

# INTRYGUJĄCY SYGNAŁ GW190814: KOALESCENCJA CZARNEJ DZIURY O MASIE GWIAZDOWEJ Z TAJEMNICZYM ZWARTYM OBIEKTEM

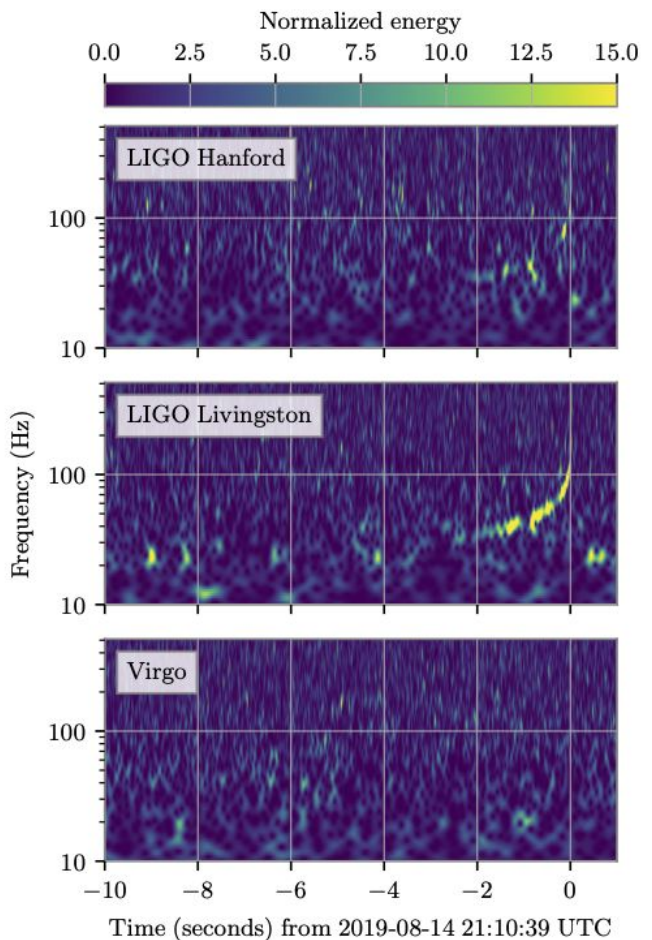
14 sierpnia 2019 r., dokładnie dwa lata od dnia pierwszej w historii obserwacji fali grawitacyjnej (ze źródła [GW170814](#)) przez trzy detektory jednocześnie, dwa detektory [Advanced LIGO](#) w USA, znajdujące się w [Hanford](#) w stanie Waszyngton i w [Livingston](#) w Luizjanie, oraz detektor [Advanced Virgo](#) w Cascinie we Włoszech, zaobserwowano kolejny sygnał fali grawitacyjnej z prawdopodobnie jeszcze bardziej intrygującego źródła. Detektory LIGO-Virgo były w trakcie [trzeciej kampanii obserwacyjnej O3](#), kiedy zaobserwowały ten niezwykle silny sygnał, wywołany podczas [koalescencji](#) (połączenia się) dwóch [zwartych obiektów](#) w układzie podwójnym – [czarnej dziury](#) oraz obiektu o nieokreślonej naturze.

Dwie cechy sprawiają, że źródło sygnału GW190814 jest wyjątkowe. Po pierwsze, bardziej masywny składnik układy podwójnego ma masę około dziewięć razy większą niż jego towarzysz, co czyni ten układ najbardziej asymetrycznym źródłem fal grawitacyjnych obserwowanym do tej pory. Po drugie, zmierzona masa mniej masywnego obiektu czyni go albo najlżejszą czarną dziurą, albo najcięższą [gwiazdą neutronową](#), jaką kiedykolwiek odkryto w układzie dwóch zwartych obiektów – i nie jesteśmy pewni, która z tych możliwości jest prawdziwa. Obie te cechy stanowią wyzwanie dla naszego rozumienia zakresu mas, jakie mogą mieć zwarte objekty oraz sposobu, w jaki tworzą one układy podwójne.

## SYGNAŁ FALI GRAWITACYJNEJ

W poszukiwaniu sygnałów fali grawitacyjnej w danych zarejestrowanych przez detektory wykorzystuje się metodę [filtru dopasowanego](#), w której porównuje się zarejestrowane dane z przewidywaniami [ogólnej teorii względności](#) Alberta Einsteina. Metoda ta pozwala oszacować, że rzadziej niż raz na 10 000 lat sygnał taki jak GW190814 mógłby być wytworzony przez przypadkowy szum detektora. Sygnał GW190814 to trzeci jak dotąd najsilniejszy sygnał, jaki zaobserwowaliśmy (po sygnałach [GW170817](#) i [GW150914](#)). Jest on na tyle silny, że jest widoczny gołym okiem w spektrogramie na [rys. 1](#), który pokazuje jak zmienia się częstotliwość sygnału wraz z upływem czasu.

W ciągu całej kampanii O3 konsorcjum LIGO-Virgo publikowało w czasie rzeczywistym [publiczne alerty](#) o potencjalnie wykrytych falach grawitacyjnych. Alerty te zawierają wstępne informacje o prawdopodobnym źródle sygnału poprzez zaliczenie go do odpowiedniej [klasy](#).



**Rysunek 1:** Reprezentacje czasowo-częstotliwościowe danych zawierających sygnał GW190814, zarejestrowane przez LIGO-Hanford (u góry), LIGO-Livingston (w środku) i Virgo (na dole). Oś czasu zaczyna się około 10 sekund przed zderzeniem się składników układu podwójnego. Różne wartości energii w określonym przedziale czasowo-częstotliwościowym są reprezentowane przez paletę kolorów. Sygnał „ćwierku” jest wyraźnie widoczny na środkowym panelu (dane LIGO-Livingston), w którym sygnał był najgłośniejszy.

Odwiedź nas  
w internecie:

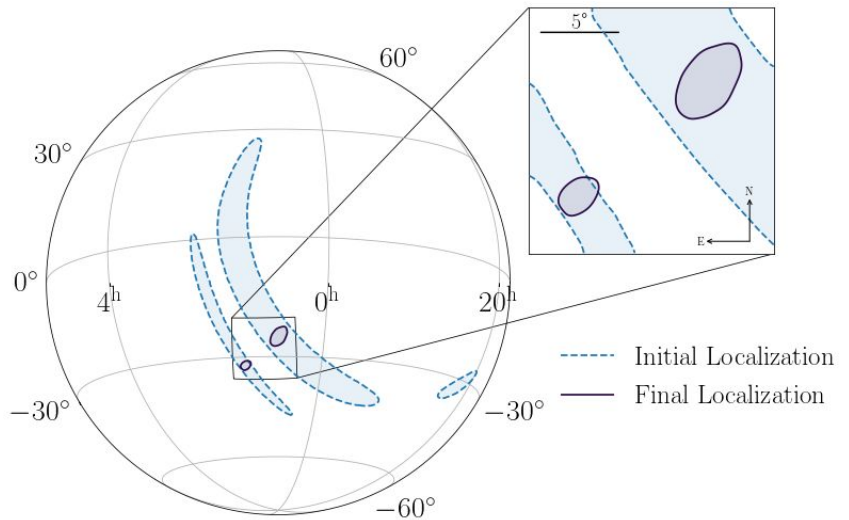
<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>



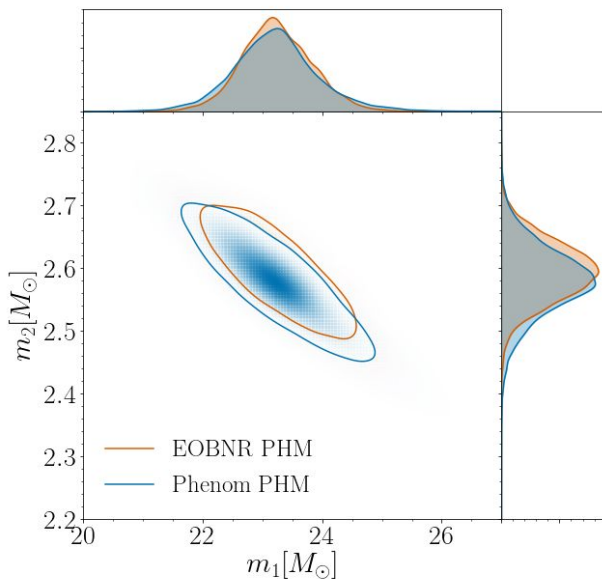
Informacje o GW190814 były [ogłoszone](#) w ciągu 20 minut od wykrycia sygnału z klasyfikacją „[przerwa masowa \(mass gap\)](#)”, co oznacza, że oszacowana masa co najmniej jednego ze składników ma wartość od 3 do 5 razy większą od **masy Słońca,  $M_{\odot}$** . Definicja przerwy masowej wynika z braku obserwacji czarnych dziur o masach poniżej około  $5M_{\odot}$ . Ta część rozkładu masy czarnych dziur jest znana jako [„dolna” przerwa masowa](#).

Dalsza analiza sygnału umożliwiła bardziej precyzyjne oszacowanie mas, a [aktualizacja, która została](#) podana do wiadomości 11 godzin później, zmieniła klasyfikację źródła na „[NSBH](#)”, co oznacza, że jeden z obiektów ma masę poniżej  $3M_{\odot}$ , która jest przybliżoną wartością maksymalnej masy



**Rysunek 2:** Obszar na niebie, z którego prawdopodobnie pochodzi źródło sygnału GW190814. Niebieskie obszary są wynikiem początkowej analizy danych wykonanej online, a fioletowe obszary są ostatecznie przyjętą lokalizacją.

gwiazdy neutronowej (NS - neutron star, czyli gwiazda neutronowa, BH - black hole, czyli czarna dziura). Źródło zlokalizowano również na małym obszarze nieba o wielkości około 20 stopni kwadratowych (**patrz rys. 2**). Korzystając z tych informacji przeprowadzono dalsze poszukiwania, podobnie jak w przypadku [GW170817](#), w całym [widmie elektromagnetycznym](#) oraz [neutrin](#), ale nie wykryto żadnych odpowiedników fal grawitacyjnych. Nie jest to jednak czymś nieoczekiwanym ponieważ z jednej strony GW190814 jest znacznie bardziej odległy niż GW170817, z drugiej zaś strony zmierzone właściwości źródła (patrz poniżej) nie sprzyjają silnej emisji elektromagnetycznej.



**Rysunek 3:** Szacowane masy dwóch zwartych obiektów, które stworzyły sygnał GW190814. Oś pozioma reprezentuje masę cięższego obiektu, oś pionowa masę lżejszego obiektu (którym może być gwiazda neutronowa lub czarna dziura). Kontury i zacieniony region pokazują możliwe kombinacje mas zgodne z danymi. Krzywe w dodatkowych panelach u góry i po prawej stronie odpowiadają rozkładom możliwych wartości dla poszczególnych mas. Kolory odpowiadają dwóm nieznacznie różnym modelom sygnału opartym na ogólnej teorii względności.

## WŁAŚCIWOŚCI ŹRÓDŁA

W układzie podwójnym będącym źródłem sygnału GW190814 bardziej masywny obiekt ma masę około  $23 M_{\odot}$ , co jest zgodne z własnościami populacji czarnych dziur obserwowanych do tej pory przez LIGO i Virgo (**patrz rys. 3**). Mniej masywny obiekt ma masę między  $2,5 M_{\odot}$  a  $3 M_{\odot}$ , co przewyższa masę prawdopodobnie najcięższej znanej gwiazdy neutronowej, [MSP J0740+6620](#), ale jest mniejszą od typowych mas czarnych dziur wykrytych pośrednio przez obserwacje elektromagnetyczne. Jego masa jest porównywalna z masą zwanego obiektu (prawdopodobnie czarnej dziury) powstałego w wyniku koalescencji dwóch gwiazd neutronowych zaobserwowanych jako sygnał [GW170817](#).

Duża różnica mas składników układu podwójnego pomaga nam dokładniej mierzyć właściwości źródła. Im większa ta różnica, tym silniejsze w sygnale fali grawitacyjnej są wyższe „harmoniczne” częstotliwości podstawowej, które są analogiczne do wyższych tonów drgającej struny gitarowej. Podobnie jak w przypadku sygnału [GW190412](#) pochodzącego z koalescencji dwóch czarnych dziur o nierównych masach, degeneracja między odległością źródła a nachyleniem płaszczyzny układu jest częściowo zniesiona przez dodatkowe informacje zawarte w wyższych harmonicznych.

W konsekwencji jesteśmy w stanie ustalić, że źródło fal grawitacyjnych z GW190814 znajduje się w odległości około 800 milionów **lat świetlnych**. Oczekuje się, że zwarte objekty, takie jak gwiazdy neutronowe i czarne dziury, [obracają się](#). Ponieważ ich obrót nie wpływa na sygnał fali grawitacyjnej tak silnie jak ich masy, jest zatem trudniejszy do zaobserwowania. GW190814 był długim sygnałem - był obserwowany w detektorach przez około 10 sekund - co w połączeniu z dużą siłą sygnału pozwoliło na najdokładniejszy jak dotąd pomiar spinu czarnej dziury: jego wartość to mniej niż 7% maksymalnej wartości spinu dopuszczalnego w ogólnej teorii względności. Można również ustalić, że układ prawdopodobnie nie podlegał [precesji](#).

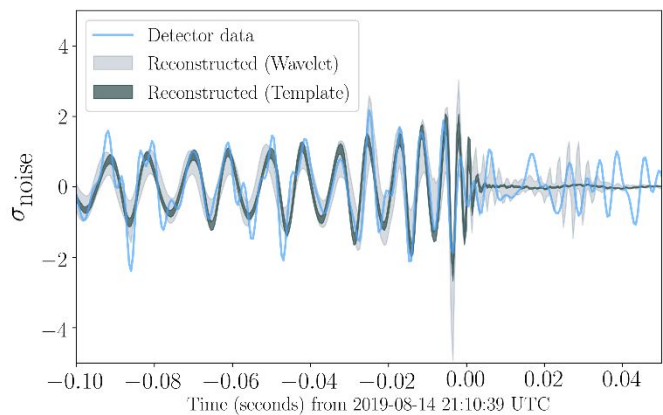
## SPRAWDZIAN DLA EINSTEINA I HUBBLE'A

Sygnał GW190814 umożliwia przeprowadzenie wielu testów naukowych teorii. Ponieważ masy składników źródła GW190814 są znacznie bardziej asymetryczne niż dla [GW190412](#), znajdujemy o wiele silniejsze dowody na obecność w sygnale *wyższych harmonicznych* lub *wyższych multipoli* promieniowania grawitacyjnego. To wspaniałe potwierdzenie ogólnej teorii względności, która przewiduje multipolową strukturę promieniowania grawitacyjnego.

Sygnał GW190814 wykorzystano do przeprowadzenia kilku dodatkowych testów ogólnej teorii względności (**patrz rys. 4**), z których wynika, że sygnał można dobrze opisać jako wywołany koalescencją dwóch czarnych dziur. Co znamienne, nie ma dowodów sugerujących, że mnie masywny obiekt jest czymś innym niż czarna dziura – gwiazdą neutronową lub czymś jeszcze bardziej [egzotycznym](#).

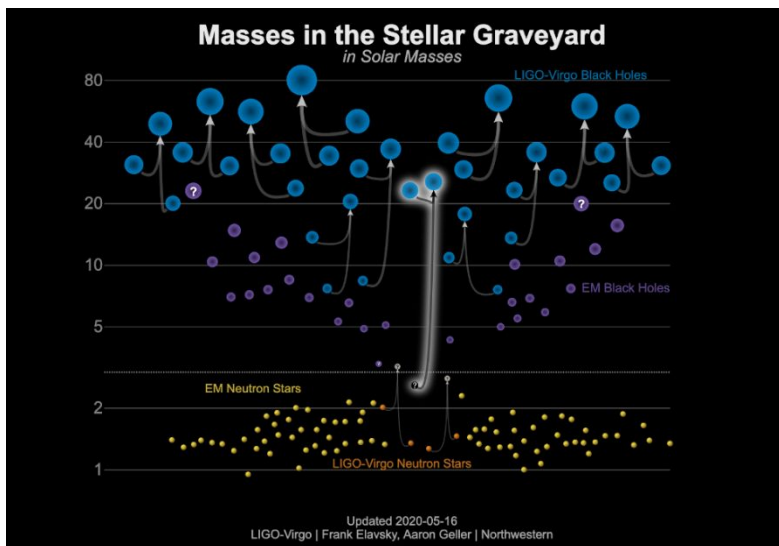
Za pomocą sygnału GW190814 jesteśmy również w stanie dokonać niezależnego pomiaru [stałej Hubble'a](#)  $H_0$ , czyli obecnej prędkości rozszerzania się Wszechświata. Źródło sygnału GW190814 jest jak dotąd najlepiej zlokalizowanym na niebie źródłem fali grawitacyjnej, dla którego nie zaobserwowaliśmy odpowiednika w spektrum elektromagnetycznym lub neutrinach (taka obserwacja pozwoliłaby jednoznacznie zidentyfikować macierzystą galaktykę, w której znajdowało się źródło). Zasadniczo do pomiaru  $H_0$  potrzebna jest znajomość przesunięcia ku czerwieni macierzystej galaktyki, ale nawet nie mając tej informacji, można rozważyć *wszystkie* znane galaktyki znajdujące się w dobrze zlokalizowanym obszarze, w którym leży źródło GW190814. Aby ustalić wartość stałej Hubble'a, łączymy pomiary przesunięć ku czerwieni wszystkich tych galaktyk, odpowiednio ważone prawdopodobieństwem, że dana galaktyka zawiera źródło sygnału, z pomiarem odległości do źródła dokonany na podstawie analizy sygnału GW190814. Wykonując te obliczenia ograniczyliśmy wartość  $H_0$  do wartości około 75 km/s na megaparsek, czyli dokładniej niż było to wcześniej możliwe w przypadku dowolnego innego źródła fali grawitacyjnej zaobserwowanego bez elektromagnetycznego odpowiednika.

Lżejszy zwarty obiekt może być albo wyjątkowo ciężką gwiazdą neutronową, albo niezwykle lekką czarną dziurą. Obecność gwiazdy neutronowej w układzie podwójnym jesteśmy w stanie wywnioskować z obserwacji na podstawie zawartych w sygnale fali grawitacyjnej informacji o jej zniekształceniu wynikającym z [oddziaływań pływowych](#): w układzie podwójnym gwiazda neutronowa jest zniekształcana przez przyciąganie grawitacyjne towarzysza, dokładnie tak samo jak w przypadku pływów oceanicznych na Ziemi wywołanych przez grawitację Księżyca. Jednak w przypadku systemu tak masywnego i asymetrycznego jak GW190814 efekt ten okazał się zbyt mały, aby móc go zmierzyć, nie wiemy zatem, czy sygnał pochodzi z połączenia się czarnej dziury i gwiazdy neutronowej, czy też z połączenia się dwóch czarnych dziur. Z drugiej strony modele teoretyczne materii gwiazdy neutronowej, a także obserwacje populacji gwiazd neutronowych w promieniowaniu elektromagnetycznym, pozwalają nam oszacować maksymalną masę, jaką może osiągnąć gwiazda neutronowa.



**Rysunek 4:** Reprezentacje rzeczywistych danych detektora (niebieska krzywa) w czasie, wraz z przewidywanym kształtem sygnału. Ciemnoszare pasmo reprezentuje modelową prognozę sygnału w ogólnej teorii względności, podczas gdy jasnoszare pasmo reprezentuje rekonstrukcję sygnału przy użyciu minimalnych założeń dotyczących konkretnej teorii grawitacji. Oś pionowa jest skalowana w taki sposób, że wartość 1 odpowiada typowemu poziomowi fluktuacji szumu widocznego w danych.

Dotychczasowe badania sugerują, że lżejszy zwarty obiekt jest prawdopodobnie zbyt ciężki, aby mógł być gwiazdą neutronową, a zatem jest bardziej prawdopodobne, że jest czarną dziurą. Nie możemy jednak wykluczyć możliwości, że GW190814 zawiera wyjątkowo ciężką gwiazdę neutronową. Zmusiłoby to nas do zrewidowania naszych oszacowań na maksymalną możliwą masę gwiazdy neutronowej.



**Rysunek 5:** Masy gwiazd neutronowych i czarnych dziur wynikające z pomiarów fal grawitacyjnych i obserwacji elektromagnetycznych. Żółte i fioletowe znaczniki reprezentują pomiary elektromagnetyczne, odpowiednio, gwiazd neutronowych i czarnych dziur, podczas gdy pomarańczowe i niebieskie znaczniki oznaczają detekcje fal grawitacyjnych. Nasz sygnał, GW190814, jest wyróżniony na środku grafiki jako połączenie czarnej dziury i tajemniczego obiektu o masie około 2,6 razy większej niż masa Słońca; w wyniku zderzenia powstała większa czarna dziura.

## HISTORIA POCHODZENIA: JAK POWSTAŁ TEN UKŁAD?

Ponieważ masa lżejszego zwartego obiektu leży pomiędzy typowymi wartościami dla gwiazdy neutronowej i czarnej dziury i jest około dziewięć razy mniejsza niż masa jego towarzysza, sygnał GW190814 nie przypomina żadnego z sygnałów zaobserwowanych dotychczas przez detektory LIGO i Virgo (**patrz rys. 5**). Również symulacje syntezy populacji układów podwójnych pokazują, że tego rodzaju zdarzenia będą występować znacznie rzadziej niż koalescencji dwóch czarnych dziur lub dwóch gwiazd neutronowych. Z tych powodów wyjaśnienie powstania tego systemu jest bardzo trudne.

Porównanie właściwości i szacowanej częstotliwości występowania sygnałów typu GW190814 z przewidywaniami opartymi na teoretycznych modelach ewolucji gwiazd, prowadzi do wniosku, że młode gęste [gromady gwiazd](#) i dyski wokół [aktywnych jąder galaktycznych](#) są bardziej sprzyjającym środowiskiem dla tego rodzaju wydarzeń niż [gromady kuliste](#). Wydaje się również mało prawdopodobne, aby takie wydarzenie mogło powstać w wyniku ewolucji izolowanego układu podwójnego. Możliwe jest jednak, że lżejszy obiekt w układzie powstał w wyniku wcześniejszego zderzenia, a następnie stworzył nowy układ podwójny z czarną dziurą poprzez oddziaływania grawitacyjne w gęstych środowiskach gwiazdowych, takich jak gromady kuliste. Jest jednak mało prawdopodobne, aby był to główny mechanizm, za pomocą którego tworzone są takie układy podwójne.

GW190814 inspirowało fascynujące pytania o masy zwartych obiektów i procesy, które prowadzą do ich powstania. Przyszłe obserwacje fal grawitacyjnych będą miały kluczowe znaczenie dla rzucenia nieco więcej światła (lub fal grawitacyjnych!) na większą populację asymetrycznych układów podwójnych, których pierwszym przykładem jest GW190814.

### GLOSARIUSZ

**Obiekt zwarty:** Bardzo gęsty obiekt astronomiczny będący końcowym etapem życia gwiazdy np. biały karzeł, gwiazda neutronowa lub czarna dziura.

**Czarna dziura:** Obiekt tak zwarty, że nawet światło nie może uciec przed jego przyciąganiem grawitacyjnym.

**Gwiazda neutronowa:** najgęstszy stabilny obiekt we Wszechświecie, pozostałość po zapadnięciu się masywnej gwiazdy.

**Koalescencja zwartych obiektów:** proces, w którym w wyniku emisji fal grawitacyjnych dwa zwarte obiekty zbliżają się do siebie poruszając się po spiralnych orbitach, zakończony zderzeniem się tych obiektów.

$M_{\odot}$ : Masa Słońca - standardowa jednostka masy, równa około  $2 \times 10^{30}$  kg.

**Przerwa masowa:** Przerwa w obserwowanym rozkładzie mas czarnych dziur o masach od 3 do  $5 M_{\odot}$ .

**Wyższe harmoniczne/multipole:** Emisja fal grawitacyjnych może być opisana jako rozwinięcie w „harmonikach sferycznych”. Wyższe harmoniczne są wyrazami w tym rozwinięciu następującymi po wyrazie dominującym.

**Precesja:** Ze względu na prawo zachowania momentu pędu, gdy czarne dziury wirują w kierunku innym niż oś orbity układu podwójnego, płaszczyzna orbity będzie się obracać („podlegać precesji”) wokół kierunku całkowitego momentu pędu.

**Rok świetlny (ly):** Jednostka odległości zdefiniowana jako odległość przebywana przez światło w ciągu roku.

**Megaparsek (Mpc):** Jednostka odległości równa ok. 3,26 miliona lat świetlnych.

**Przesunięcie ku czerwieni:** Zwiększenie długości fali (dźwięku, światła lub fal grawitacyjnych) z powodu ruchu źródła względem obserwatora. Z powodu [kosmologicznej ekspansji Wszechświata](#) obiekty takie jak galaktyki oddalają się od nas, a światło i inne promieniowanie elektromagnetyczne przez nie emitowane ma dłuższą długość fali.

**Gromada kulista:** Sferycznie symetryczna, gęsta grupa gęsto gwiazd poruszająca się po orbicie wokół galaktyki. Gromada kulista może zawierać do miliona gwiazd.

**Aktywne jądra galaktyczne:** Bardzo zwarte i bardzo jasne regiony znajdujące się w centrach wielu galaktyk. Są jednymi z najsilniejszych, stałych źródeł energii we Wszechświecie.