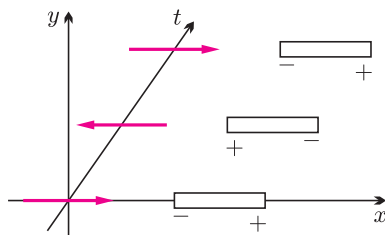


LIGO – nadzieja na detekcję fal grawitacyjnych

Tomasz KWAST

Bardzo szybko po powstaniu ogólnej teorii względności (OTW, 1915) stwierdzono, że równania pola grawitacyjnego dopuszczają istnienie fal tego pola. Wprawdzie bardzo pięknie potwierdziły się inne przewidywania OTW (ugięcie promieni świetlnych w pobliżu Słońca czy ruch peryhelium Merkurego), ale – jak to w fizyce – pojawiła się oczywista konieczność doświadczalnego sprawdzenia również tego, że fale grawitacyjne rzeczywiście istnieją. Co prawda samo istnienie fal grawitacyjnych od dawna nie budzi wątpliwości, zaobserwowano bowiem wspaniałą zgodność OTW z obserwacjami dowodzącymi utraty energii przez podwójnego pulsara PSR 1913+16, co skomentujemy niżej (a co w *Delcie* zostało opisane już dziesięć lat temu: T. Jarzębowski – *Delta* 5/1994). Przypomnijmy, że ten układ dwu gwiazd neutronowych odkryli metodami radioastronomicznymi Russell Hulse i Joseph Taylor w 1974 r., za co później dostali Nagrodę Nobla.

Fale elektromagnetyczne powstają w wyniku drgań ładunków elektrycznych, a ich detekcja polega na zaobserwowaniu drgań ładunków wywołanych w antenie przez przejście fali elektromagnetycznej. W najprostszym przypadku anteną nadawczą może być zwyczajny przewodzący pręt (dipol), jeżeli wymusić w nim okresowe przesuwanie się ładunków (wprawdzie tylko ujemnych, bo one są swobodne, ale to wystarcza) z jednego jego końca w drugi. Wygląda to, jakby na końcach dipola powstawały na przemian ładunki dodatnie i ujemne, a generowane w ten sposób pole elektromagnetyczne nazywa się promieniowaniem dipolowym (rys. 1).

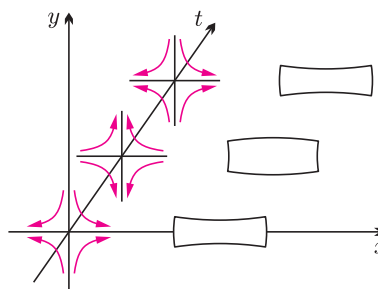


Rys. 1. Rozchodzenie się najprostszego promieniowania dipolowego (elektromagnetycznego) i odpowiadająca mu reakcja anteny.

Detekcja fali elektromagnetycznej polega na odwróceniu ról: tu fala powoduje przesuwanie się ładunków w dipolu i to właśnie należy zarejestrować.

Można domyślać się, zresztą słusznie, że fale grawitacyjne powstają analogicznie wskutek drgań mas i układów mas, a zaobserwować je można by również w zjawisku odwrotnym, czyli stwierdziwszy drgania jakichś „anten grawitacyjnych”, spowodowane przejściem fali. Realizacja takiego eksperymentu okazała się bardzo trudna. Pionierem badań był Joseph Weber z University of Maryland w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Jego antenami były kilkutonowe walce aluminiowe, które podobno od czasu do czasu drgały. Niestety, doświadczenia te, prowadzone przez innych badaczy nawet do dziś, nie dawały jednoznacznych wyników.

Fala grawitacyjna ma jednak inny charakter niż elektromagnetyczna. Przede wszystkim jest to rozchodzące się w przestrzeni, dokładniej – w czasoprzestrzeni, zaburzenie samej jej struktury. Po drugie, o ile ładunki elektryczne są dodatnie i ujemne, to masy są przecież tylko dodatnie. Teoria mówi, że pod wpływem fali grawitacyjnej antena Webera powinna być w jednym kierunku ściskana, a w prostopadłym do niego rozciągana – i tak na zmianę. Wygląda to, jakby blok metalu był okresowo od dwóch biegunów odpychany i do dwóch innych biegunów przyciągany. Dlatego mówimy, że promieniowanie grawitacyjne jest promieniowaniem kwadrupolowym (rys. 2).



Rys. 2. Rozchodzenie się najprostszego promieniowania kwadrupolowego, np. grawitacyjnego i odpowiadająca mu reakcja anteny Webera.

Łatwo zgadnąć, że anteny Webera reagowały (jeśli w ogóle) na fale grawitacyjne o częstości swoich własnych drgań mechanicznych, rezonansowych. Były więc antenami wąskopasmowymi, a przez to zdolnymi zarejestrować zapewne niektóre tylko zjawiska sygnalizowane przez promieniowanie grawitacyjne.

Tu warto przypomnieć, z jakim strumieniem energii można w ogóle mieć do czynienia w przypadku fal grawitacyjnych. We Wszechświecie są dwa najważniejsze typy źródeł tego promieniowania: układ obiegających się dwóch mas oraz wirująca masa niemająca symetrii obrotowej.

Dla pierwszego przypadku teoria przewiduje, że moc emitowana przez takie źródło (dla orbit kołowych) wynosi

$$L = \frac{32}{5} G^4 \left(\frac{M}{ac} \right)^5 x^2,$$

gdzie G oznacza stałą grawitacji, M – masę większą, x – stosunek masy mniejszej do większej, a – promień względnej orbity, c – prędkość światła. Na przykład, układ Słońce-Jowisz emituje energię grawitacyjną z mocą rzędu 50 W, Syriusz A z towarzyszącym mu białym karłem, czyli Syriuszem B, promieniuje w przybliżeniu 100 MW, ale dwie gwiazdy neutronowe o masach słonecznych, obiegające się w tempie trzech obiegów na sekundę, stanowią już źródło o mocy 3×10^{39} W.

W drugim przypadku moc promieniowania grawitacyjnego obiektu w przybliżeniu elipsoidalnego określa wzór

$$L = \frac{8}{5} \frac{G}{c^5} I^2 e^4 \omega^6,$$

gdzie I oznacza moment bezwładności obiektu względem osi obrotu, e – mimośród jego równika, ω – jego prędkość kątową. Moc grawitacyjnego promieniowania pulsara w mgławicy Krab szacowana jest na 2×10^{30} W. Niektóre podane tu liczby wyglądają poważnie, ale wszystkie te źródła są daleko, a skoro strumień energii maleje odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości, na Ziemi mamy do czynienia z energiami doprawdy znikomymi.

Wobec tego można by spróbować rejestrować nie energię niesioną przez fale grawitacyjne, tylko same powodowane przez nie zaburzenia geometrii czasoprzestrzeni. Należy więc umieć zarejestrować drobne zmiany rozmiarów czegokolwiek w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach, przy czym zmiany te powinny zachodzić w przeciwnych fazach. Stosowny przyrząd pomiarowy znany jest od ponad stu lat, a jest nim zasłużony interferometr Michelsona. Właściwie jako jego powiększenie powstał w 2000 roku interferometr LIGO – tj. *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*. (Jego zapowiedź jest w *Patrz w niebo – Delta 2/1998*.) Urządzeń takich jest już kilka. Największe dwa znajdują się w Hanford (Washington) i Livingston (Louisiana) w USA. W każdym z nich laserowa wiązka światła dzielona jest na dwa wzajemnie prostopadłe promienie, które biegną czterokilometrowymi tunelami i po odbiciu się od lusterek spotykają się znowu na skrzyżowaniu tuneli. W miejscu spotkania promienie interferują, wygaszając się. Każda zmiana długości jednego tunelu, której towarzyszyłaby przeciwna co do znaku zmiana długości drugiego tunelu, powinna zostać wykryta jako niepełne wygaszenie się interferujących promieni. Dla zwiększenia czułości promienie w tunelach są wielokrotnie odbijane w obie strony (aby droga światła była dłuższa), ale nie zmienia to zasady detekcji. Rzecz jasna, w tunelach panuje próżnia, laser jest maksymalnie chłodzony

(dla uzyskania najlepszej monochromatyczności światła), lustra są supergładkie i jak najdokładniej odizolowane od wszelkich możliwych drgań gruntu. Tak więc stworzenie takiej aparatury, choć zasada jej działania jest opisana w każdym podręczniku fizyki, jest poważnym problemem technologicznym. Zauważmy, że taki detektor praktycznie nie ma żadnych drgań własnych, może więc reagować na fale grawitacyjne o bardzo różnych częstościach, czyli stanowi grawitacyjną antenę szerokopasmową. Mniejsze detektory, ale działające na tej samej zasadzie, buduje się we Włoszech, w Niemczech i w Japonii (ten już działa). Chodzi o to, że pewność zarejestrowania fal grawitacyjnych będzie tym większa, im więcej detektorów zadziała jednocześnie (oczywiście z dokładnością do opóźnienia określonego przez skończony czas przelotu fali z prędkością światła między detektorami).

Bezpośrednie zaobserwowanie promieniowania grawitacyjnego podwójnego pulsara PSR 1913+16 jest nadal niemożliwe. Gwiazdy składowe tego obiektu obiegają się teraz w okresie ponad 7 godzin, zatem emisja promieniowania jest bardzo słaba. Co prawda powoduje ona, że orbity składników zacieśniają się o 3,5 m rocznie, a okres obiegu maleje o 0,1 ms rocznie, tak że za – powiedzmy – ćwierć miliarda lat częstość i amplituda fal grawitacyjnych tego układu wzrosną do wartości wyczuwalnych przez LIGO. Oczywiście nie w tym rzecz, można jednak mieć nadzieję, że obecnie jakiś inny układ podwójny gwiazd neutronowych zbliża się do katastrofy, czyli do złania się dwu gwiazd w jedną. Ocenia się, że takich zjawisk powinno się obserwować średnio jedno na rok. Szybko rotujących gwiazd neutronowych jest w samej naszej Galaktyce pod dostatkiem, problem tylko w tym, czy nie są one zbyt symetryczne osiowo. W dodatku powstaniu każdej takiej gwiazdy w wyniku zapaści jądra supernowej również powinien towarzyszyć „błysk” promieniowania grawitacyjnego – o ile zapaść nastąpiłaby nie całkiem symetrycznie.

Nie ma jeszcze żadnych wyników obserwacji wykonanych przez LIGO, jego praca dopiero się zaczyna, a tymczasem planowane jest już obserwatorium grawitacyjne nowej generacji. ESA i NASA na rok 2010 przewidują uruchomienie kosmicznego detektora fal grawitacyjnych LISA, od *Laser Interferometer Space Antenna*. Ma to być trójka sztucznych satelitów tworzących równoboczny trójkąt o bokach 5 mln km, którego środek biegłby 50 mln km za Ziemią po jej okołosłonecznej orbicie. Podobnie jak w przypadku LIGO, laserowe interferometry mierzyłyby fluktuacje wzajemnych odległości satelitów, co przekładałoby się na informacje o promieniowaniu grawitacyjnym. Według twórców projektu LISA byłyby mniej więcej tak samo czuły jak LIGO, ale na fale o okresie od sekund do godzin, który to zakres jest dla LIGO zupełnie niedostępny. Oby tylko nie zabrakło funduszy.