

Rys. 1. Symulacja komputerowa zderzenia dwóch czarnych dziur. Kolor wyrażałyby fale grawitacyjne zarejestrowaną 14 września 2015 roku [9]

Grzegorz Karwasz

## Długie czekanie

Czekano na tę falę pięćdziesiąt, a właściwie sto lat. Gdy w listopadzie zeszłego roku świętowaliśmy stałecie ogólnej teorii względności Einsteina, tysiąc osób na świecie już o niej wiedziało, ale informację tę ukryto tak głęboko, że można powiedzieć, iż znalazła się w czarnej dziurze. A to od czarnej dziury, a raczej dwóch, ta fala grawitacyjna nadeszła.

Fala nadeszła 14 września. Siedem minut przed południem młody naukowiec w Hanowerze Marco Drago (go włosku „smek”) otrzymał automatyczny e-mail z amerykańskiego laboratorium LIGO<sup>1</sup>. Do listu był dołączony wykres – jakby drgania struny (jak pisze „Nature” [1] – świergot ptaka). Ponieważ od czasu do czasu, dla sprawdzenia czujności współpracowników, wpuszczano do sieci udławiane sygnały, Marco spytał najpierw kolegów, a później szefa, kto ma zrobić głupi żart. Gdy winny się nie znalazł, zapytał e-mailowo kolegów w Ameryce. Zanim nastąpił w USA świt i naukowcy odczytali pocztę, minęło parę godzin. A później rozpętała się internetowa burza: wszyscy pisali do wszystkich i najtrudniej było utrzymać informa-

cję w tajemnicy. Nawet żona potencjalnego noblisty nie dowiedziała się o odkryciu.

Dopiero 11 lutego 2016 roku, po przyjęciu do druku artykułu [2], na wspólnej konferencji prasowej w USA i we Włoszech zadrukali cały świat: przeszła przez nas fala grawitacyjna, ale nikt tego nie poczuł.

## Małe drganie

Drganie było rzeczywiście małe. Do detekcji fali użyto dwóch rur ułożonych prostopadle do siebie, a w każdej z nich były po dwa zwierciadła dla wiązki lasera. 14 września zwierciadła w jednej z tych rur, zawieszane w odległości 4 km, przesunęły się o odległość mniejszą niż średnica protonu (która, według niedawnych badań, wynosi około  $1,7 \cdot 10^{-16}$  m). A dokładniej – taka była różnica zmiany długości w dwóch prostopadłych kierunkach.

Fala najpierw została zarejestrowana na południowo-wschodnim krańcu USA (w Livingston), a 7 ms później na północno-zachodnim (w Hanford). Wniosek: fale grawitacyjne, zgodnie z przewidywaniami Einsteina, podróżują z prędkością światła i podobnie jak fale elektromagnetyczne są falami poprzecznymi. Cały impuls trwał ułamek

sekundy – częstotliwość fali wzrosła w ciągu 0,2 s od 30 Hz do 150 Hz, po czym fala nagle zmikła, jakby jej źródło zapadło się do czarnej dziury.

## Czy istnieją czarne dziury?

Kilka lat temu na posiedzeniu naukowym w Brukseli zapytałem kolegów specjalistów, ile jest we Wszechświecie czarnych dziur, a właściwie ile z nich zaobserwowaliśmy. Najpierw powiedzieli, że „w środku każdej galaktyki powinna być masywna czarna dziura”. Później usłyszałem o znanym od dawna układzie podwójnym Cygnus X-1 w gwiazdozbiórze Łabędzia, gdzie widoczna gwiazda (niebieski gigant HDE 226868) wyraźnie taci masę. Potem o dziurze w galaktyce 1H 0707-495, która świeci liniami widmowymi żelaza. A na poważne pytanie: „Ale naprawdę to ile?”, kolega odpowiedział po angielsku: „A dozen”, czyli tuzin. Oj, mało...

W czarne dziury nie wierzył nawet Einstein, mimo że ich istnienie wynika z ogólnej teorii względności. Schwarzschild, który ten wynik uzyskał w 1916 roku, zginął niestety w czasie I wojny światowej i nie mógł z Einsteinem polemizować. Mówiąc obrazowo, grawitacja wewnątrz czarnej dziury jest tak silna, że nie może z niej uciec nawet jeden foton.

<sup>1</sup> Light Interference Gravitational-Waves Observatory.

matematyki mówią o „osobliwości” czasoprzestrzeni na jej brzegu, a fizycy teoretycy o granicy „horyzontu zdarzeń”. Innymi słowy – zobaczyć czarną dziurę, tzn. określić jej cechy, wydawało się dość beznadziejnym zadaniem.

Tymczasem czarne dziury mogą być we Wszechświecie całkiem powszechne – powstają z gwiazd wcale nie tak dużo cięższych od Słońca. Kosmologowie twierdzą też, że czarnych minidziur było na początku historii Wszechświata sporo, ale szybko „wyparowały”. Fala zarejestrowana 14 września pochodziła ze zderzenia (a właściwie połączenia) dwóch czarnych dziur średniego kalibru – o masie 29 i 36 mas Słońca (z błędem około 4 mas Słońca).

### Szczęśliwy traf?

O istnieniu fal grawitacyjnych wiemy od dawna. Co więcej, mamy nawet niepodważalny dowód w postaci danych doświadczalnych – astronomicznych, za które naukowcy otrzymali Nagrodę Nobla. Dostali ją w 1993 roku Joseph Taylor i Russell Hulse za lata pracownitw obserwacji układu dwóch gwiazd neutronowych. Gwiazdy neutronowe, złożone z bardzo ciężkiej materii (gdyby Słońce zostało gwiazdą neutronową, skurczyłoby się z 1,3 mln km do 9 km), pomijamy po cichych i bardzo krótkich (mili-sekundowych) impulsach radiowych, które odbieramy, kiedy biegną gwiazdy celuje w kierunku Ziemi.

Systematyczne obserwacje układu dwóch gwiazd neutronowych – pal-

sara PSR B1913+16 – pokazały, że częstotliwość wzajemnego okazywania się tych gwiazd zmniejszała się o 10 sekund w ciągu 15 lat. Nie ma innego wytłumaczenia na to spowolnienie niż utrata energii (i momentu pędu) poprzez emisję fal grawitacyjnych.

Tak więc anteny zostały nastawione na poszukiwanie zderzeń gwiazd neutronowych: nieco lżejszych od czarnych dziur, a zatem prawdopodobnie bardziej pospolitych. Ale i sygnał od nich jest słabszy – zasięg anteny mniejszy. Pierwsza wersja LIGO pozwalała na śledzenie zderzeń gwiazd neutronowych tylko w najbliższych nam galaktykach, czyli do 64 mln lat świetlnych (widoczna gołym okiem Mgławica Andromedy jest od nas oddalona o 2,5 mln lat świetlnych). Przez osiem lat nasłuchiwania nie zarejestrowano żadnego sygnału.

Nowa wersja anteny, działająca od 12 września zeszłego roku, ma zasięg trzykrotnie większy, czyli „przesiewa” 27 razy większą objętość Kosmosu. Sygnał z 14 września nadzedł z odległości 1,3 mld lat świetlnych: antena sięga do 1/10 dostępnej nam granicy Wszechświata (wiek Wszechświata, a poprzez skróconą prędkość światła – horyzont światła nam dostępnego, to 13,8 mld lat świetlnych).

Czy kolizja czarnych dziur to szczęśliwy traf? Oszacowania teoretyków (zob. [2]) są bardzo niedokładne: od 2 do 400 zderzeń na rok w objętości 1 gigaparseka<sup>3</sup>. Objętość kuli o promieniu 1,3 mld lat świetlnych to 0,1 (Gpc)<sup>3</sup>; jeśli zderzeń

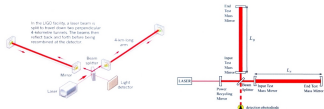
jest 20(Gpc)<sup>3</sup>/yr, to następne LIGO zarejestruje, statystycznie, za 5 lat. Na razie żadnej nowej kolizji nie zaobserwowano.

### Sukces leży w szczegółach

Pomysł na pomiar fal grawitacyjnych rzucił Joseph Weber jeszcze w 1961 roku. Za jego sugestią w kilku laboratoriach rozpoczęto budowę anten. Były to bloki aluminium tak pomysłane, aby wpadły w rezonans, gdy nadejdzie fala o częstotliwości 1 kHz – podobnie zresztą! Bloki zawieszano na specjalnych uchwytych w wysokiej próżni i schładzano ciekłym heliem do 4 K. A fali jak nie było, tak nie ma...

Sukces w nauce osiąga się, gdy niezwykle precyzyjne doświadczenie porówna się z przewidywaniami teoretycznymi. Tak zrobił Abraham Michelson ze Strzelca, gdy w 1887 roku dzięki interferencji dwóch prostopadłych wiązek światła (nie miał lasera!) stwierdził z dokładnością do 10% pródkości orbitalnej Ziemi (czyli 30 km/s), że wiatru eteru nie ma. Jego spektrometr, zamontowany na solidnym kawałku skały dla amortyzacji drgań, pływiał w jeziorze Itasca. Dokładnie tego typu spektrometr użyto w LIGO, tylko że o ramionach długości 4 km, a w zasadzie jeszcze więcej.

To „więcej” oznacza, że dwa promienie światła przed ich interferencyjnym porównaniem odbywały się 300 razy między zwierciadłami (to tzn. konfiguracja spektrometru Fabry’ego-Pérot’a). Dokładność eksperymentu to względna różnica dla-

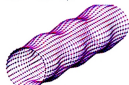


Rys. 2. Schemat układu detekcji fal grawitacyjnych za pomocą interferencji dwóch prostopadłych wiązek laserowych (układ spektrometru Michelsona). Własność o długości 4 km i średnicy 1,2 m parę wysokości próżni, o tenetie lasera odbywa się 300 razy przed pomiarowym skrzyżowaniem obu wiązek.

Źródło: <http://www.nature.com/news/turn-for-gravitational-wave-to-resume-after-massive-upgrade-1.10329> [dostęp: 26-02-2016]; 1.3895465 fig



Rys. 3. Do wytworzenia fali grawitacyjnej niezbędny jest zmienny moment kwadrupolowy, który w skróconym ujęciu wygląda tak: Wygląda to, jakby fala grawitacyjna o dużej energii powstała w zderzeniu dwóch deformacji czarnych dziur i gwałtowniejszych



Rys. 4. Fala grawitacyjna to rozciąganie i ściąganie przestrzeni, jak tej siatki na celulę. Źródło: <http://www.universetoday.com/127255/gravitational-waves-101> [dotyga: 29.02.2016]

gości dwóch ramion  $10^{-21}$ , absolutnie najdokładniejszy pomiar w fizyce, mimo że porównawczy. To tak, jakby zmierzyć odległość do krawca Układu Słonecznego (jakieś 100 tys. lat świetlnych) z dokładnością do 1 m! Pomiar pozwolił też ustalić górny granicę na masę hipotetycznych cząstek pola grawitacyjnego – grawitonów (spin = 2) na  $< 1,2 \cdot 10^{-22}$  eV/c<sup>2</sup> (masa elektronu to 511 keV/c<sup>2</sup>).

Sukces to wynik wielu bardzo różnych i pozornie niesumownych prac. Jedni badacze szukali nowych efektów na bazie stabilnej i termicznie stabilnej zwierciadła, inni za pomocą silnych przemysłowych laserów na CO<sub>2</sub> wyciągali długie własy ze stopionego kwarcu, inni z węglika wolframu budowali specjalne podstawniki, budowali układy elektroniczne stabilizacji laserów i usuwania tła od drgań, jeszcze inni – specjalne trójstopniowe zawieszania zwierciadeł. Detektor LIGO został zaprojektowany [3] tak, aby wykazać czułość  $10^{-20}$  dla częstotliwości 50–200 Hz. I taka fala nadeszła. Szczęście sprzyja odwrotnie!

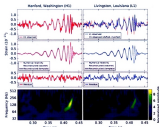
# GW14092015

Takim numerem, oczywiście, oznaczono pierwszą w historii nauki falę grawitacyjną. Początek rejestracji sygnału pochodził z chwili, gdy dwie czarne dziury były już bardzo blisko siebie. Sama ich prędkość przed zderzeniem to nieco więcej niż 210 km, a gdy fala miała czę-

stotliwość 75 Hz, zgnęwały się one w odległości zaledwie około 350 km [2]. Krążyły przy tym wokół siebie jak szalone (0,3 prędkości światła). Wykonały jeszcze doświadczenie obrotu, po czym sygnał zniknął – powstała jedna większa dziura.

Detekcji fali dokonali fizycy doświadczalni, ale rozszyfrowanie wiązanych czarnych dziur zawodzący teoretykom – specjalistom w nicozwykle trudnej matematyce materii, jaką jest ogólna teoria względności, i współczesnym, potężnym komputerom. To one pozwoliły na wyliczenie masy, promieni, wzajemnej odległości, prędkości i kierunku wirowania obu czarnych dziur oraz wypromieniowania poprzez fale grawitacyjne energii (równiej 3 masom Słońca, w ciągu słabka sekundy!). Tych kilka miesięcy między pomiarem a ogłoszeniem odkrycia fizycy doświadczalni wykorzystali na wykluczenie możliwego błędu spowodowanego choćby przebiegiem trawaju w sąsiednim miasteczku, a teoretycy – sprawdzeniem 250 tys. konfiguracji zderzających się czarnych dziur. Wybrany model w 94% pokrywa się z pomiarem. Rozpoczęła się nowa era w badaniach najdalszego (i najstarszego) Kosmosu [4].

Dlaczego tak trudno było znaleźć tę falę? W odróżnieniu od fal elektromagnetycznych, których źródłem może być nawet przypuszczający ładunek punktowy, dla wytworzenia fali gra-



Rys. 5. Sygnał fali grawitacyjnej: najdłuższy panel – rejestracja fali w Hanford i Livingston (na tym rysunku porównanie dwóch sygnałów przesuniętych o 7 ms); drugi panel – porównanie obliczeń z opłynie teorii względności z pomierzonym modelem fali (nie) – różnice między doświadczeniem a teorią; najdłuższy panel – amplituda czystości sygnału w ciągu 0,2 s – rejestracji Źródło: [2]

witacyjnej musi zmieniać się rozkład masy, opisywany przez tzw. moment kwadrupolowy. Cały Układ Słoneczny z krążącymi (powoli) ciałkami Jowiszem i Saturnem emituje w postaci fali grawitacyjnych tylko 5 kW mocy: a więc tyle, ile byle piecyk w domu.

Musimy więc czekać na kolejne zderzenie czarnych dziur. I chyba dlatego na razie, pół roku od GW14092015, o nowej fali grawitacyjnej nie wiadomo.

PS. Francesco-włoski detektor Virgo był 14 września w przerwie. Z kolei detektor angielsko-niemiecki GEO 600 nie ma odpowiedniej czułości. Interferometry umieszczone na satelitach (LISA), który ma wychwytywać fale o długościach setek kilometrów, na razie jest jedynie w planach.

Gregorz Karwan

Zakład Fizyki Ryki Uniwersytetu Mikolaja Kopernika w Toruniu

## LITERATURA

- [1] Abbott B.P. et al., Gravitational waves: First LIGO detection, *Nature* 2006, Vol. 439, s. 296–298, <http://www.nature.com/news/gravitational-waves-first-ligo-detection-the-path-to-history.1.18352> [dotyga: 29.02.2016].
- [2] Abbott B.P. et al., Observation of gravitational waves from a binary black hole merger, *Physical Review Letters* 2016, Vol. 116, 061102.
- [3] Barack B.L., Will C.M., *LIGO and the detection of gravitational waves*, *Physics Today* 1999, Vol. 52, s. 44–50.
- [4] Hock E., *Presenting the first results of merging black holes*, *American Physical Society*, <https://physics.aps.org/topics/bh1517> [dotyga: 29.02.2016].

# FIZYKA

w Szkole z Astronomią

Wydawnictwo Naukowe PWN

Wydawnictwo Naukowe PWN

Gorączka  
**nanozłota**

Nieważkość  
a siła bezwładności

Fala  
z grawitacyjnej  
otchłani

Fizyka  
a  
klimat

Najważniejsze na świecie  
**OBSERWATORIA**  
astronomiczne

