

## Prosto z nieba: Czarna dziura rozmiaru M

Wypada w tym miejscu dodać, że w nieeuklidesowych geometriach nie ma jednokładności: przykładowo, trójkąty równoboczne nie są podobne, ponieważ ich prawdziwy, niepłaski kształt zależy od miejsca, w którym się znajdują, czyli od lokalnej krzywizny.

Niedawna obserwacja fal grawitacyjnych GW150914 pochodzących z zapadnięcia się układu podwójnego czarnych dziur o masach około  $30 M_{\odot}$  dowodzi natomiast, że mogą istnieć miejsca, w których powstają gwiazdowe czarne dziury dużo masywniejsze niż te z naszej Galaktyki.



### Rozwiązanie zadania F 932.

Cała energia kinetyczna ruchu obu kostek może być zamieniona na ich energie wewnętrzne, gdy zderzenie jest centralne, a suma pędów kostek jest równa zeru. Przy jednakowych masach oznacza to, że początkowe prędkości będą miały te same wartości i były przeciwnie skierowane. Suma energii kinetycznych musi wówczas wystarczyć na ogrzanie lodu do  $0^{\circ}\text{C}$ , stopnienie lodu, podgrzanie wody do  $100^{\circ}\text{C}$  i odparowanie wody:

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{mv^2}{2} > > 2m(|T|c_L + L_L + 100\text{K} \cdot c_W + L_w).$$

Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymujemy  $v > 2471\text{ m/s}$ .

Czarne dziury są, być może, najdziwniejszymi obiektami badań współczesnej astrofizyki. W geometrycznym opisie grawitacji Alberta Einsteina każda masa zakrzywia (ugina) czasoprzestrzeń tym mocniej, im jest większa i bardziej „skoncentrowana” w jednym miejscu. Zwarte obiekty, to znaczy takie, dla których stosunek masa-promień jest duży, są źródłami lokalnie większego zakrzywienia. Zwartość, definiowana jako  $\eta = 2GM/Rc^2$  jest maksymalna dla czarnej dziury, dla której wynosi 1 niezależnie od jej rozmiaru. Zależność ta definiuje także promień horyzontu (promień Schwarzschilda) – każdy bardziej zwarty obiekt o tej samej masie znajduje się już wewnątrz horyzontu czarnej dziury, czyli jest z definicji nieobserwowalny. Czarna dziura jest zatem „niematerialna” dla obserwatora na zewnątrz horyzontu: jest niezależna od własności materii znajdującej się wewnątrz horyzontu. Do jej opisu wystarczy jedynie znać parametry geometryczne, z których dedukuje się odpowiadającą jej masę  $M$ . Promień horyzontu czarnej dziury o masie Słońca wynosi jedynie 2,95 km.

Najbliższe czarnym dziurom relatywistyczne kuzynki – gwiazdy neutronowe – mają, w zależności od przyjętego promienia wynoszącego około 10–15 km,  $\eta$  około 0,3–0,5. Dla porównania,  $\eta$  Słońca to  $4,25 \cdot 10^{-6}$ , a Ziemi  $1,4 \cdot 10^{-9}$ . Mimo że wartości te są małe, efekty wykrzywionej czasoprzestrzeni obserwuje się jako ugięcia torów światła odległych gwiazd przechodzących w pobliżu Słońca bądź jako konieczność wprowadzania poprawek do newtonowskich rozwiązań orbit satelitów wykorzystywanych w GPS.

Znane astronomom czarne dziury można podzielić na dwie kategorie: obiekty „gwiazdowe” o masach kilku-kilkunastu  $M_{\odot}$ , wykrywane podczas obserwacji promieniowania rentgenowskiego w naszej Galaktyce, oraz supermasywne czarne dziury znajdujące się w centrach galaktyk, ważące miliony lub nawet miliardy  $M_{\odot}$  („nasza” supermasywna czarna dziura waży „zaledwie”  $4 \cdot 10^6 M_{\odot}$ , zmieściłaby się zatem z powodzeniem wewnątrz orbity Merkurego). Ponadto przewiduje się istnienie dziur o masach pośrednich (*intermediate-mass black hole, IMBH*) od 100 do 10000  $M_{\odot}$ , jednak do tej pory nie przedstawiono niezbitych dowodów obserwacyjnych potwierdzających tę hipotezę.

Ciemne ciała, takie jak czarne dziury, wykrywa się poprzez ich oddziaływanie z otoczną materią np. w czasie akrecji gazu w układzie podwójnym, lub obserwując ruch gwiazd w ich otoczeniu. Niedawne badania gromady kulistej 47 Tucanae dostarczają pośrednich dowodów na istnienie czarnej dziury o masie około 2200  $M_{\odot}$ . 47 Tucanae jest gromadą gwiazd położoną w odległości 13000 lat świetlnych od Ziemi; jest prawie tak stara jak Wszechświat (12 miliardów lat) i składa się z tysięcy gwiazd stłoczonych w kuli o promieniu 120 lat świetlnych. Oprócz gwiazd zawiera także ponad dwadzieścia pulsarów radiowych.

Poszukiwania czarnych dziur w gromadzie 47 Tucanae w sposób opisany powyżej zakończyły się niepowodzeniem – gromada składa się ze starych gwiazd i nie zawiera wiele swobodnego gazu, który mógłby rozgrzewać się i świecić w pobliżu czarnej dziury, centrum gromady jest natomiast zbyt gęsto wypełnione gwiazdami, by można było wykryć podejrzany ruch którejs z nich. Przejawy istnienia średniomasywnej czarnej dziury znaleziono podczas analizy ruchu gwiazd całej gromady, porównując go z symulacjami numerycznymi: masywniejsze gwiazdy znajdują się przeważnie bliżej centrum gromady, mają więc więcej szans na oddziaływanie z czarną dziurą. Bliskie spotkanie tego typu może czasami skutkować efektem „grawitacyjnej procy”, to znaczy wyrzuceniem niektórych gwiazd na znaczne odległości z nieprzeciętnie dużymi prędkościami, co widać w rozkładzie prędkości składników gromady. W podobny sposób zachowują się też wspomniane wcześniej radiopulsary. Odległość od centrum gromady niektórych z nich jest większa niż w modelach, w których nie uwzględniono czarnej dziury.

Dlaczego czarne dziury o masach pośrednich są ciekawe? Najprawdopodobniej są przysłowiowym „brakującym ogniwiem” w ewolucji od pierwotnych czarnodziurowych zarodki o masie zbliżonej do gwiazdowej, które powstały we wczesnym Wszechświecie, do czarnych dziur wagi ciężkiej spoczywających obecnie w centrach galaktyk.

Michał BEJGER