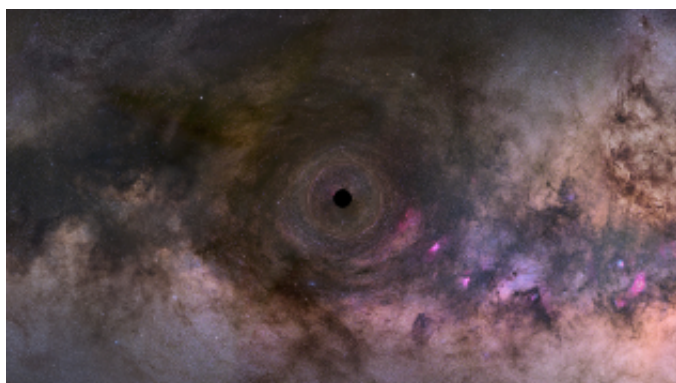


Swobodne czarne dziury w Drodze Mlecznej

2022-06-10

Informacja za serwisem Obserwatorium Astronomicznego UW



Obraz tła Drogi Mlecznej zakłócony przez grawitację wędrującej czarnej dziury. Czarna dziura na skutek swej ogromnej grawitacji zakrzywia wokół siebie przestrzeń co powoduje zniekształcenia obrazów znajdujących się za nią gwiazd tła. (Credit: NASA, STScI, image: FECYT, IAC).

W Drodze Mlecznej mogą znajdować się miliony samotnych czarnych dziur. Dwa międzynarodowe zespoły naukowców, w skład których wchodzi polscy astronomowie z prowadzonego w Obserwatorium Astronomicznym UW projektu OGLE, ogłosiły odkrycie swobodnej czarnej dziury. Jest to pierwsza zakończona powodzeniem detekcja tych egzotycznych obiektów – wynik kilkuletnich badań, wymagających niezwykle precyzyjnych pomiarów.

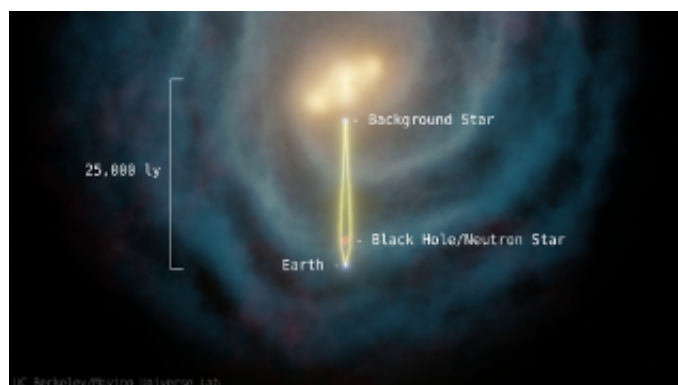
Istnienie czarnych dziur – obiektów o sile grawitacji tak wielkiej, iż żaden sygnał, nawet światło, nie może się z nich wydostać zostało teoretycznie przewidziane jeszcze w XVIII wieku przez m.in. Pierre Laplace’a, a w drugiej dekadzie XX wieku, przez Karla Schwarzschilda, jako wynik ogólnej teorii względności Alberta Einsteina. Przez długie lata obiekty tego typu pozostawały tworem czysto teoretycznymi, gdyż brak emitowanych sygnałów uniemożliwiał ich detekcję. W miarę rozwoju teorii astrofizycznych okazało się, że czarne dziury pełnią ogromnie ważną rolę we Wszechświecie, zarówno we wczesnych etapach jego życia, jak i obecnie. W trakcie ewolucji Wszechświata powinny powstawać czarne dziury o masach od ułamków do miliardów mas Słońca.

W szczególnych sytuacjach obecność czarnych dziur może być jednak zauważona. Gdy obiekt ten otoczony jest przez materię, która na skutek ogromnej grawitacji czarnej dziury krąży wokół niej, rozgrzewa się ona do bardzo wysokich temperatur i stopniowo wpada w czeluści czarnej dziury. Promieniowanie przez nią emitowane może być zarejestrowane przez współczesne przyrządy astronomiczne. W ten sposób udało się odkryć pierwszą czarną dziurę znajdującą się w układzie podwójnym – Cygnus X-1. Znamy dzisiaj kilkadziesiąt takich układów podwójnych zawierających czarne dziury o masach kilku mas Słońca.

W ostatnich latach, dzięki zastosowaniu nowej metody badań Wszechświata – falom grawitacyjnym – udało się odkryć kolejne przypadki istnienia czarnych dziur. Czarne dziury krążące wokół siebie w układzie podwójnym mogą połączyć się, czego efektem jest emisja silnych fal grawitacyjnych rejestrowanych na Ziemi przez nowoczesną aparaturę LIGO/Virgo. Odkryto do tej pory około stu przypadków łączenia się czarnych dziur. Są to obiekty o masach kilkudziesięciu mas Słońca.

We Wszechświecie mogą też istnieć niesłychanie masywne czarne dziury – o masach milionów do miliardów mas Słońca. Przypuszcza się, że tego typu obiekty znajdują się w centrach galaktyk, kwazarów. Za potwierdzenie, że w centrum naszej Galaktyki znajduje się taka olbrzymia czarna dziura, przyznano Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki w 2020 roku. W ostatnich latach dzięki niezwykle precyzyjnym pomiarom radiowym wykonanym przez projekt EHT udało się zobrazować bezpośrednie otoczenie masywnych czarnych dziur w centrum Galaktyki i galaktyki M87. Wiemy więc już dziś, że czarne dziury istotnie występują we Wszechświecie.

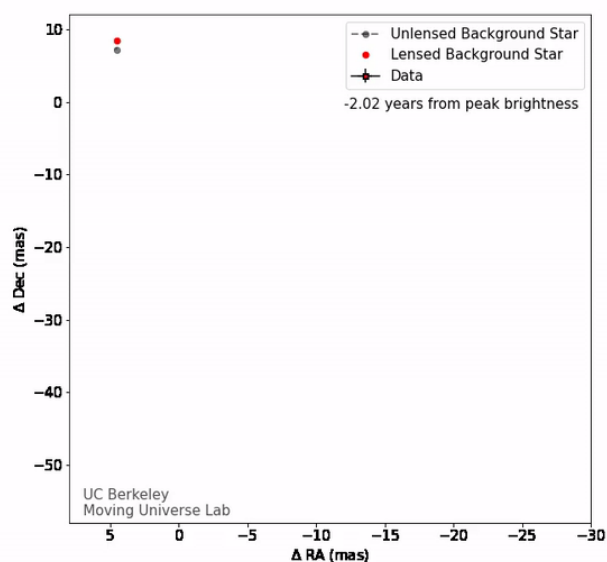
Teoria ewolucji gwiazd przewiduje, że w trakcie końcowych etapów życia bardzo masywnych gwiazd – np. w wybuchach gwiazd supernowych – powinny tworzyć się czarne dziury o masach od kilku do kilkunastu mas Słońca. Tego typu obiekty krążą następnie samotnie w Drodze Mlecznej ukrywając się przed zaobserwowaniem, gdyż nie emitują sygnałów. Powinno ich być w Galaktyce bardzo dużo. Szacuje się ich liczbę nawet na kilkanaście milionów. Jak więc odkryć taką samotną nieświecącą czarną dziurę? Klasyczne metody nie dają takiej możliwości.



Mikrosoczewkowanie w Drodze Mlecznej. Gdy dwa obiekty krążące wokół centrum Galaktyki, gwiazda tła i np. czarna dziura ustawią się dla obserwatora z Ziemi idealnie wzdłuż jednej linii, czarna dziura soczewkuje światło gwiazdy tła wywołując jej czasowe pojaśnienie. (Credit UC Berkeley/Moving Universe Lab/Sean Terry).

Nieświecące ciała mogą być jednak wykryte za pomocą techniki mikrosoczewkowania grawitacyjnego, które jest efektem wynikającym z ogólnej teorii względności. Bieg promieni światła w pobliżu masywnych obiektów może ulec zakrzywieniu. Ich grawitacja działa jak gigantyczna soczewka, która skupia i wzmacnia światło od odległych gwiazd. Jeżeli między obserwatorem na Ziemi a odległą gwiazdą-źródłem znajdzie się obiekt o pewnej masie – jego grawitacja może ugiąć i skupić światło źródła. Obserwator na Ziemi zobaczy wtedy charakterystyczne, zmieniające się w czasie pojaśnienie odległego źródła – tzw. zjawisko mikrosoczewkowania.

Mikrosoczewkowanie grawitacyjne nie zależy od jasności soczewki, a tylko od jej masy, jest to więc doskonały sposób na wykrywanie obiektów, które w ogóle nie emitują światła, np. samotnych czarnych dziur. Im obiekt-soczewka jest bardziej masywny, tym zjawiska mikrosoczewkowania są dłuższe – w przypadku soczewek o masie kilku mas Słońca mogą trwać nawet kilka lat.



Czarna dziura zakrzywiając światło gwiazdy tła zmienia nieznacznie jej położenie na niebie. Czerwona linia pokazuje ruch gwiazdy tła gdy jest ona soczewkowana przez czarną dziurę, podczas gdy linia szara pokazuje ruch gwiazdy tła gdyby nie była soczewkowana. Różnica położenia nazywana jest przesunięciem astrometrycznym. Zaznaczone są również obserwacje z Teleskopu Hubble'a. (Credit: UC Berkeley/Moving Universe Lab/Natasha Abrams).

W przypadku masywnych soczewek możemy zaobserwować za pomocą niesłychanie precyzyjnych instrumentów astrometrycznych dodatkowy efekt – tzw. mikrosoczewkowanie astrometryczne. Położenie źródła światła na sferze niebieskiej w trakcie zjawiska mikrosoczewkowania ulega bardzo niewielkiej, charakterystycznej zmianie. Jednoczesne obserwacje mikrosoczewkowania – fotometryczne i astrometryczne – umożliwiają wyznaczenie masy obiektu soczewkującego i w ten sposób określenie jego typu.

Zjawisko mikrosoczewkowania grawitacyjnego OGLE-2011-BLG-0462 zostało odkryte 2 czerwca 2011 roku przez astronomów z prowadzonego w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Warszawskiego wielkoskalowego przeglądu nieba OGLE, kierowanego przez prof. Andrzeja Udalskiego. Równocześnie obiekt został także zarejestrowany przez nowozelandzko-japoński projekt MOA.

W momencie odkrycia pojaśnienia, niewątpliwie wywołanego mikrosoczewkowaniem, oczywiście nie sądziliśmy, że obiekt ten okaże się tak interesującym i przełomowym dla astrofizyki. A stał się kolejną perełką wśród 22 000 odkrytych przez nas zjawisk mikrosoczewkowania – wspomina prof. Andrzej Udalski.

Zjawisko mikrosoczewkowania OGLE-2011-BLG-0462 było regularnie obserwowane przez zespół projektu OGLE przez dziewięć kolejnych lat. Zebrano 15 545 niezwykle precyzyjnych pomiarów jasności obiektu, które stały się podstawą modelowania fotometrycznego efektu zjawiska.

W drugiej połowie 2011 roku, gdy wiadomo już było, że skala zjawiska jest długa, więc obiekt soczewkujący może być masywny, zespół astronomów pod kierunkiem prof. Kailasha Sahu (Space Telescope Science Institute) rozpoczął za pomocą teleskopu kosmicznego Hubble'a (Hubble Space Telescope, w skrócie HST) niezwykle precyzyjne pomiary astrometryczne zjawiska. W następnych latach skompletowano kilkanaście takich obserwacji, uzupełnionych w 2021 roku przez dodatkowe dane zebrane przez niezależny zespół kierowany przez doktorantkę Casey Lam i prof. Jessicę Lu (Uniwersytet

Kalifornijski w Berkeley). Analiza zebranych danych fotometrycznych i astrometrycznych prowadzona była niezależnie przez oba te zespoły.

Wyniki modelowania jednoznacznie wskazują, że zjawisko OGLE-2011-BLG-0462 wywołane zostało przez masywny obiekt o masie kilku mas Słońca. Ponieważ światło zwyczajnej gwiazdy o takiej masie byłoby z łatwością zarejestrowane, soczewka musi być obiektem nieświecącym – swobodną czarną dziurą o masie gwiazdowej – wyjaśnia dr Przemysław Mróz – członek zespołu OGLE uczestniczący w modelowaniu zjawiska.

Masa odkrytej czarnej dziury to około 7 mas Słońca wg analizy zespołu Kailasha Sahu lub 4,2 masy Słońca wg zespołu Casey Lam. Różnice wynikają z nieco innego sposobu analizy danych astrometrycznych HST. Sygnał mikrosoczewkowy w zjawisku astrometrycznym jest słabszy i bardziej narażony na błędy systematyczne. Zespół Casey Lam rozważa również możliwość nieco mniejszej masy soczewki, plasującej obiekt w grupie gwiazd neutronowych. Jest to jednak rozwiązanie bardzo mało prawdopodobne, do zweryfikowania obserwacyjnego w kolejnych latach.

Odkrycie pierwszej swobodnej czarnej dziury w Drodze Mlecznej stanowi ogromny przełom w badaniu tych unikalnych obiektów. Potwierdza przypuszczenia o dużej liczbie tego typu obiektów, będących końcowym produktem ewolucji gwiazd, w Galaktyce. Otwiera też nowy kanał detekcji czarnych dziur za pomocą metody mikrosoczewkowania grawitacyjnego. Przyszłe obserwacje, m. in. dzięki danym astrometrycznym zebranych przez europejską misję kosmiczną Gaia, powinny umożliwić detekcję większej liczby samotnych czarnych dziur, co pozwoli dokładniej oszacować populację czarnych dziur w Galaktyce oraz wyznaczyć rozkład ich mas.

Detekcja czarnej dziury w zjawisku OGLE-2011-BLG-0462 kończy etap podstawowych pionierskich zadań astrofizycznych stawianych mikrosoczewkowaniu grawitacyjnemu. *Udało się dotychczas oszacować tą metodą zawartość tzw. ciemnej materii w Galaktyce, odkryć pozasłoneczne układy planetarne oraz planety swobodne. Odkrycie swobodnej czarnej dziury to długo oczekiwane zakończenie kolejnego podstawowego zakresu badań mikrosoczewkowych – mikrosoczewkowania przez obiekty bardzo masywne* – wyjaśnia prof. Andrzej Udalski.

Wyniki badań zostały opisane w pracach:

- *An isolated stellar-mass black hole detected through astrometric microlensing*, **Kailash C. Sahu, Jay Anderson, Stefano Casertano, Howard E. Bond, Andrzej Udalski, Martin Dominik, Annalisa Calamida, Andrea Bellini, Thomas M. Brown, Marina Rejkuba, Varun Bajaj, Noe Kains, Henry C. Ferguson, Chris L. Fryer, Philip Yock, Przemek Mróz, Szymon Kozłowski, Paweł Pietrukowicz, Radek Poleski, Jan Skowron, Igor Soszyński, Michał K. Szymański, Krzysztof Ulaczyk, Łukasz Wyrzykowski**, et al., 2022, *The Astrophysical Journal*, 931, YYY ([arXiv:2201.13296](https://arxiv.org/abs/2201.13296))
- *An isolated mass gap black hole or neutron star detected with astrometric microlensing*, **Casey Y. Lam, Jessica R. Lu, Andrzej Udalski, Ian Bond, David P. Bennett, Jan Skowron, Przemek Mróz, Radek Poleski, Takahiro Sumi, Michał K. Szymański, Szymon Kozłowski, Paweł Pietrukowicz, Igor Soszyński, Krzysztof Ulaczyk, Łukasz Wyrzykowski**, et al., 2022, *The Astrophysical Journal Letters*, 931, LNN ([arXiv:2202.01903](https://arxiv.org/abs/2202.01903))

Materiały multimedialne:

[OA220610b_mmd01.png](#) (Black_hole_lensing)

Obraz tła Drogi Mlecznej zakłócony przez grawitację wędrującej czarnej dziury. Czarna dziura na skutek swej ogromnej grawitacji zakrzywia wokół siebie przestrzeń co powoduje zniekształcenia obrazów znajdujących się za nią gwiazd tła. (Credit: NASA, STScI, image: FECYT, IAC).

[OA220610b_mmd02.gif](#) (ogle_images)

Gdy czarna dziura przechodzi dokładnie przed gwiazdą tła pole grawitacyjne czarnej dziury ugina światło tej gwiazdy i powoduje jej tymczasowe pojaśnienie. Obszar nieba wokół zjawiska

OGLE-2011-BLG-0462 w trakcie trwania zjawiska mikrosoczewkowania (górny panel) i obserwowane zmiany jasności (dolny panel). (Credit: UC Berkeley/Moving Universe Lab/Casey Lam, Images from OGLE collaboration).

[OA220610b_mmd03.gif](#) (astrometry)

Czarna dziura zakrzywiając światło gwiazdy tła zmienia nieznacznie jej położenie na niebie. Czerwona linia pokazuje ruch gwiazdy tła gdy jest ona soczewkowana przez czarną dziurę, podczas gdy linia szara pokazuje ruch gwiazdy tła gdyby nie była soczewkowana. Różnica położenia nazywana jest przesunięciem astrometrycznym. Zaznaczone są również obserwacje z Teleskopu Hubble'a. (Credit: UC Berkeley/Moving Universe Lab/Natasha Abrams).

[OA220610b_mmd04.png](#) (BH_microlensing)

Mikrosoczewkowanie w Drodze Mlecznej. Gdy dwa obiekty krążące wokół centrum Galaktyki, gwiazda tła i np. czarna dziura ustawią się dla obserwatora z Ziemi idealnie wzdłuż jednej linii, czarna dziura soczewkuje światło gwiazdy tła wywołując jej czasowe pojaśnienie. (Credit UC Berkeley/Moving Universe Lab/Sean Terry).

[OA220610b_mmd05.mp4](#) (ob110462_lensing)

Mikrosoczewkowanie w Drodze Mlecznej – Animacja. Gdy dwa obiekty krążące wokół centrum Galaktyki, gwiazda tła i np. czarna dziura ustawią się dla obserwatora z Ziemi idealnie wzdłuż jednej linii, czarna dziura soczewkuje światło gwiazdy tła wywołując jej czasowe pojaśnienie. (Credit UC Berkeley/Moving Universe Lab/Sean Terry)

Dodatkowe informacje:

prof. Andrzej Udalski
Obserwatorium Astronomiczne UW
udalski@astrouw.edu.pl
(48) 22 55 30 507 ext. 116

dr Przemysław Mróz
Obserwatorium Astronomiczne UW
pmroz@astrouw.edu.pl
(48) 22 55 30 507 ext. 115