

Mimo że są obiektami egzotycznymi, czarne dziury są naprawdę najprostszymi bytami we Wszechświecie, w pełni opisywanymi jedynie przez trzy podstawowe parametry: masę, spin (prędkość obrotu) i ładunek elektryczny. Co więcej, w astrofizycznych środowiskach, czarne dziury szybko się zneutralizują poprzez oddziaływania ze swoim otoczeniem, pozostawiając masę i spin jako jedyne definiujące cechy. Obserwujemy dwa rodzaje czarnych dziur we Wszechświecie: bardzo masywne, o masach od milionów do miliardów mas Słońca, znajdujące się w centrach galaktyk (także w centrum Drogi Mlecznej), oraz te o charakterze gwiazdowym, będące końcowym etapem ewolucji masywnych gwiazd (o masie co najmniej kilku dziesiątek mas Słońca). Ten etap następuje po wyczerpaniu przez masywną gwiazdę całego jej paliwa jądrowego. W tym momencie siła grawitacji powoduje zapadnięcie się w obiekt o prędkości ucieczki większej niż prędkość światła. Taki obiekt jest więc niewidoczny i nazywamy go czarną dziurą. Najbardziej wewnętrzny promień, z którego światło wciąż może się wydostać, nazywany jest promieniem horyzontu. Jest on proporcjonalny do masy czarnej dziury i maleje wraz ze wzrostem spinu. Dla nierotującej czarnej dziury o masie 10 mas Słońca promień horyzontu wynosi 30 km. Obrót czarnej dziury nie może być dowolnie szybki. Jej maksymalny spin (oznaczany jako $a=1$) jest analogiczny takiej rotacji zwykłej gwiazdy, przy której uległaby rozerwaniu. Promień horyzontu przy maksymalnym spinie wynosi 15 km przy masie 10 mas Słońca.

Masy czarnych dziur można mierzyć przy użyciu praw Newtona (przeformułowanych dla gwiazd przez Keplera), a takie pomiary wskazują, że mieszczą się one w przybliżonym zakresie od około 4 do 20 mas Słońca. Jednak mierzenie spinu bywa trudne. Ponieważ czarne dziury są niewidoczne, sposób, by je badać, polega na studiowaniu ich w towarzystwie gwiazdy normalnej. Następnie materia z gwiazdy może wpływać na czarną dziurę (proces zwany akrecją) i emitować promieniowanie w trakcie tego procesu. Takie układy nazywane są rentgenowskimi układami podwójnymi, ponieważ większość emitowanych fotonów to promieniowanie rentgenowskie. Przez wiele lat wszystkie metody pomiaru spinów wykorzystywały pomiar siły grawitacji w pobliżu czarnych dziur. Grawitacja obniża energię fotonów obserwowanych na dużych odległościach w stosunku do tej wyemitowanej. Spiny mierzone w ten sposób były przeważnie bardzo zbliżone do maksymalnego ($a=1$). Te wartości mają istotne konsekwencje dla zrozumienia ewolucji masywnych gwiazd, na przykład dla określania prędkości ich obrotu tuż przed zapadnięciem grawitacyjnym. Co więcej, materia wpływająca na czarną dziurę w układzie podwójnym ma również moment pędu, który zwiększa jej spin. Aby rozpędzić nieobracającą się czarną dziurę do $a=1$, trzeba zwiększyć jej masę o czynnik około 2,5. Pomiary spinu są zatem kluczowe dla zrozumienia ewolucji układów binarnych zawierających czarne dziury, m.in. ponieważ zwykła gwiazda musi mieć dostatecznie dużą masę na początku transferu masy na czarną dziurę. Ponadto wydajność pozyskiwania energii z akrejującej czarnej dziury rośnie szybko wraz ze wzrostem spinu, co ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia powstawania polarnych wypływów (dżetów), powszechnie obserwowanych w rentgenowskich układach podwójnych.

Odkrycie fal grawitacyjnych pochodzących z łączenia się dwóch czarnych dziur przez grupę LIGO/Virgo w 2015 roku (ogłoszone w 2016) dało nam całkiem nowy sposób pomiaru ich mas i spinów. (Układy z dwoma czarnymi dziurami powstają gdy obie gwiazdy wyewoluowały do etapu zapadnięcia grawitacyjnego.) Zmierzone masy obejmują zakres podobny do tych z układów rentgenowskich, ale poszerzył się on do wartości ponad 100 mas Słońca. Dwa efekty mogą wyjaśniać obecność dużych mas. LIGO/Virgo wykrywa podwójne czarne dziury z znacznie większego obszaru niż znane układy rentgenowskie. Po drugie, ciężkie pierwiastki są syntetyzowane w procesie ewolucji kosmicznej, co oznacza, że w bardziej odległych, dawnych gwiazdach było ich znacznie mniej, co z kolei pozwala im na ich większe maksymalne masy.

Wartości spinów mierzonych przez LIGO/Virgo okazały się małe, typowo $a \sim 0.1$. Ponieważ akrecja zwiększa spin, oznacza to, że czarne dziury rodzą się z małym spinem. W takim przypadku wysokie spiny zmierzone w układach rentgenowskich implikują, że zostały one rozpędzone przez akrecję. Jednakże nie jest to zgodne ze standardowymi scenariuszami ewolucji gwiazd, w których transferowana masa jest niewielka. Ta rozbieżność stawia przed nami fundamentalne wyzwanie. W tym projekcie zamierzamy to rozwiązać. Średnie wartości spinu mierzone przez LIGO/Virgo wydają się być wiarygodne. Zbadamy więc scenariusze z wydajnym rozkręcaniem przez akrecję. Następnie będziemy pracować nad ulepszonymi metody pomiaru spinu w układach rentgenowskich, badając możliwość, że ich średnie spiny są tak naprawdę niskie, a większość wcześniejszych pomiarów była obciążona znaczącymi błędami systematycznymi.