Krótka historia ciemnej materii

*Wojciech A. HELLWING**

* Centrum Fizyki Teoretycznej PAN

Fotografia na okładce: wizualizacja ewolucji czasowej wielkoskalowej sieci, w jaką układa się ciemna materia.

Na podstawie symulacji P-Millennium i oprogramowania SWIFT (`swift.dur.ac.uk`)

Ciemna materia i problem wyjaśnienia jej fizycznej natury to jedna z największych zagadek współczesnej nauki. Materia ta, w przeciwieństwie do znanej nam dobrze materii „świecącej" (lub też, jak kto woli, jasnej), pozostaje wciąż nieuchwytna we wszystkich ziemskich eksperymentach. O istnieniu tej tajemniczej formy materii, która nie oddziałuje elektromagnetycznie ani silnie jądrowo, najbardziej przekonani są astronomowie. Bez ciemnej materii prawie nic, co obserwujemy w sferach niebieskich, nie miałoby sensu i nie dało się wyjaśnić za pomocą znanych nam praw fizyki. Może się wydawać, że istnienie niewidocznej ciemnej materii jest pomysłem rodem z powieści science-fiction. Idea, że może istnieć materia, której nasze zwyczajne zmysły nie mogą uchwycić, jest jednak bardzo stara. Przyjrzyjmy się zatem jej historii.

Historia dawna

Istnieniem materii, której nie da się bezpośrednio obserwować z Ziemi, zajmowali się już starożytni Grecy. Epikur w „Liście do Herodota" sugerował, że istnieje nieskończona liczba światów, „niektóre takie jak nasz, a pozostałe zupełnie inne". W rozważaniach filozoficznych Epikura, dowodzących, że mogą istnieć odmienne światy, znajdujemy zatem esencję idei ciemnej materii, która jest przecież „zupełnie inna" niż ta, z jakiej składa się nasz świat. Co ciekawe, myśl starożytnych mędrców potrafiła pójść dalej. Oto Filolaos z Tarentu, który przynależał do ruchu pitagorejczyków, przedstawił hipotezę istnienia „Antichtonu", czyli Przeciwziemi. Przeciwziemia miałaby orbitować wokół centralnego ognia dokładnie po przeciwnej stronie niż Ziemia. Toteż siłą rzeczy nie mogłaby być z Ziemi dostrzeżona. Dziś powiedzielibyśmy, że Antichton to przykład ciemnej materii.

Pierwszy potężny przełom w dociekaniach na temat tego, co znajduje się w sferach niebieskich, dokonał się dzięki Galileuszowi i jego rewolucyjnemu wynalazkowi – lunecie astronomicznej. Jak wiemy z podręczników historii, uczony za pomocą swojej lunety nie tylko odkrył istnienie czterech dużych księżyców Jowisza, ale również odkrył istnienie gór, „mórz" i kraterów na powierzchni Księżyca. Wykazał też, że blada smuga zamglonego światła biegnąca w poprzek nieboskłonu, Droga Mleczna, tak naprawdę składa się z ogromnej liczby słabych gwiazd. Zauważmy, z jak istotnym przełomem mamy tutaj do czynienia. Dzięki nowym technikom obserwacji (luneta) udało się wykazać, że istnieje w niebiosach materia (słabe gwiazdy i księżyce planet), o której nie mieliśmy wcześniej pojęcia. Odkrycia Galileusza i jemu współczesnych uczonych pozwoliły obalić obowiązującą przez tysiąclecia arystotelesowską wizję niezmiennego i doskonałego świata niebios.

Ciemne obłoki, planety i gwiazdy

Następnym milowym krokiem na drodze do zbadania i wyjaśnienia praw rządzących ruchami ciał niebieskich było opublikowanie w 1687 roku przez Izaaka Newtona jego opus magnum, czyli „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica". Zawarte tam prawo powszechnego ciążenia pozwoliło wyjaśnić pochodzenie praw ruchu orbitalnego Keplera oraz uzbroiło uczonych w narzędzia, dzięki którym można było wreszcie wyznaczać masy ciał niebieskich. Wychodząc z założenia, że grawitacja jest naprawdę siłą powszechną, prawie sto lat później John Michell zasugerował, że również światło powinno podlegać jej prawom. Niedługo potem Laplace, opierając się na teorii Newtona, wykazał, że jeżeli tak jest w istocie, to mogłyby istnieć obiekty potencjalnie tak masywne, że ich grawitacja nie pozwalałaby nawet światłu się z nich wydostać. Słynną sugestię Laplace'a uważa się za pierwszą w historii wzmiankę o obiektach, które obecnie nazywamy czarnymi dziurami. W naszych rozważaniach jest jednak istotne, że prawa fizyki dopuszczają istnienie obiektów, które grawitują, a których nie widać. Czyli wypisz, wymaluj mamy tu ciemną materię w pewnej postaci.

W XIX wieku francuski matematyk Urbain Le Verrier badając zaburzenia orbity Urana, postulował, że musi istnieć masywne nieznane ciało, które swoją grawitacją wpływa na orbitę Urana. Przewidziane przez Le Verriera ciało niebieskie odkrywa już po godzinie obserwacji (jakże precyzyjne były obliczenia Le Verriera i jak bardzo dokładną okazała się teoria Newtona!) Johann Galle. Mowa oczywiście o Neptunie, najdalszej planecie Układu Słonecznego. Neptun był zatem najprawdziwszą ciemną materią! Nieznanym nam obiektem, o którego istnieniu wiedzieliśmy tylko dzięki rejestrowaniu efektów, jakie wywierała jego grawitacja. I chociaż w teleskopie Gallego Neptun objawił się jako zwykła planeta świecąca odbitym słonecznym blaskiem, to jego odkrycie za pomocą porównania obserwacji ruchu znanych nam planet z przewidywaniami, jakie daje teoria grawitacji, utorowało drogę metodzie wnioskowania o ciemnej materii, jaką obecnie powszechnie stosujemy w astronomii.

Przesłanki z dynamiki

Przenieśmy się teraz do czasów *fin de siècle* i początków XX wieku. Wielcy astronomowie tego czasu badali średnią gęstość materii gwiazdowej w okolicach Słońca oraz w całej Drodze Mlecznej. Jednym z pionierów zastosowania bardzo ważnej, jak zobaczymy później, metody dynamicznej do szacowania masy i gęstości był lord Kelvin. Argument, jaki wysunął, był zarazem

bardzo prosty i bardzo mocny: jeżeli gwiazdy w Drodze Mlecznej można opisać jako gaz cząstek poruszających się zgodnie z siłami grawitacji, to wtedy można wykazać, że istnieje relacja pomiędzy rozmiarami całego grawitującego systemu a dyspersją prędkości gwiazd. Takie pierwsze zastosowanie „teorii gazów" do systemu gwiezdnego Galaktyki dało podwaliny pod współczesne szeroko stosowane metody dynamicznego wyznaczania masy (tj. na podstawie prędkości składników systemu). Podążając śladami Kelvina inni astronomowie, tacy jak Kapteyn, Öpik czy w końcu Oort, wykazali, że ilość ciemnej materii w Galaktyce (tj. głównie w okolicach Słońca i w galaktycznym dysku) nie powinna przekraczać ilości materii świecącej. Astronomowie przy tych badaniach używali bardzo ważnego pojęcia: Υ – stosunku masy-do-światła (*mass-to-light ratio*).

Jeżeli znamy związek między jasnością L a masą gwiazdy M oraz rozkład wielkości gwiazd w galaktyce, to wiemy, jak wiele powstaje średnio gwiazd o danej masie. Możemy wówczas wskazać, jak wiele masy gwiazdowej średnio przypada na jednostkę jasności. Wygodnym punktem odniesienia jest oczywiście nasze Słońce, które z definicji ma $\Upsilon_\odot \equiv 1 M_\odot/1 L_\odot$, co w jednostkach SI wynosi 5133 kg/W. Zakładając dla danej galaktyki średni stosunek masy do jasności, który najczęściej jest bliski $\Upsilon_\odot$, ale dla młodych galaktyk wzrasta, i mierząc jasność absolutną galaktyki, możemy oszacować ilość masy świecącej. Podobnie w przypadku gromad galaktyk, gdzie przyjmujemy pewną jasność średnią charakteryzującą większość galaktyk, mnożąc tę wielkość przez liczbę członków gromady, uzyskamy wielkość masy świecącej dla całej gromady. Teraz gdy z innych pomiarów znamy całkowitą masę obiektu, możemy ją podzielić przez znaną jasność. Tak uzyskane ilorazy masy-do-światła dla większości obiektów we Wszechświecie będą większe od ilorazu słonecznego, sugerując istnienie odpowiadających ilości masy nieświecącej.

Wyliczono, że w Galaktyce $\Upsilon \sim 2$. Pamiętajmy, że wówczas uważano, że ciemna materia składa się głównie z wielkiej liczby małych gwiazd oraz różnej maści kosmicznego „gruzu", tj. planet, komet i asteroid, które świecą zbyt słabo, by je zaobserwować w teleskopach. Stosunek masy-do-światła rzędu 2 był spokojnie do pogodzenia z obrazem, gdzie różnorakie małe obiekty planetarne oraz mgławice gazowe dają wkład do całkowitej masy tego samego rzędu, co obserwowane gwiazdy.

W latach 30. XX wieku Fritz Zwicky, słynny astronom szwajcarski, poczynił obserwacje i spostrzeżenia, które były bardzo ważne dla ugruntowania poglądu, że w większych skalach mamy jednak do czynienia z problemem znacznego braku masy. Zwicky zaadaptował i rozwinął koncepcję lorda Kelvina w zastosowaniu do układu gromady galaktyk w Warkoczu Bereniki (zwanej również Gromadą Coma). Stosując twierdzenie o wiriale (tzw. twierdzenie Clausiusa) do gromady galaktyk jako zamkniętego i związanego grawitacyjnie układu, Zwicky wykazał, że około 1000 znanych wówczas galaktyk przynależących do Gromady Coma powinno charakteryzować się dyspersją prędkości 80–100 km/s. Jednak obserwowana wielkość wynosiła prawie 700 km/s. To implikowało, że dla Comy $\Upsilon \sim 500$! Dziś wiemy, że oszacowanie Zwicky'ego jest zawyżone prawie 8 razy z uwagi na ówczesne bardzo niedokładne wyznaczenie stałej Hubble'a. Podobne spostrzeżenia poczynił Sinclair Smith, badając gromadę galaktyk w Pannie i wyliczając $\Upsilon \sim 100$. Tak wielkie dysproporcje masy-do-światła nie dadzą się wytłumaczyć populacją słabych gwiazd i kosmicznego gruzu. Mamy więc do czynienia z silną przesłanką, że w skalach większych niż dyski gwiazdowe galaktyk istnieje duża ilość materii nieświecącej, występującej w nieznanej nam postaci. W połowie XX wieku panował jednak pogląd, że ta brakująca masa da się wytłumaczyć, np. poprzez istnienie masywnych obłoków chłodnego gazu (wodoru) w przestrzeniach między galaktykami.

Krzywe rotacji i rewolucja lat 70. XX wieku

Bardzo ważne sygnały, że brakująca niewidzialna materia raczej nie może występować w postaci obłoków zimnego wodoru, nadeszły w latach 60. i 70. zeszłego stulecia dzięki rozwojowi spektroskopii radiowej. Nowa technika pozwalała rejestrować linię emisyjną na fali 21 cm, którą emitowały obłoki neutralnego wodoru. Porównanie długości tej fali, emitowanej z różnych rejonów obserwowanej galaktyki, pozwoliło, dzięki efektowi Dopplera, na zmierzenie prędkości, z jaką galaktyki spiralne rotują. Co bardzo ważne, obserwacje radiowe obłoków wodoru można prowadzić w znacznie większych odległościach od środka galaktyki, niż ma to miejsce w przypadku emisji światła gwiazdowego. Pionierskie prace Very Rubin i Kenta Forda dotyczące wyznaczania prędkości rotacji pobliskich galaktyk spiralnych wykazały, że dla większości pobliskich galaktyk prędkość rotacji nie spada wraz z odległością od centrum. Był to wynik bardzo zaskakujący. Podobnie jak w przypadku gromad galaktyk, tak i w przypadku rotujących galaktyk można użyć obserwowanej prędkości do wyznaczenia grawitującej masy. Tutaj zakładamy, że gaz i gwiazdy w galaktyce znajdują się na (w przybliżeniu) kołowych orbitach keplerowskich. Prędkość na orbicie kołowej zależy tylko od ilości materii zawartej w kuli mniejszej od promienia danej orbity (patrz Δ^{11}_{17}). Uwzględniając całą materię świecącą w dysku galaktyki, uzyskamy wynik, że prędkość rotacji powinna szybko maleć w miarę oddalania się od środka galaktyki. Tymczasem, jak zmierzyli Rubin i Ford, wodór w galaktykach nawet na sporych odległościach od centrów orbitował wciąż z prędkością zbliżoną do prędkości gwiazd na orbitach wewnętrznych. Taką „płaską krzywą rotacji" można było wyjaśnić tylko tym, że w zewnętrznych partiach galaktyk znajdowało się dużo nieświecącej i nieemitującej promieniowania w zakresie radiowym materii. Co więcej, dokładne pomiary sugerowały, że ta dodatkowa materia musi być rozłożona w miarę symetrycznie, to jest w postaci halo/korony. W ten sposób doszliśmy do koncepcji halo ciemnej materii. Obecnie wiemy, że prawie wszystkie galaktyki we Wszechświecie zanurzone są w znacznie większych obłokach ciemnej materii. Gdyby nie było dodatkowej grawitacji od niewidzialnej masy halo, to galaktyki spiralne powinny się rozpadać w krótkim (jak na kosmiczne skale) czasie na rozpierzchające się we wszystkie strony gwiazdy.

Ciemność na wszystkich skalach

Na przełomie lat 70. i 80. w środowisku astronomów popularna była już wiedza o problemach brakującej masy w galaktykach i w gromadach galaktyk. Nie było

jednak powszechnie przyjęte łączenie tych problemów i przyjmowano, że w całym Wszechświecie mamy globalny problem brakującej masy. Dzięki kampaniom obserwacyjnym zakrojonym na coraz większą skalę, które zapoczątkował słynny przegląd nieba wykonany w Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, astronomowie uzyskiwali coraz obszerniejsze i sięgające coraz dalej w przeszłość katalogi galaktyk. Mapy te ukazały, że galaktyki nie są rozłożone losowo w przestrzeni, ale mają silną tendencję do grupowania się. Okazało się również, że galaktyki nie grupują się tylko w zwykłe skupiska (takie jak znane już od dawna gromady galaktyk), ale w znacznie większe struktury, takie jak kosmiczne włókna i ściany, pomiędzy którymi znajdują się wielkie przestrzenie pozbawione galaktyk, które nazwano pustkami. Taką strukturę, w jaką układają się galaktyki w największych skalach, nazywamy dziś Kosmiczną Siecią. By połączyć problemy brakującej masy we wszystkich skalach, potrzebny był ostatni element – rozwój metody, jaką stosowali najpierw Le Verrier, a potem lord Kelvin, Zwicky i Rubin. Mowa tu o metodzie pozwalającej przewidzieć, jak powinna wyglądać struktura galaktyki w największych skalach. Tutaj jednak analityczne rachunki matematyczne, stosowane z powodzeniem do tej pory, załamywały się, gdyż powstawanie galaktyk zachodzi w skalach, gdzie kosmiczne oddziaływania grawitacyjne stają się nieliniowe. Powoduje to, że precyzyjne rachunki stają się arcytrudne lub wręcz niemożliwe.

W sukurs przyszedł astronomom rozwój komputerów. Nowe narzędzie umożliwiło symulacje numeryczne powstawania galaktyk i formowania się z nich wielkoskalowej struktury Wszechświata. Szybko okazało się, że symulacje bez odpowiedniej ilości ciemnej materii nijak nie chciały wyprodukować układu galaktyk zgodnego z obserwacjami. Tylko te, w których założono obecność sporej ilości ciemnej materii, dawały wyniki zgodne z obserwowanym Wszechświatem. Naukowcy zrozumieli, że problem brakującej masy w galaktykach i gromadach galaktyk tak naprawdę dotyczy całego Wszechświata i wszystkich skal. Tak oto narodziła się współczesna hipoteza kosmicznej ciemnej materii, której grawitacja rządzi nie tylko prawami ruchu gwiazd i galaktyk, ale losami całego Kosmosu. O tym napiszemy w następnym numerze.

Zadania

Przygotował Łukasz BOŻYK

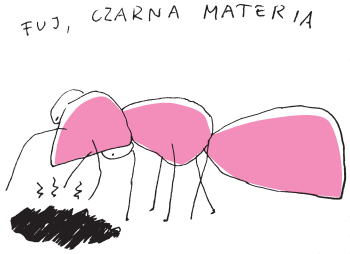
Triangulacją n-kąta (niekoniecznie wypukłego) nazywamy podział tego wielokąta na $n-2$ trójkąty przy użyciu pewnej liczby nieprzecinających się przekątnych (które mogą mieć wspólne końce).

M 1606. Dana jest triangulacja pewnego n-kąta. Wykazać, że jego wierzchołki można tak pokolorować trzema kolorami, aby każde dwa punkty połączone bokiem lub jedną z narysowanych przekątnych miały różny kolor.
Rozwiązanie na str. 10

M 1607. Dana jest triangulacja pewnego n-kąta o tej własności, że w każdym wierzchołku tego trójkąta schodzi się nieparzysta liczba trójkątów tej triangulacji. Wykazać, że n jest liczbą podzielną przez 3.
Rozwiązanie na str. 6

M 1608. Dana jest triangulacja pewnego n-kąta, przy czym $n \geqslant 4$. Na czarno malujemy wszystkie trójkąty tej triangulacji, których dokładnie jeden bok jest przekątną danego n-kąta, a na biało – wszystkie trójkąty tej triangulacji, których wszystkie trzy boki są przekątnymi danego n-kąta. Wykazać, że liczba czarnych trójkątów jest o 2 większa od liczby białych trójkątów.
Rozwiązanie na str. 10

Przygotował Andrzej MAJHOFER



F 979. Stosunek częstości kolejnych półtonów muzycznej skali wynosi $\sqrt[12]{2} \approx 1{,}059$. Przyjmijmy, że odbieramy dźwięk jako czysty, jeśli różni się od przypisanej mu częstości o nie więcej niż 1/16 tonu. Ile co najmniej musi trwać dźwięk o częstości $\nu_1 = 880\,\mathrm{Hz}$ śpiewany przez sopranistkę, a ile dźwięk odpowiadający $\nu_2 = 110\,\mathrm{Hz}$ śpiewany przez głos basowy?
Rozwiązanie na str. 17

F 980. Zaobserwowano cząstkę o czasie życia $\tau = 3 \cdot 10^{-25}\,\mathrm{s}$. Z jaką dokładnością można wyznaczyć jej masę spoczynkową? Stała Plancka $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{Js}$, prędkość światła $c = 3 \cdot 10^8\,\mathrm{m/s}$.
Rozwiązanie na str. 17