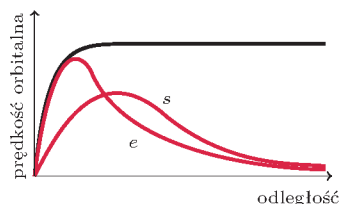


Czy czarne dziury to ciemna materia?

*Łukasz WYRZYKOWSKI**

Czym jest Ciemna Materia? Jest jedną z największych i najdłużej opierających się rozwiązaniu zagadek Wszechświata. Pytanie dotyka naukowców z szerokiego wachlarza dziedzin, od fizyków cząstek elementarnych, przez astrofizyków, po kosmologów badających najdalsze zakamarki kosmosu.

Pierwsze przesłanki o jej istnieniu pojawiły się już w latach 30. XX wieku, gdy zmierzono prędkości gwiazd naszej Galaktyki. Gdyby Galaktyka składała się tylko z gwiazd, które widzimy, to powinna rotować wolniej na dużych odległościach od środka. Jednakże obserwuje się mniej więcej stałą prędkość rotacji gwiazd w dysku Drogi Mlecznej. Podobnie sytuacja wygląda w innych galaktykach. Oznacza to, że w galaktykach tych istnieje dodatkowa, niewidoczna masa, tworząca rozległe tzw. halo, w którym zanurzony jest dysk i centrum galaktyki. Obecność masywnego halo wokół galaktyk obserwuje się też w zjawisku silnego soczewkowania grawitacyjnego, gdy światło odległej galaktyki dociera do nas po liniach zakrzywionych przez obecność masywnej galaktyki po drodze. Halo galaktyk są bardzo rozległe, sięgając kilka razy dalej niż rozmiar dysku galaktyki, a często łącząc się z halo sąsiednich galaktyk, tworząc swoistą sieć Ciemnej Materii ciągnącą się przez cały Wszechświat.



Zależność jasności galaktyk od obecności ciemnej materii. Linie kolorowe wskazują, jak zmalałaby obecnie obserwowana jasność (czarna linia) bez ciemnej materii w przypadku galaktyki eliptycznej (e), a jak galaktyki spiralnej (s).

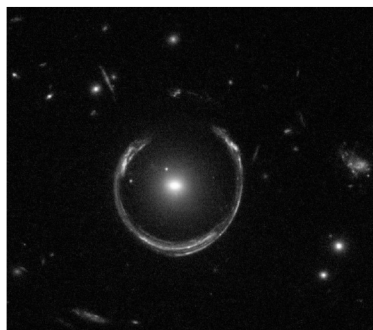
Jednak czym właściwie jest ta Ciemna Materia – nie wiemy! Pomysłów jest kilka: fizycy szukają w akceleratorach śladów dodatkowych masywnych cząstek elementarnych. Jak na razie bez powodzenia. Astronomowie z kolei poszukiwali obiektów gwiazdopodobnych o masach od masy Jowisza do dziesiątek Słońc, zbudowanych z Ciemnej Materii. Aby wykryć takie nieświejące obiekty, zastosowali technikę mikrosoczewkowania grawitacyjnego, zasugerowaną w 1986 roku przez Bohdana Paczyńskiego, polskiego astronoma, wychowanka Uniwersytetu Warszawskiego, pracującego w Princeton w USA. Metoda ta jest podobna do silnego soczewkowania, używanego do wykrycia halo ciemnej materii wokół galaktyk, z tą różnicą, że tu źródłami światła są gwiazdy, a soczewki poruszają się na tyle szybko, że samo zjawisko soczewkowania jest tymczasowe i trwa zwykle od kilku dni do kilku lat.

Polski projekt *Optical Gravitational Lensing Experiment* (OGLE), używający warszawskiego teleskopu zlokalizowanego w Chile, przez ponad 25 lat prowadzi nieprzerwanie obserwacje najbardziej gęstych części nieba, gdzie zjawiska mikrosoczewkowania występują najczęściej. Analiza danych z lat 1996–2009 wykluczyła jednak obecność w halo Drogi Mlecznej obiektów zbudowanych z ciemnej materii o masach mniejszych niż masa kilku Słońc.

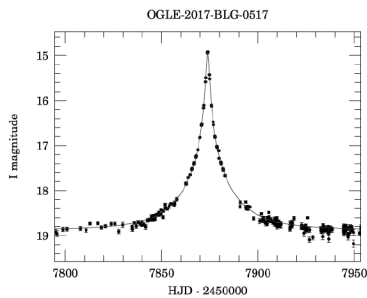
Pozostało jeszcze do sprawdzenia, czy przynajmniej część ciemnej materii nie zawiera się w dużych czarnych dziurach, o masach pomiędzy 10 a 100 Słońc. Do tej pory znamy jedynie kilkadziesiąt takich czarnych dziur w naszej Galaktyce. Zostały one wykryte dzięki ich towarzyszom – gwiazdom, których materia opada na czarną dziurę, wyrwana przez silne pole grawitacyjne czarnej dziury, tworząca świecący w falach rentgenowskich dysk, zanim kompletnie zniknie pod horyzontem zdarzeń, spod którego nawet światło nie może się wydostać. Metoda mikrosoczewkowania grawitacyjnego pozwala wykryć obiekty słabe lub kompletnie ciemne, takie jak planety, brązowe karły czy czarne dziury, gdy przechodzą one na tle odległej gwiazdy. Zakrzywienie czasoprzestrzeni przez masę ciemnej soczewki powoduje, że do obserwatora docierają promienie z gwiazdy źródła, które w normalnej sytuacji do nas by nie dotarły. Gdy obserwator, soczewka i źródło tworzą idealną linię, wzmocniony obraz odległej gwiazdy pojawia się w postaci pierścienia, którego grubość zależy od rozmiaru tarczy gwiazdy, natomiast promień zależy od masy soczewki (M_L) oraz kombinacji odległości źródła (D_S) i soczewki (D_L):

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM_L}{c^2} \frac{D_S - D_L}{D_S D_L}}.$$

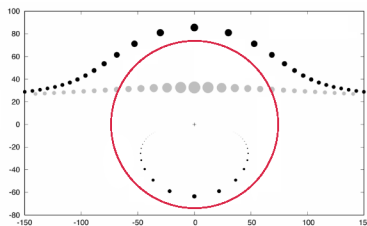
Symbol θ_E oznacza kątowy rozmiar na niebie powstałego pierścienia, zwanego pierścieniem Einsteina, mimo że słynny astrofizyk zupełnie nie wierzył



Zdjęcie tzw. pierścienia Einsteina wykonane przez Teleskop Hubble'a. Pole grawitacyjne widocznej w centrum galaktyki LRG 3-757 zakrzywia czasoprzestrzeń w taki sposób, że światło innej, położonej znacznie dalej, galaktyki widzimy w postaci pierścienia.



Zjawisko mikrosoczwkowania grawitacyjnego wykryte przez projekt OGLE. Czarne punkty to pomiary sumaryczne jasności soczewkowanych obrazów, ciągła linia to model Paczyńskiego. Ze strony ogle.astrouw.edu.pl/ogle4/ews/2017/blg-0517.html



Pozycja obrazów (ciemne kółka) oraz środka światła (szare kółka) dla zmieniającej się względnej pozycji źródła względem soczewki. Pierścień Einsteina pokazany jest jako kolorowy okrąg. Rysunek wykonała Zofia Kaczmarek, studentka astronomii na UW.



w możliwość wykrycia takiego zjawiska. Sceptycyzm Einsteina wynikał z tego, że rozmiary pierścienia w naszej Galaktyce to tysięczna część sekundy łuku (milisekunda), czyli kilka milionowych części stopnia. Po prawdzie, do tej pory takiego pierścienia nie udało się jeszcze bezpośrednio zaobserwować w przypadku gwiazd! Jednakże mimo braku wystarczającej rozdzielczości zjawisko soczewkowania światła może być zaobserwowane na dwa sposoby. Fotometryczne soczewkowanie polega na rejestracji sumarycznego pojaśnienia odległej gwiazdy w czasie, gdy soczewka przesuwa się na jej tle. Powstające obrazy uzyskują coraz większą sumaryczną jasność, gdy soczewka zbliża się w swoim ruchu do linii łączącej źródło i obserwatora. Powstała krzywa zmian blasku gwiazdy w czasie nosi nazwę krzywej Paczyńskiego, gdyż to właśnie Bohdan Paczyński jako pierwszy obliczył, jak będzie wyglądało soczewkowanie przez poruszającą się ciemną soczewkę. Krzywa Paczyńskiego opisana jest następującym wzorem:

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}},$$

gdzie u jest odległością na niebie pomiędzy pozycją źródła a soczewką, podaną w jednostkach pierścienia Einsteina (θ_E). Przykładowe zjawisko zaobserwowane przez projekt OGLE, wraz z dopasowanym modelem Paczyńskiego, jest pokazane obok.

Drugim efektem jest soczewkowanie astrometryczne. Oprócz sumarycznego pojaśnienia źródła obserwuje się też jego przesunięcie na niebie, a dokładniej, przesunięcie środka obrazów.

Rozmiar przesunięcia środka światła jest funkcją $\vec{u}$, czyli parametru odległości kątowej źródła od soczewki (podobnie jak w odchyłce fotometrycznej), a jej kierunek zależy teraz od kierunku wektora tej odległości. Co jednak najważniejsze, rozmiar odchyłki pozycji centrum światła obrazów jest proporcjonalny do rozmiaru pierścienia Einsteina, θ_E :

$$\delta(\vec{u}) = \frac{\vec{u}}{u^2 + 2} \theta_E.$$

Wynika z tego, że im cięższa soczewka, tym łatwiej dostrzec zmianę pozycji źródła. Niestety, nawet dla masywnych galaktycznych czarnych dziur, o masie 6 i więcej mas Słońca, θ_E jest rzędu kilku milisekund łuku.

Pomiar takiego odchylenia środka światła został wykonany do tej pory jedynie raz, za pomocą Teleskopu Kosmicznego Hubble'a, który obserwował przejście białego karła na tle odległej gwiazdy (adsabs.harvard.edu/abs/2017Sci...356.1046S, www.scientificamerican.com/article/for-first-time-einsteins-relativity-used-to-weigh-a-star/). Obserwowany karzeł znajduje się bardzo blisko Słońca, w odległości jedynie 5,5 parseka. Jak pamiętamy, rozmiar pierścienia Einsteina zależy nie tylko od masy, ale też od odległości do soczewki i źródła. W tym przypadku θ_E wynosiła aż około 30 milisekund, a zaobserwowana odchyłka wyniosła 2 milisekundy łuku.

Gdyby udało nam się wyznaczyć rozmiar pierścienia Einsteina we wszystkich tych tysiącach zjawisk mikrosoczwkowania, które występują na niebie i są wykrywane przez polski projekt OGLE i inne obserwatoria, moglibyśmy pomierzyć masy i odległości soczewek, a dzięki temu odróżnić soczewkujące gwiazdy (najczęstsze) od soczewkujących gwiazd neutronowych i czarnych dziur. Masa soczewki dana jest wzorem:

$$M = \frac{\theta_E}{\kappa \pi_E} = \frac{\theta_E^2}{\kappa \left(\frac{1}{D_L} - \frac{1}{D_S} \right)},$$

gdzie κ jest stałą równą 8,144 milisekund/ $M_\odot$, natomiast π_E jest tzw. paralaksą mikrosoczwkową, czyli różnicą w odległości źródła (D_S) i soczewki (D_L) w jednostkach pierścienia Einsteina. Dla przykładu, dla najbardziej typowego źródła w centrum Galaktyki $D_S = 8$ kpc, soczewce znajdującej się w połowie odległości ($D_L = 4$ kpc), masę „czarnodziurową”, około $6M_\odot$, uzyskujemy, gdy pierścień Einsteina wynosi około 2,5 milisekund łuku.



O ile wykrycie zjawisk soczewkowania jest obecnie wykonywane rutynowo przede wszystkim przez polski projekt OGLE (ogle.astrouw.edu.pl), to już do zmierzenia odchyłki pozycji źródła na niebie musimy użyć danych kosmicznej misji Gaia (gaia.esac.esa.int/).

Gaia jest europejską misją kosmiczną, działającą od 2014 roku, której głównym zadaniem jest pomiar pozycji gwiazd i ich zmian w czasie. Projekt Gaia 25 kwietnia 2018 roku opublikował dane z półmetka misji, czyli pierwszą dokładną mapę odległości dla 1,7 miliarda gwiazd Drogi Mlecznej, otrzymanych na podstawie pomiarów zmian pozycji gwiazd wywołanych zmianą kąta patrzenia na gwiazdę (zjawisko paralaksy). Dane te po raz pierwszy pozwolą zmapować ramiona spiralne i centrum Galaktyki, wykryć pozostałości po rozerwanych galaktykach jako strugi gwiazd, utworzyć mapy rozkładu pyłu w Galaktyce itd. Jednakże do zmierzenia efektu mikrosoczewkowania potrzebne będą dane końcowe misji, w których będzie można zmierzyć subtelne dodatkowe przemieszczenie źródeł wywołane mikrosoczewkowaniem. Astrometria z Gai w połączeniu z fotometrią z obserwacji naziemnych z OGLE oraz samej Gai, pozwoli na rozpoznanie soczewek wywołanych przez czarne dziury i na wyznaczenie ich parametrów, takich jak masa, prędkość czy odległość od Słońca.

Wykrycie dziesiątek czarnych dziur pozwoli po raz pierwszy na porównanie ich cech z oczekiwaniami teoretycznymi. Może okazać się, że znajdziemy dużą liczbę bardzo masywnych czarnych dziur, o masach 30 czy 60 mas Słońca, których obfitości nie uda się wytłumaczyć zwykłymi procesami gwiazdowymi. Mogą to być czarne dziury, powstałe w bardzo młodym Wszechświecie jeszcze przed powstaniem pierwszych gwiazd, kiedy to zgęstki ciemnej materii były tak duże, że zapadały się i tworzyły tzw. pierwotne czarne dziury. Możliwe, że to właśnie takie czarne dziury zaobserwowano w pierwszych detekcjach fal grawitacyjnych w 2016 roku. Potrzebujemy jednak dużo większej próbki czarnych dziur, a najlepiej na tyle pobliskich w naszej Galaktyce, aby móc odróżnić „zwykłe” gwiazdowe czarne dziury od tych pierwotnych, zbudowanych z ciemnej materii. Jest szansa, że właśnie mikrosoczewkowanie grawitacyjne i misja Gaia to umożliwią już za kilka lat.

Badania nad ciemną materią za pomocą misji Gaia wspiera grant Harmonia Narodowego Centrum Nauki nr 2015/18/M/ST9/00544.



Zadania

Przygotował Hugo STEINHAUS*

M 1582. Udowodnij, że liczba $3^{105} + 4^{105}$ jest podzielna przez 13, 49, 181, 379, a nie jest podzielna przez 5 ani 11.

Rozwiązanie na str. 8

M 1583. Podziel sześcian na sześć przystających czworościanów.

Rozwiązanie na str. 12

M 1584. Wykaż, że $\sqrt{1 + \sqrt{2 + \sqrt{3 + \sqrt{\dots + \sqrt{n}}}}} < 2$ dla każdego naturalnego n .

Rozwiązanie na str. 11

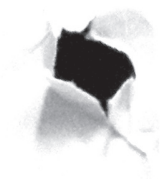
* Polecamy znakomite 100 zadań i Jeszcze 105 zadań Hugona Steinhausa.

Przygotował Andrzej MAJHOFER

F 963. Oszacuj, jaki byłby najkrótszy czas trwania dnia, który moglibyśmy przeżyć stojąc na Ziemi?

Promień Ziemi $R \approx 6400$ km, przyspieszenie Ziemskie $g \approx 10$ m/s².

Rozwiązanie na str. 16



F 964. Oszacuj, jaka jest najmniejsza odległość r od Ziemi, w jakiej Księżyc mógłby obiegać Ziemię po orbicie kołowej bez utraty skał ze swojej powierzchni (tzn. pyłu i kamieni pokrywających jego powierzchnię i związanych z resztą Księżyca tylko siłami grawitacji)? Przyjmij, że Księżyc, tak jak to jest obecnie, jest zwrócony do Ziemi zawsze tą samą stroną, tzn. prędkości kątowe obiegu i obrotu własnego Księżyca są równe. Masa Księżyca M_K jest w przybliżeniu 81 razy mniejsza od masy Ziemi M_Z . Promień Księżyca $R_K \approx 1740$ km.

Rozwiązanie na str. 21