

# GRAWITACJA UGINA GRAWITACJĘ: CZY KTÓRYŚ Z SYGNAŁÓW WYKRYTYCH PRZEZ LIGO-VIRGO W DANYCH O3A ULEGŁ SOCZEWKOWANIU GRAWITACYJNEMU?

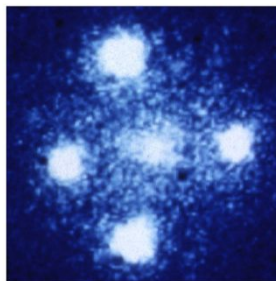
Wyobraźmy sobie szkło powiększające wielkości galaktyki i jego działanie na światło lub fale grawitacyjne podróżujące przez kosmos. Dzięki zjawisku soczewkowania grawitacyjnego masywne obiekty astronomiczne mogą działać jak takie gigantyczne soczewki. W niżej opisanym badaniu szukaliśmy oznak soczewkowania w sygnałach fal grawitacyjnych wykrytych w pierwszej połowie trzeciej kampanii obserwacyjnej LIGO-Virgo, nazwanej w skrócie O3a.

## SOCZEWKOWANIE GRAWITACYJNE - PRZEWIDYWANIE EINSTEINA I JEGO BOGATE ZASTOSOWANIA W ASTRONOMII

Ogólna teoria względności przewiduje, że masywne obiekty astronomiczne zakrzywiają w swoim pobliżu przestrzeń i czas, zakrzywiając również bieg promieni świetlnych. Innymi słowami, działają jak soczewki grawitacyjne. Takie soczewkowanie może powiększać odległe obiekty, dzielić je na wiele obrazów, a także deformować je w długie łuki lub „pierścienie Einsteina” (zob. Rys. 1). Obserwacje soczewkowania grawitacyjnego są szeroko rozpowszechnione w astronomii w całym zakresie widma elektromagnetycznego. Historycznie rzecz biorąc, soczewkowanie dostarczyło pierwszego testu teorii Einsteina podczas zaćmienia Słońca w 1919 roku. Obecnie do badania rozkładu masy we Wszechświecie wykorzystuje się obserwacje słabego soczewkowania, które dostarcza przekonującego argumentu za istnieniem ciemnej materii. Soczewkowanie pozwala również astronomom na badanie egzoplanet, które powodują okresowe zmiany jasności ich gwiazdy, gdy poruszają się przed nią. Soczewkowanie umożliwia nam także odkrywanie masywnych obiektów i struktur w kosmosie, które w innym przypadku byłyby zbyt słabo widoczne, aby je dostrzec. Soczewkowanie grawitacyjne stało się niewątpliwie standardowym narzędziem w astronomii, astrofizyce i kosmologii.



ESA/Hubble & NASA



NASA, ESA, and STScI



NASA, ESA, Hubble SM4 ERO Team, ST-ECF

**Rysunek 1.** Gdy promień światła przebiega w pobliżu masywnych obiektów astronomicznych, jego tor jest zakrzywiony z powodu grawitacji, co skutkuje soczewkowaniem grawitacyjnym. Zjawisko to może powodować powstawanie pierścieni i krzyży Einsteina, statystycznych zniekształceń w świetle galaktyk tła oraz wiele innych intrygujących efektów obserwacyjnych. Podobnie jak światło, również fale grawitacyjne mogą być soczewkowane. Jednak metody wykrywania i wykorzystywania zjawiska soczewkowania fal grawitacyjnych są zupełnie inne. Zamiast poszukiwania zmian kształtu obrazów lub przejściowych pojaśnień gwiazd, skupiamy się na powtarzających się zjawiskach dotyczących fal grawitacyjnych i zależnych od częstotliwości zniekształceniach tych fal.

## CO SOCZEKOWANIE GRAWITACYJNE MOŻE ZROBIĆ Z FALAMI GRAWITACYJNYMI?

Podobnie jak fale elektromagnetyczne, [fale grawitacyjne](#) mogą być soczewkowane grawitacyjnie przez znajdujące się po drodze obiekty, takie jak gwiazdy, [czarne dziury](#), galaktyki i gromady galaktyk (zob. Rys. 1). Choć teoria stojąca za soczewkowaniem fal grawitacyjnych jest podobna do teorii soczewkowania światła, metody jego wykrywania są zupełnie inne ze względu na zasadnicze różnice w naturze źródeł i detektorów. W szczególności, możemy wykryć wzmocnienie soczewkowanego obrazu jako ogólne wzmocnienie fal. Wzmocnienie sprawia, że sygnały z [łączących się układów podwójnych](#) wydają się pochodzić z bliższych i bardziej masywnych źródeł niż w rzeczywistości. Wielokrotnie obrazy pojawiałyby się wtedy jako „powtarzające się” zdarzenia: niemal identyczne morfologicznie zjawiska w odstępie od kilku minut do kilku miesięcy (a czasem nawet lat!). Ponieważ soczewka zazwyczaj wytwarza obrazu o zbyt małych odległościach od siebie, aby różnice te można było wychwycić za pomocą obecnych detektorów, zdarzenia te wydają się pochodzić z tego samego miejsca na niebie. Z drugiej strony, mikrosoczewkowanie wytwarza niewielkie opóźnienia czasowe, które mogą powodować nakładanie się w detektorach wielu soczewkowanych zdarzeń i powstawanie znanego z fizyki fal zjawiska „dudnienia”.

## CZEGO MOŻEMY SIĘ DOWIEDZIEĆ DZIĘKI DETEKCYI SOCZEKOWANIA FAL GRAWITACYJNYCH?

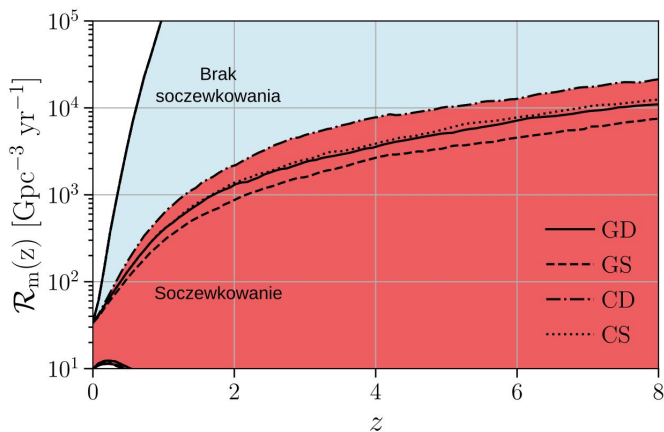
W przypadku identyfikacji, soczewkowane fale grawitacyjne mogą zapoczątkować wiele ekscytujących badań. Przy specyficznym układzie soczewek można zlokalizować łączące się układy podwójne czarnych dziur, niewidoczne dla konwencjonalnych teleskopów, czyli połączyć badania soczewkowania grawitacyjnego i elektromagnetycznego. Jeśli natomiast soczewkowanym falom towarzyszy sygnał elektromagnetyczny, można przeprowadzić precyzyjne badania kosmologiczne mierząc milisekundowe (i krótsze) opóźnienia czasowe soczewkowanych fal grawitacyjnych. Zestawiając opóźnienia czasowe pomiędzy soczewkowanymi falami grawitacyjnymi a ich przejściowymi odpowiednikami elektromagnetycznymi, można zmierzyć prędkość grawitacji w porównaniu do prędkości światła. Ponieważ soczewkowane fale grawitacyjne pozwalają na wielokrotne obserwacje tego samego zjawiska przy różnych orientacjach detektora, mogą one również pomóc zbadać pełną [polaryzację](#) fal i przetestować ogólną teorię względności i teorie alternatywne. Z drugiej strony, mikrosoczewkowanie może pomóc w badaniu populacji obiektów takich jak pierwotne i średnio-masywne czarne dziury. Detekcje soczewkowanych fal grawitacyjnych pozwolą na nowe badania naukowe w zakresie fundamentalnej fizyki, astrofizyki i kosmologii.

## CZEGO SZUKALIŚMY W DANYCH O3A, I CO ZNALEZIŚMY

W przedstawianej tu pracy szukaliśmy oznak soczewkowania w sygnałach fal grawitacyjnych emitowanych przez [ciasne układy podwójne](#) zarejestrowane przez [Advanced LIGO](#) i [Advanced Virgo](#) podczas kampanii obserwacyjnej O3a. Przewidzieliśmy jak często soczewkowanie występuje przy obecnej czułości detektorów i określiliśmy, że nawet brak wykrywalnych silnych efektów soczewkowania poprawia naszą wiedzę o tempie łączenia się składników w ciasnych układach podwójnych w [odległym Wszechświecie](#) (zob. Rys. 2).

## RYSUNKI Z PUBLIKACJI

Więcej informacji na temat rysunków i sposobu ich wykonania można znaleźć w pracy naukowej dostępnej [tu](#).

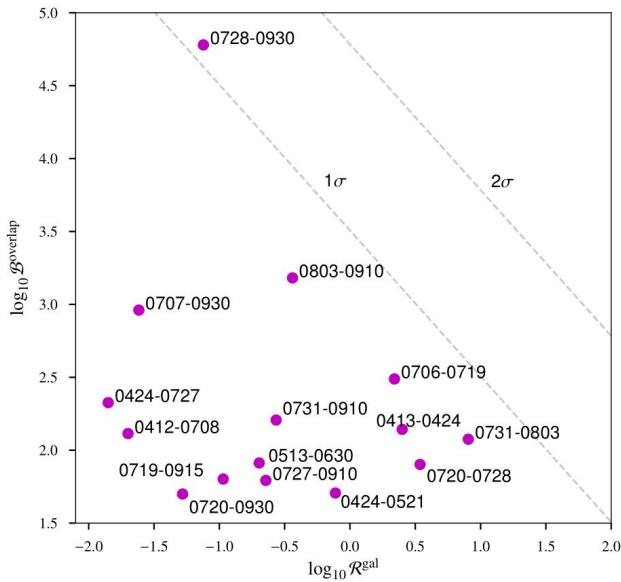


**Rysunek 2.** Diagram pokazuje, jak obecność lub brak wykrywalnych soczewkowanych fal grawitacyjnych poprawia naszą wiedzę o tempie łączenia się/koalescencji obiektów w ciasnych układach podwójnych (oś pionowa) w całej kosmicznej historii; na osi poziomej podane jest kosmiczne przesunięcie ku czerwieni (chwila obecna to  $z=0$ ). Na podstawie naszego katalogu detekcji, o którym więcej przeczytasz w tym podsumowaniu, mamy już ogólne wyobrażenie o tym tempie łączenia się, na co wskazuje niebieski obszar na diagramie. Wiedza o tym, czy w danych występują wykrywalne efekty soczewkowania, ogranicza tempo łączenia się dla dużych przesunięć ku czerwieni (czyli wczesnego Wszechświata), co pokazuje czerwony obszar na diagramie. Dzieje się tak, ponieważ soczewkowanie może wzmacniać sygnały, dzięki czemu jesteśmy w stanie wykryć je z większej odległości. Wielkość odłożona na osi pionowej jest technicznie gęstością tempa koalescencji, to znaczy liczbą łączących się układów w ciągu roku w jednostkowej objętości jednego gigaparseka (Gpc) sześciennego. Różne linie przedstawiają wyniki dla różnych aspektów soczewkowania wykrywanych jako zdarzenia fal grawitacyjnych: soczewki w skali galaktyk (G) i soczewki w skali gromady (C), a także wykrywanie tylko jednego (S) lub obu (D) obrazów wytworzonych przez zdarzenie soczewkowania podwójnego obrazu.



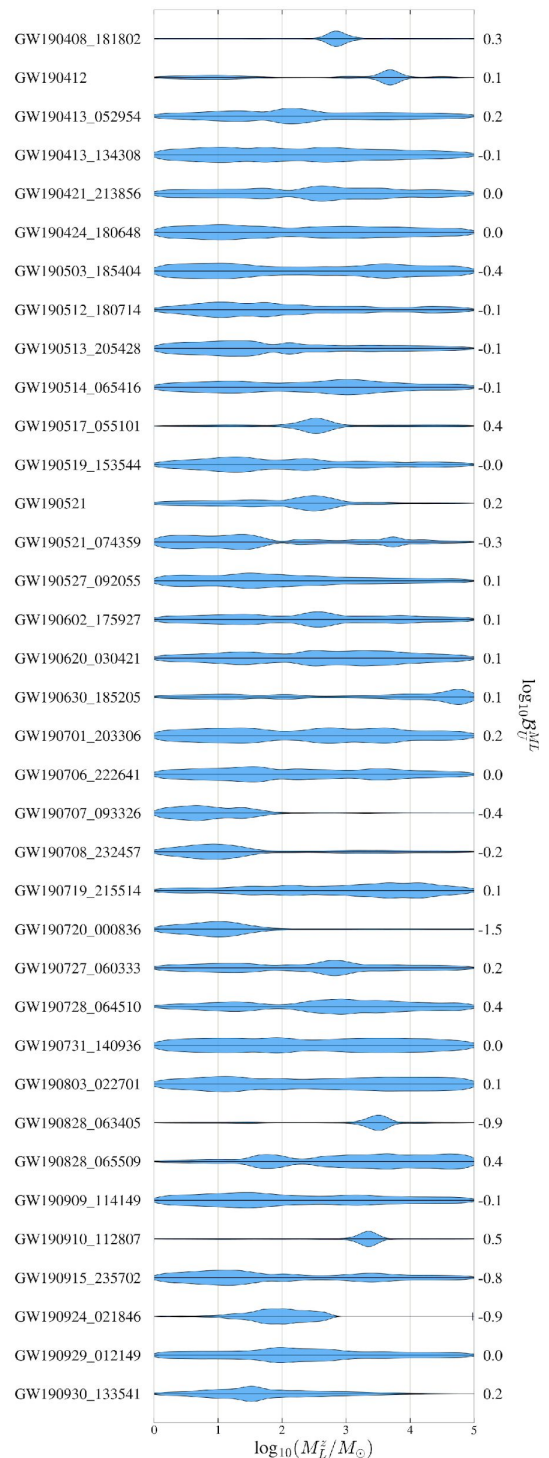
Odwiedź nas w internecie:

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



**Rysunek 3.** Najbardziej obiecujące pary potencjalnie soczewkowanych zdarzeń z katalogu GWTC-2 z kampanii obserwacyjnej O3a, biorąc pod uwagę podobieństwo między ich szacowanymi własnościami, w tym np. masami i spinami łączących się obiektów. Stopień zbieżności jest uszeregowany na osi pionowej. Oś pozioma mówi nam, czy opóźnienie czasowe pomiędzy parami jest bardziej zgodne z soczewkowaniem (zakładając, że galaktyka działa jak soczewka, co prowadzi do krótkich oczekiwanych opóźnień czasowych i jest wyżej w rankingu) lub z dwoma niepowiązanymi zdarzeniami (które średnio dałyby dłuższe opóźnienia czasowe i są niżej w rankingu). Linie przerywane informują nas, że łącząc obie miary, żadna z par nie dostarcza przekonujących dowodów na istnienie soczewkowania (mierzonych na konwencjonalnych poziomach ufności "sigma"). Aby sięgnąć głębiej, przeprowadziliśmy również bardziej szczegółowe analizy uzupełniające i uwzględniliśmy modele populacyjne oraz efekty selekcji; ostatecznie, wszystkie pary sygnałów wydają się być zgodne z niezależnymi zjawiskami, które przypadkowo, bez udziału soczewkowania, mają podobne właściwości.

Pokazaliśmy również, jak [brak obserwowalnego stochastycznego tła fali grawitacyjnej](#) poprawia wiedzę o tempie soczewkowania. Ponadto zbadaliśmy ideę, czy wywołane soczewkowaniem wzmocnienie może pomóc wyjaśnić wyjątkowo duże masy, które obserwujemy w niektórych z naszych wykrytych zdarzeń (takich jak [GW190425](#) lub [GW190521](#)). Poszukiwaliśmy również w danych detektora wielokrotnych obrazów soczewkowania, porównując prawdopodobieństwo, że dana para sygnałów jest albo soczewkowanymi kopiami z tego samego źródła, albo zostaje wyprodukowana przez niepowiązane źródła. Znaleźliśmy kilka par kandydatów, które są do siebie bardzo podobne (zob. Rys. 3), tak jak soczewkowany obraz pojedynczego źródła, ale ostatecznie nie znaleźliśmy poparcia dla faktycznego soczewkowania, po rozważeniu bardziej realistycznych założeń dotyczących populacji systemów źródłowych, [efektów selekcji](#) w naszych poszukiwaniach oraz oczekiwanego tempa soczewkowania przy obecnej czułości. Wreszcie szukaliśmy charakterystycznego efektu „wzorca dudnienia” mikrosczewkowania w przebiegach wykrytych zdarzeń, nie znajdując na to dowodów w 36 testowanych zdarzeniach (zob. Rys. 4). Podsumowując, nasza wyczerpująca analiza danych O3a dotycząca wzmocnienia fal grawitacyjnych, wielokrotnych obrazów i sygnatur mikrosczewkowania, nie ujawniła żadnych przekonujących dowodów na soczewkowanie grawitacyjne.



**Rysunek 4.** Wyniki testowania 36 zdarzeń z O3a pod kątem zależnych od częstotliwości mikrosczewkowania „wzorcowych dudnień”. Kontury pokazują, jak prawdopodobne są określone wartości masy soczewki, biorąc pod uwagę dane pomiarowe i zakładając, że zdarzenie uległo mikrosczewkowaniu. Jednak nie znaleźliśmy żadnych faktycznych dowodów na to, aby miało to miejsce w przypadku któregośkolwiek z tych zdarzeń. Liczby wymienione po prawej stronie rysunku to wartości [czynnika Bayesa](#) informujące nas, czy soczewkowanie czy też jego brak są bardziej prawdopodobnym wyjaśnieniem zebranych danych. Wszystkie te wartości są ujemne lub bliskie zeru, co oznacza, że żadne ze zdarzeń nie wymaga mikrosczewkowania, aby wyjaśnić jego ewolucję częstotliwości.

## SPOJRZENIE W PRZYSZŁOŚĆ

W przyszłości będzie można lepiej badać efekty soczewkowania fal grawitacyjnych dzięki bardziej czułym metodom analizy i bardziej szczegółowemu modelowaniu soczewek.

Obserwacje elektromagnetyczne kandydatów na soczewki, nawet niepotwierdzonych na podstawie samych fal grawitacyjnych, mogą dać nadzieję na zidentyfikowanie galaktyk-gospodarzy i soczewek. Dalsza modernizacja detektorów obecnej generacji oraz rozbudowa sieci globalnej będą nadal zwiększać szanse na wykrycie wyraźnych sygnałów soczewkowania. Gdy w latach 2030 zaczną pracować detektory trzeciej generacji oraz te znajdujące się w przestrzeni kosmicznej (np. [Teleskop Einsteina](#), [Cosmic Explorer](#) i [LISA](#)), pojawi się wiele innych ekscytujących możliwości.

## DOWIEDZ SIĘ WIĘCEJ:

Odwiedź nasze strony:

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

Darmową kopię pełnego artykułu naukowego można przeczytać [tutaj](#).

## SŁOWNICZEK

**Czarna dziura:** Masywny i zwarty obiekt, którego przyciąganie grawitacyjne jest tak silne, że nawet światło nie może się z niego wydostać.

**Ciasny układ podwójny:** Układ dwóch obiektów, na przykład gwiazdy neutronowej lub czarnej dziury, krążących wokół siebie po bardzo ciasnych orbitach.

**Odległy Wszechświat:** Ze względu na skończoną prędkość światła, im dalej patrzymy w odległy Wszechświat, tym bardziej cofamy się w czasie. W związku z tym wykrywane przez nas koalescencje w odległych od nas układach podwójnych zdarzyły się gdy Wszechświat był dużo młodszy niż obecnie. Dzięki takim obserwacjom zaglądamy zatem w starsze epoki kosmiczne niż gdy badamy bliższe obiekty. Ponieważ [Wszechświat się rozszerza](#), dalsze odległości odpowiadają również większym [przesunięciom ku czerwieni](#) mierzonego sygnału.

**Ogólna teoria względności:** Uznawana obecnie teoria grawitacji, po raz pierwszy opisana przez Alberta Einsteina w 1916 roku. W tej teorii, grawitacja jest wynikiem zakrzywienia czasoprzestrzeni spowodowanego obecnością masy i energii. Teoria ta przewidziała zarówno fale grawitacyjne, jak i soczewkowanie grawitacyjne.

**Gigaparsek:** Jednostka odległości w astronomii, stosowana do opisu największych skal kosmicznych i wynosząca miliard [parseków](#). Jeden gigaparsek (w skrócie Gpc) odpowiada ponad trzem miliardom lat świetlnych lub  $3 \cdot 10^{22}$  km.

**Model (wzorec) fali grawitacyjnej:** Model teoretyczny opisujący jak zmieniają się w czasie zaburzenia wywołane przez fale grawitacyjne.

**Polaryzacje fal grawitacyjnych:** Geometryczne wzorce rozciągania i ściskania czasoprzestrzeni spowodowanego przez poruszającą się falę grawitacyjną. Ogólna teoria względności przewiduje tylko jeden specyficzny rodzaj polaryzacji, zwanej tensorową, ale niektóre alternatywne teorie grawitacji przewidują również inne warianty polaryzacji.

**Przesunięcie ku czerwieni:** rozciąganie fal elektromagnetycznych lub grawitacyjnych w miarę ich przemieszczania się przez rozszerzający się Wszechświat.

**Efekty selekcji:** Detektory fal grawitacyjnych są bardziej czułe na zdarzenia o określonych własnościach (np. odpowiednie zakresy mas) i na specyficzne obszary nieba. Dlatego też wykrywamy więcej zdarzeń podobnych do siebie, niż można tego początkowo oczekiwać.

**Spin:** Wielkość fizyczna określająca jak szybko dany obiekt obraca się wokół własnej osi.