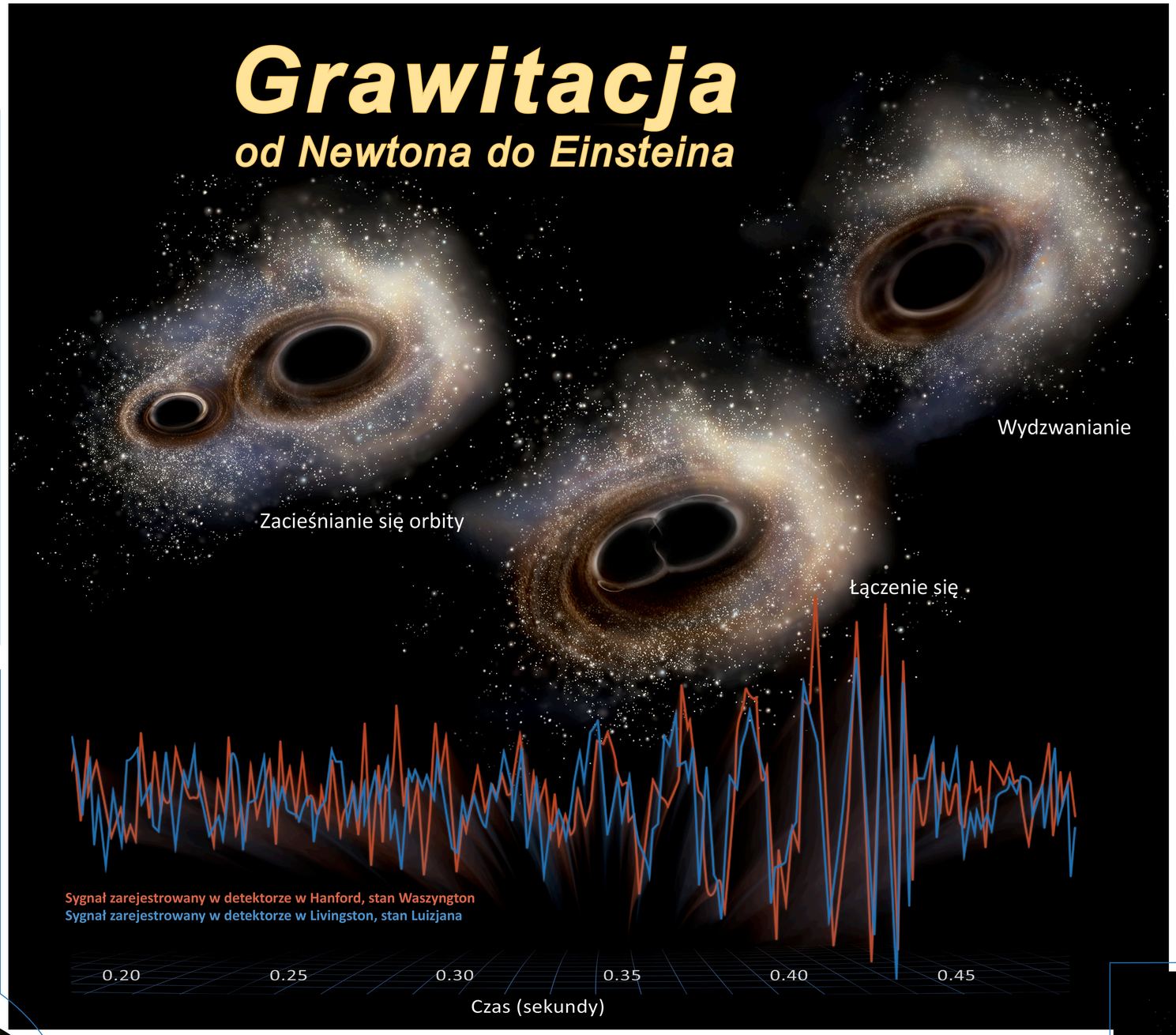
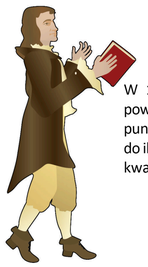
Grawitacja
od Newtona do Einsteina



Wersja polska opracowana przez zespół Virgo-POLGRAW oraz zespół popularyzacji nauki eksperymentu Virgo. By dowiedzieć się więcej, odwiedź http://public.virgo-gw.eu/language/en.

VIRGO

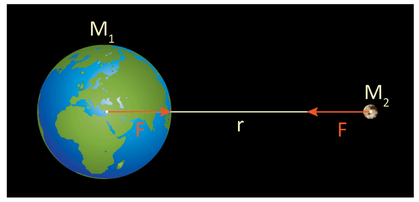
Newtonowski Opis Grawitacji



W 1687 roku Izaak Newton sformułował prawo powszechnego ciążenia. Prawo to głosi, że dwie masy punktowe przyciągają się siłą wprost proporcjonalną do iloczynu tych mas i odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości między nimi:

$$F = \frac{GM_1M_2}{r^2}$$

W równaniu występują masy przyciągających się ciał, M_1 i M_2 oraz dzieląca je odległość r. Stała proporcjonalności G nosi nazwę stałej grawitacji Newtona. Siła wzajemnego przyciągania się ciał działa wzdłuż łączącej je linii prostej.



Przełomowym odkryciem Newtona było spostrzeżenie, że to samo oddziaływanie, które sprawia, że podrzucone do góry przedmioty spadają w dół, kieruje również ruchem orbitalnym planet i innych ciał niebieskich.

Newtonowski Opis Czarnych Dziur

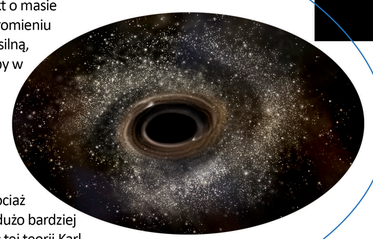
W 1783 roku angielski filozof John Michell jako pierwszy rozważał ideę „ciemnej gwiazdy" w ramach newtonowskiej grawitacji. Prędkość ucieczki (v_{esc}) jest najmniejszą prędkością, jaką powinna posiadać cząstka próbna, by pokonać przyciąganie grawitacyjne ciała o masie M i uciec do nieskończoności:

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Zauważmy, że prędkość ucieczki rośnie jak pierwiastek masy obiektu i maleje z pierwiastkiem odległości r od środka obiektu. Dla prędkości ucieczki równej prędkości światła c, ze wzoru na prędkość ucieczki dostaniemy rozmiar (R_{sch}) ciemnej gwiazdy Michella:

$$R_{Sch} = \frac{2GM}{c^2}$$

Ponieważ prędkość światła c jest największą możliwą prędkością, obiekt o masie zawartej w sferze o tym promieniu posiadałby grawitację tak silną, że nawet światło nie byłoby w stanie uciec z jego powierzchni - byłby zatem niewidoczny.



Analogiczny wynik można uzyskać w ogólnej teorii względności Einsteina, chociaż jego wyprowadzenie jest dużo bardziej skomplikowane. Używając tej teorii Karl Schwarzschild otrzymał odległość pomiędzy „punktem, z którego nie ma odwrotu" a środkiem nierotującej czarnej dziury: na jego cześć tę odległość – promień horyzontu czarnej dziury - nazywa się promieniem Schwarzschilda. Przypadkowo rozmiar newtonowskiej ciemnej gwiazdy Michella i czarnej dziury Schwarzschilda jest taki sam; jednak podczas formowania się realistycznej czarnej dziury newtonowski opis grawitacji nie jest poprawny, należy używać ogólnej teorii względności.

We gratefully acknowledge support from the National Science Foundation for some of the work done to create this poster.

Bezpośrednia Detekcja Fal Grawitacyjnych

Fale grawitacyjne zostały po raz pierwszy w historii bezpośrednio wykryte 14 września 2015 roku w eksperymencie prowadzonym wspólnie przez zespoły naukowe LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) i Virgo. Ilustracja powyżej przedstawia sygnał zarejestrowany przez dwa bliźniacze detektory LIGO, pochodzący ze zlewających się czarnych dziur w układzie podwójnym. Czerwone i niebieskie linie oznaczają zmianę w czasie amplitudy fali grawitacyjnej zarejestrowanej przez, odpowiednio, interferometry LIGO w Hanford w stanie Waszyngton i w Livingston w stanie Luizjana. Po podróży trwającej ponad miliard lat sygnał dotarł najpierw do Livingston, a po 7 milisekundach do Hanford.

Sygnały z obu detektorów wyglądają bardzo podobnie, pasują też bardzo dobrze do teoretycznych modeli ogólnej teorii względności dla zderzających się czarnych dziur w układzie podwójnym. W zaobserwowanym układzie czarne dziury mają masy równe 36 i 29 masom Słońca. Po połączeniu się dwóch czarnych dziur w jedną, emisja fal grawitacyjnych gwałtownie maleje w trakcie procesu zwanego „wydzwanianiem", w którym nowo powstała czarna dziura o masie 62 mas Słońca osiąga stan równowagi. Podczas łączenia się dwóch czarnych dziur została wyemitowana w postaci fal grawitacyjnych energia odpowiadająca 3 masom Słońca. Grafika powyżej wykresu pokazującego zmianę w czasie amplitudy fali przedstawia wizualizację układu dwóch czarnych dziur na różnych etapach ich ewolucji. Setki milionów lat przed momentem zderzenia orbita po której poruszały się czarne dziury powoli zacieśniała się w wyniku emisji fal grawitacyjnych: przedstawione dane zawierają końcowy fragment takiego ruchu, trwający około 0,15 sekundy. Najsilniejsze fale grawitacyjne są emitowane podczas samego łączenia się czarnych dziur, w czasie pomiędzy 0,35 a 0,44 sekundy od początku obserwacji. Ostatni, krótki etap wydzwaniania zaczyna się około 0,44 sekundy.

Siła grawitacji jest najsłabszym z czterech podstawowych oddziaływań znanych fizyce. Z drugiej strony w oddziaływaniach grawitacyjnych biorą udział ogromne masy, dlatego oddziaływania te mogą generować znaczne ilości energii. Maksymalna moc fal grawitacyjnych wypromieniowanych przez układ podwójny czarnych dziur była około dziesięciu razy większa od całkowitej mocy promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez wszystkie gwiazdy i galaktyki znajdujące się w obserwowalnym Wszechświecie.

Ogólna Teoria Względności Einsteina

W 1915 roku Albert Einstein ogłosił ogólną teorię względności. Według jej założeń, grawitacja nie jest siłą, a przyciąganie grawitacyjne jest własnością czasu i przestrzeni (a raczej czasoprzestrzeni - nierozerwalnego połączenia czasu i przestrzeni) związaną z obecnością masywnych obiektów. Takie obiekty zniekształcają, zakrzywiają czasoprzestrzeń wokół siebie. To, co postrzegamy jako siłę grawitacyjną jest konsekwencją ruchu w zakrzywionej czasoprzestrzeni.

Einstein opisał grawitacyjne efekty w czasoprzestrzeni używając równań, zwanych równaniami Einsteina.

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

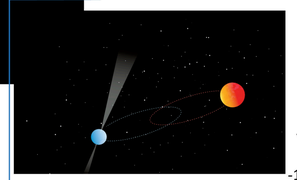
Sens równań Einsteina dobrze oddaje opis Johna Archibalda Wheelera:

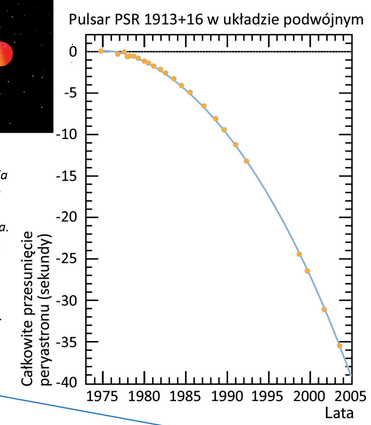
"Czasoprzestrzeń mówi materii, jak się poruszać, a materia mówi czasoprzestrzeni, jak się zakrzywiać."

W równaniach Einsteina symbol $G_{\mu\nu}$ opisuje zakrzywienie czasoprzestrzeni, podczas gdy $T_{\mu\nu}$ przedstawia rozkład mas i energii znajdujących się w czasoprzestrzeni. Te dwa czterowymiarowe obiekty są ze sobą związane poprzez stałą propocjonalności zawierającą prędkość światła c oraz stałą grawitacji Newtona G. Dla niewielkich mas równania Einsteina upraszczają się do prawa powszechnego ciążenia Newtona.

Fale Grawitacyjne

Ogólna teoria względności Einsteina przewiduje, że układ dwóch gwiazd poruszających się po orbitach wokół wspólnego środka masy będzie emitował fale grawitacyjne. Fale grawitacyjne unoszą energię z układu. W rezultacie składniki układu podwójnego powoli będą się do siebie zbliżać i w pewnym momencie zleją się w jeden obiekt. Jeśli jeden z tych obiektów emituje regularne pulsy promieniowania elektromagnetycznego (np. jest pulsarem radiowym), to okres pulsacji będzie się zmieniał podczas zacieśniania się orbity. Zjawisko to zostało po raz pierwszy zaobserwowane w układzie podwójnym odkrytym w 1974 roku przez Russella Hulse'a i Josepha Taylora. W układzie tym, znanym jako PSR 1913+16, oba składniki są zwartymi obiektami nazywanymi gwiazdami neutronowymi. Jedna z nich jest pulsarem, emitującym regularne pulsy radiowe, które wykorzystuje się do pomiarów zmiany okresu orbitalnego układu. Rysunek poniżej przedstawia wizję artystyczną układu podwójnego z pulsarem oraz wykres pokazujący zmianę orbity tego układu w czasie.





Wykres po prawej stronie przestawia zebrane w ciągu prawie 30 lat dane ilustrujące zmianę orbity pulsara w układzie podwójnym Hulse'a-Taylora. Punkty pomiarowe (pomarańczowe kropki) oddają bardzo dokładnie przewidywanie teorii Einsteina (niebieska linia). Dane opracowane przez J. M. Weisberga i J. H. Taylora.

CPEPphysics.org

©Contemporary Physics Education Project 2016