż 84% całej materii to materia ciemna, zaledwie 16% to materia zwykła. Wziąwszy pod uwagę fakt, że większość zwykłej materii występuje w postaci międzygalaktycznego gazu, widzimy, iż masa wszystkich gwiazd Wszechświata i ich układów planetarnych, to zaledwie około półtora procent całej masy obserwowalnego Wszechświata. Zaiste, z punktu widzenia bilansu masy, jesteśmy nieistotnym zanieczyszczeniem.

Ciemna materia ma bardzo niewielką gęstość – niewielką, ale jednak większą od gęstości międzygalaktycznego gazu – a że przy tym wypełnia gigantyczne przestrzenie w gromadach galaktyk, jest jej bardzo, bardzo, bardzo dużo. Zwarte skupiska zwykłej materii (gwiazdy, planety) mają gęstość o wiele większą niż ciemna materia, tyle tylko, iż takie zwarte skupiska występują niezwykle rzadko.

Ostatnio podjęto próbę oszacowania całkowitej masy ciemnej materii znajdującej się w pobliżu Ziemi. Na pomysł jak to zrobić wpadł amerykański fizyk Stephen L. Adler. Wystarczy, powiada, mieć z jednej strony dokładne oszacowanie łącznej masy Ziemi i Księżyca, z drugiej zaś niezależne oszacowania masy Ziemi i masy Księżyca. Odejmując jedno od drugiego, znajdziemy masę ciemnej materii leżącej pomiędzy Ziemią a Księżycem.

Łączną masę układu Ziemia–Księżyc można wyznaczyć poprzez zbadanie ich wzajemnego oddziaływania grawitacyjnego, to zaś możemy poznać dzięki bardzo precyzyjnym pomiarom orbity Księżyca. Do tak wyznaczonej masy swój wkład ma masa Ziemi, masa Księżyca i masa wszystkiego, co znajduje się pomiędzy Ziemią a Księżycem. Wpływ satelitów i różnego kosmicznego drobiazgu można zaniedbać, nie można jednak zaniedbać wpływu ciemnej materii.

Masę samej Ziemi można wyznaczyć obserwując orbitę jakiegoś bliskiego Ziemi sztucznego satelity – wybrano satelitę LAGEOS. Podobnie, masę Księżyca można wyznaczyć badając jego grawitacyjny wpływ na blisko przelatujące

planetoidy – wybrano planetoidę Eros. Odejmując sumę tak obliczonych mas Ziemi i Księżyca od łącznej masy układu tych dwu ciał, dostajemy oszacowanie masy tego, co znajduje się pomiędzy orbitą LAGEOSa a Księżycem. Daje to górne ograniczenie na masę znajdującą się tam ciemnej materii. W wyniku obliczeń Adler otrzymał  $1,5 \times 10^{15}$  kg, czyli około 225 ton na każdego człowieka. W liczbach bezwzględnych wydaje się to dużo, ale jest to zaledwie  $4 \times 10^{-9}$  (cztery miliardowe) masy Ziemi, a więc jednak dość mało: na każdy gram masy Ziemi przypadają zaledwie cztery nanogramy okołozemskiej ciemnej materii.

### Poszukiwania trwają

Identyfikacja ciemnej materii i lepsze – ba, jakiegokolwiek! – poznanie jej własności jest jednym z najważniejszych wyzwań, jakie stoją przed fizyką. Bez tego nie będziemy mogli ani rozwijać modeli kosmologicznych, ani zrozumieć ewolucji Wszechświata, ani przewidzieć jego przyszłych losów. Choć dziś wydaje się to bardzo odległe, sądzę, że ciemną materię uda się kiedyś zaprząć do jakichś ludzkich procesów technologicznych, wynalazków. Do jakich? Nie mam najmniejszego pojęcia. Historia uczy jednak, że nie ma bezużytecznych odkryć naukowych, są natomiast takie, których użyteczności jeszcze nie poznaliśmy.

To bardzo frustrujące, ale fizyka, przy całej swej potędze i przy wszystkich wspaniałych osiągnięciach, potrafi cokolwiek powiedzieć o bardzo niewielkiej części całkowitej materii Wszechświata. Nie wspomnieliśmy przy tym o zjawisku jeszcze bardziej tajemniczym niż ciemna materia, a mianowicie o tak zwanej ciemnej energii, która – o ile istnieje – działa jak swego rodzaju „antygravitacja”, przyspieszając ekspansję Wszechświata. O tym, że przyspieszenie ekspansji rzeczywiście jest faktem, wnioskujemy na podstawie obserwacji supernowych w odległych galaktykach. O ciemnej materii wiemy, że istnieje, w kwestii ciemnej energii dysponujemy tylko niepotwierdzonymi hipotezami. Ale jeżeli ciemna energia rzeczywiście istnieje, to wedle dostępnych dziś danych, zawiera w sobie około 72% całkowitej energii Wszechświata. Mniej więcej 23% przypada na ciemną materię, niecałe 5% na zwykłą materię i wszelkie znane formy promieniowania, przy czym materia wszystkich gwiazd i ich układów planetarnych zawiera zaledwie 0,4% całkowitej energii Wszechświata.

Zaprawdę, jesteśmy jedynie drobnym zaburzeniem nieznanego nam, tajemniczej Całości.

Część z zamieszczonych tu informacji została wcześniej opublikowana na blogu <http://swiat-jaktodziala.blog.onet.pl>, którego jestem współautorem. Zainteresowanych Czytelników odsyłam do tego blogu, gdzie można znaleźć odnośniki do cytowanych prac oryginalnych i do wielu interesujących zasobów sieciowych.