

FALE GRAWITACYJNE – PRZEŁOM W ASTRONOMII I BADANIU WSZECHŚWIATA

Katarzyna Kaczorowska¹

1. WSTĘP

Zaobserwowanie fal grawitacyjnych jest jednym z najważniejszych odkryć współczesnej nauki. Przewidziane przez Einsteina i wyczekiwane przez około 100 lat nareszcie stało się rzeczywistością. Fale są wszechobecne, jednak bez odpowiedniego sprzętu niemożliwe do zarejestrowania. Jak powstają? Co je powoduje? Czy przenoszą jakąś energię? Jakie korzyści ludzkość może czerpać z ich istnienia? Te i wiele innych pytań zadawano sobie podczas badań. Na niektóre już znaleziono odpowiedzi, inne nadal pozostają zagadką. Nie ma jednak wątpliwości, że jest to odkrycie, które w znacznym stopniu zmienia dotychczasowe rozumienie wszechświata.

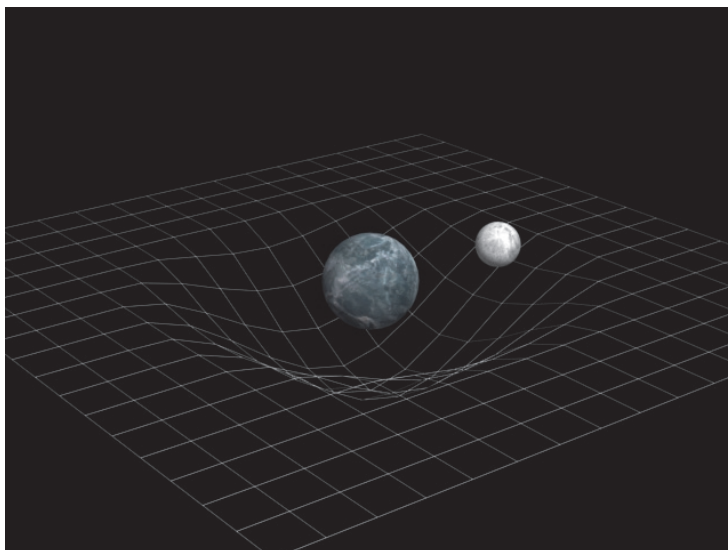
2. OGÓLNA TEORIA WZGLĘDNOŚCI EINSTEINA

W 1916 roku Albert Einstein opublikował ogólną teorię względności, tzw. teorię grawitacji. Mówi ona o tym, że grawitacja ma charakter geometryczny i jest zakrzywieniem czasoprzestrzeni, które z kolei jest wywołane przez zniekształcającą czasoprzestrzeń masę. Aby łatwiej zrozumieć to zjawisko, zamiast czterowymiarowej przestrzeni (trzy wymiary i czas) można analogicznie mówić o drugim wymiarze. Niech na mocno napiętej membranie zostanie położona kula o dużej masie. Pod jej ciężarem materiał ugnie się, a przedmioty leżące w pobliżu kuli zostaną do niej „przyciągnięte” (rys. 1). Mówiąc krótko, według Einsteina grawitacja nie jest siłą, jak twierdził Newton, lecz zakrzywieniem czasoprzestrzeni.

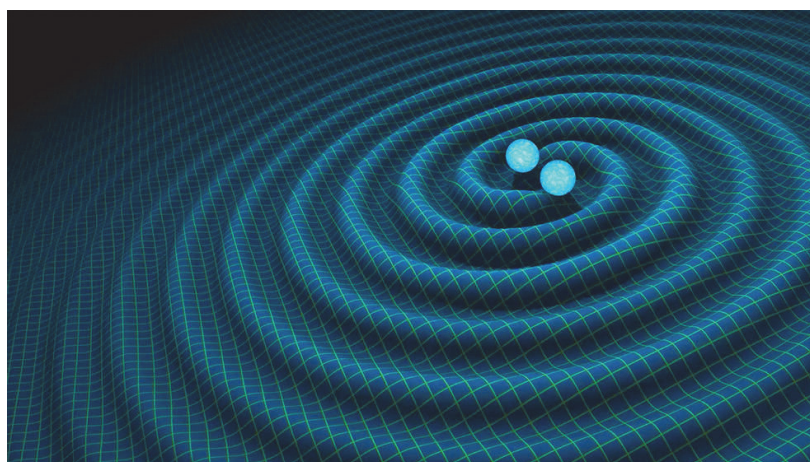
Fale grawitacyjne (nazywane również zmarszczkami czasoprzestrzeni) można wyobrazić sobie w podobny sposób. Gdy na takim samym materiale zaczniemy obracać dwiema kulami wokół wspólnego środka masy, to drgania, które te ruchy spowodują, będą falami grawitacyjnymi (rys. 2).

Łatwiej będzie wyobrazić je sobie jako okręgi rozchodzące się na wodzie po wrzuceniu do niej kamienia. Jeśli na jej powierzchni unosiłyby się plamy oleju, to podczas przejścia przez nie fali plamy będą zmieniać odległości między sobą, a także zmieniać swój kształt (rozciągać się i kurczyć). Tak samo jak fale grawitacyjne, które podczas przemieszczania się z prędkością światła przenikają przez różne obiekty, deformując je. Fale grawitacyjne emitowane są przez poruszające się w przestrzeni z dużą prędkością obiekty lub wydarzenia wyzwalamy ogromną energię, jak np. zlewianie się czarnych dziur lub gwiazd neutronowych czy wybuchy supernowych. Ziemia jest cały czas poddawana zniekształcaniu przez fale grawitacyjne, jednak są one tak słabe, że nie da się tego w żaden sposób odczuć. Dopiero obecny rozwój nauki i technologii pozwolił na doświadczalne potwierdzenie ich występowania.

¹ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: trus.kasia@gmail.com



Rys. 1. Ilustracja wizualizująca zakrzywienie czasoprzestrzeni – ruch mniejszego ciała spowodowany jest nierównością powierzchni wywołaną przez ciało większe. Podobnie jest w czwartym wymiarze, obiekty przyciągane są do siebie nie przez siłę, lecz zakrzywienie czasoprzestrzeni [<http://www.mira.be/node/2231>]



Rys. 2. Ilustracja fal grawitacyjnych – drgania wywołane na membranie są analogiczne do drgań wywołanych przez zmarszczki czasoprzestrzeni [<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/nsf-s-ligo-has-detected-gravitational-waves>]

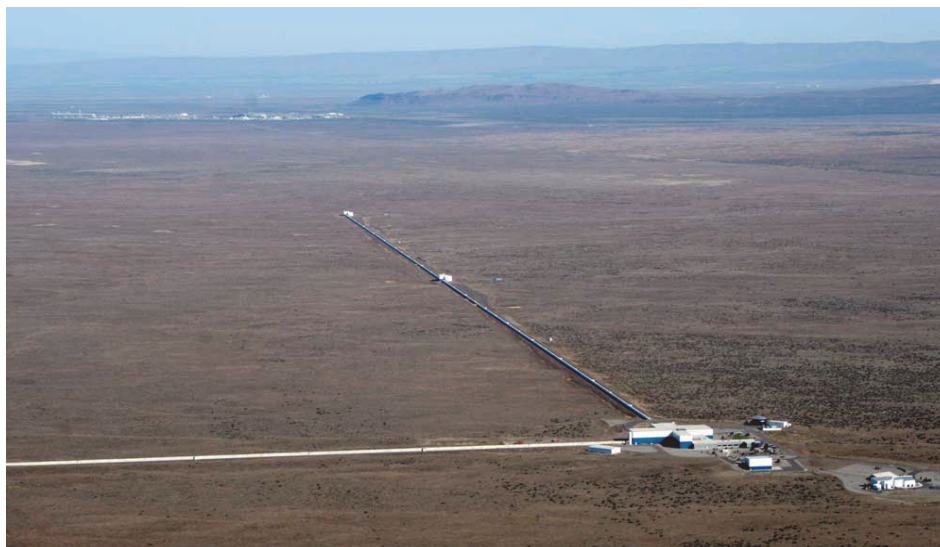
Dzięki temu powstała nowa dziedzina nauki: astronomia fal grawitacyjnych. Dotychczas można było korzystać z urządzeń, które pozyskują informacje z kosmosu za pomocą promieniowania elektromagnetycznego. Wraz z rejestracją fal grawitacyjnych zyskano możliwość korzystania z nowego rodzaju promieniowania: promieniowania grawitacyjnego. Jest to taki rodzaj promieniowania, który może dostarczyć informacji, jakich za pomocą żadnych znanych dotychczas metod nie można było uzyskać. Detek-

cja fal grawitacyjnych umożliwia analizę obiektów, które nie wytwarzają promieniowania elektromagnetycznego („nie świecą”), badanie wnętrza gwiazd neutronowych czy nawet zdobycie większej ilości informacji na temat czarnych dziur. Fale grawitacyjne są narzędziem do bardzo dokładnego badania kosmosu, gdyż bardzo słabo oddziałują z materią. Można powiedzieć, że wszechświat jest dla nich „przezroczysty”. Z odległością maleje tylko ich natężenie, natomiast sam sygnał pozostaje niezmienny.

„Mamy teraz bezpośredni dowód na to, że czasoprzestrzeń istnieje i dynamicznie się zmienia” – powiedział w wywiadzie dla Gazety Wyborczej profesor Michał Berger z Centrum Astronomicznego im. M. Kopernika PAN w Warszawie – „Nie jest – jak u Newtona – nieruchomą i nienaruszalną sceną, na której się tylko rozgrywają różne zjawiska. Sama bierze udział w tym, co się dzieje” [<http://www.wyborcza.pl/1,75400,19613683,dzieki-detektorowi-ligo-po-raz-pierwszy-zarejestrowalismy.html>].

3. LIGO – JAK REJESTRUJE SIĘ FALE GRAWITACYJNE?

LIGO – *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* – powszechnie nazywane obserwatorium, jest prowadzonym na ogromną skalę eksperymentem polegającym na próbie rejestracji fal grawitacyjnych za pomocą niezwykle dokładnych detektorów. W Stanach Zjednoczonych znajdują się dwa bliźniacze obserwatoria LIGO. Jedno z nich w stanie Waszyngton (rys. 3), a drugie w stanie Luizjana (rys. 4). W Europie również jest podobny detektor – VIRGO (rys. 5). Wybudowany został niedaleko Pizy we Włoszech.



Rys. 3. Obserwatorium LIGO w stanie Waszyngton [<http://spaceplace.nasa.gov/ligo-g-waves/en/>]



Rys. 4. Obserwatorium w stanie Luizjana
[\[https://www.ligo.caltech.edu/LA/page/observatories-collaborations\]](https://www.ligo.caltech.edu/LA/page/observatories-collaborations)



Rys. 5. Obserwatorium Virgo [\[http://www.media.inaf.it/2016/02/11/ligo-how-it-works/\]](http://www.media.inaf.it/2016/02/11/ligo-how-it-works/)

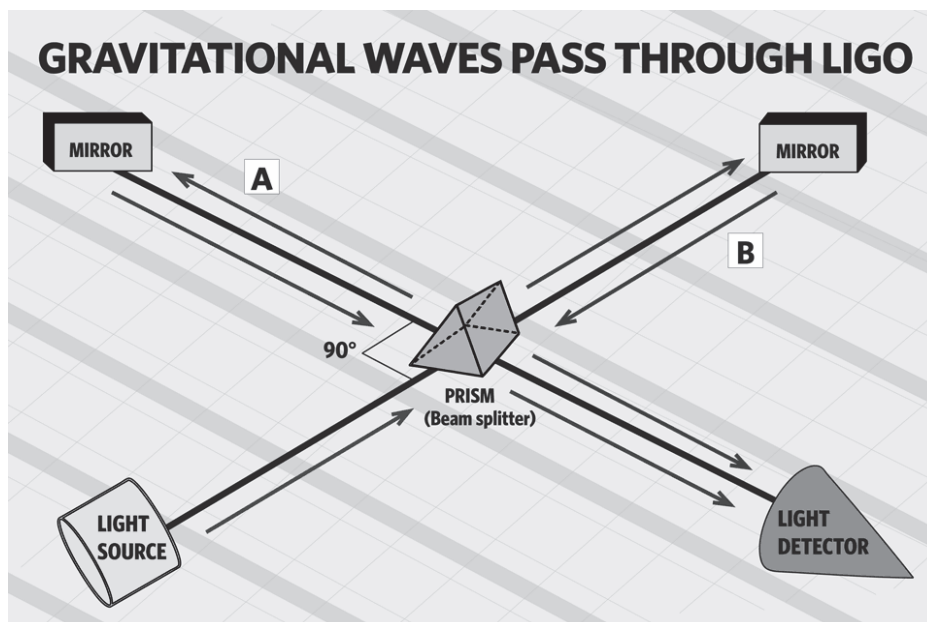
3.1. Historia budowy

Pierwsza wersja detektora nazywana jest iLIGO („Initial LIGO”). Jego budowę rozpoczęto w 1990 roku. Pierwsze próby odnalezienia fal grawitacyjnych rozpoczęły się w 2001 roku i trwały aż do roku 2010, jednak zakończono je bez satysfakcjonujących rezultatów, gdyż fal grawitacyjnych nie udało się zarejestrować. Z jednej strony było to dość duże rozczarowanie, z drugiej – doświadczenie nabyte w tym czasie pozwoliło naukowcom zdobyć wiedzę konieczną do dalszej pracy z najbardziej precyzyjnym urządzeniem na Ziemi. Lata badań pokazały, że urządzenie wymaga zmian. Budowę nowego detektora zainicjowano w 2008 roku i trwała ona do 2015 roku. Nowy model maszyny nosi nazwę aLIGO („Advanced LIGO”). Po przebudowie interferometr LIGO stał się 10 razy bardziej czuły. To bardzo dużo, gdyż 10-krotnie większy zasięg daje możliwość badania 1000-krotnie większej objętości kosmosu. Kilka dni po rozpoczęciu kolejnych badań osiągnięto założony cel: po raz pierwszy zarejestrowano fale grawitacyjne [\[https://www.ligo.caltech.edu/page/about-aligo\]](https://www.ligo.caltech.edu/page/about-aligo).

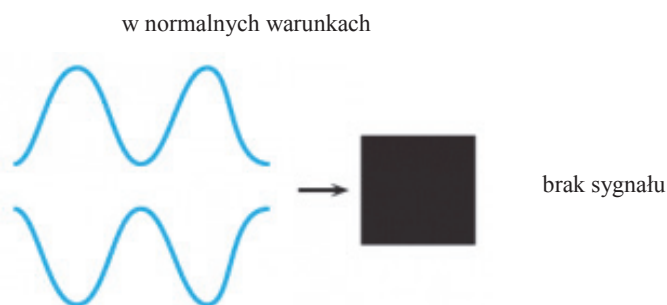
3.2. Jak działa LIGO?

Jest to urządzenie niezwykle czułe. Z wyglądu przypomina ogromną literę L, której ramiona mają 4 km długości i łączą się ze sobą pod kątem prostym, na drugim końcu każdego z nich są lustra (rys. 6). We wnętrzu każdego ramienia znajduje się rura ze stali nierdzewnej, wewnątrz której panuje wysoka próżnia. Z miejsca styku rur jest emitowana wiązka lasera, która najpierw przechodzi przez półprzepuszczalne zwierciadło. Tam jest rozszczepiana i już w postaci dwóch wiązek przebywa czterokilometrową drogę tam i z powrotem około 280 razy, aby w końcu wrócić do półprzepuszczalnego zwierciadła. Spotykają się tam obie wiązki i interferują ze sobą (wzmacniają lub wygaszają się). Z tego zwierciadła wiązka jest kierowana na detektor, na którym obserwowany jest obraz interferencyjny (prążki interferencyjne) [<https://www.ligo.caltech.edu/page/ligo-ifo>]. Przesunięcie obrazu o jeden prążek oznacza zmianę długości stosunku ramion o pół długości fali. Naukowcy cały czas śledzą wskazania interferometru i mierzą te długości. Dziennie rejestruje się terabajty danych i analizuje w różnych laboratoriach na świecie.

Obserwatorium LIGO składa się z dwóch identycznych urządzeń, które dzieli 3002 km (w linii prostej). Musi być odizolowane od wszelkich możliwych zakłóceń, np. drgań wywołanych przez jadący pociąg czy rzucony gdzieś na powierzchni ziemi kamień (aby uzyskać taki efekt, używa się tzw. superłumików). Dlatego cała konstrukcja jest wykonana z niewiarygodną precyzją. To jak porównanie odległości do najbliższej gwiazdy z długością mniejszą niż średnica ludzkiego włosa. Dlatego również odległość między obserwatoriami jest tak istotna. Zakłócenia lokalne nie są brane pod uwagę w analizie danych, a badane są tylko identyczne sygnały zarejestrowane przez oba urządzenia.



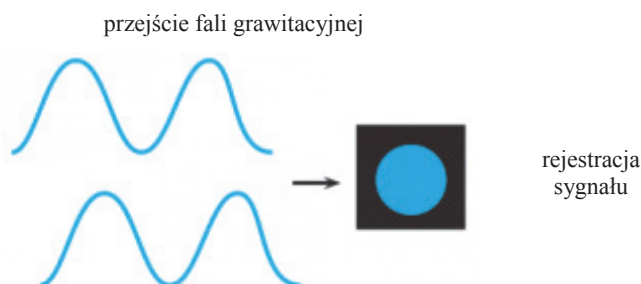
Rys. 6. Schemat działania LIGO [<http://columbiaspectator.com/news/2016/02/11/possible-direct-detection-gravitational-waves-ligo-could-spell-nobel-prize/>]



Rys. 7. Brak sygnału; w normalnych warunkach wiązki lasera po powrocie do półprzepuszczalnego zwierciadła wygaszają się wzajemnie i nie obserwuje się żadnego sygnału (opracowane na podstawie <http://www.lidimatematici.it/blog/2016/02/16/lesperimento-delle-onde-gravitazionali/>)

3.3. Rejestracja sygnału

Gdy przez Ziemię przeszła fala grawitacyjna, jedno z ramion detektora LIGO zmieniło swoją długość. Właśnie wtedy udało się zarejestrować pierwszy sygnał fali grawitacyjnej. Wiązki lasera miały do przebycia różne drogi i po powrocie do półprzepuszczalnego zwierciadła nie nałożyły się na siebie (rys. 8). Miało to miejsce 14 września 2015 roku. Pierwszą osobą, która zaobserwowała sygnał, był Marco Drago. Pracując w Niemczech, analizował dane z detektorów. Interferometr w Luizjanie odebrał sygnał 7 milisekund wcześniej od tego w Waszyngtonie.



Rys. 8. Fala grawitacyjna spowodowała, że drogi, które miały do przebycia wiązki lasera, różniły się od siebie. Dzięki temu udało się zarejestrować sygnał (opracowane na podstawie <http://www.lidimatematici.it/blog/2016/02/16/lesperimento-delle-onde-gravitazionali/>)

4. POWSTANIE FAŁ GRAWITACYJNYCH – CO TAM SIĘ DOKŁADNE WYDARZYŁO?

W odległości 1,3 miliarda lat świetlnych od Ziemi dwie ogromne czarne dziury, których masy były równe 29 i 36 masom Słońca, wirowały wokół siebie, aby w końcu się połączyć (rys. 9), tworząc jedną czarną dziurę o masie, która byłaby równa sumie ich mas (65 mas Słońca), jednak podczas zderzenia część masy (równa 3 masom Słońca) zmieniła się w energię, która w postaci fał grawitacyjnych po 1,3 miliarda lat dotarła do Ziemi.



Rys. 9. Czarne dziury łączące się ze sobą [<http://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/nasa-scientist-suggests-possible-link-between-primordial-black-holes-and-dark-matter>]

W celu dokładnego wyjaśnienia, jak wielka była ta energia, posłużyć się można wzorem Einsteina:

$$E = mc^2$$

Po podstawieniu danych otrzymano wartość energii:

$$E = 50,69085 \cdot 10^{46} \text{ J}$$

Zderzenie wytworzyło bardzo silne pole grawitacyjne, które się rozprzestrzeniło, zniekształcając czasoprzestrzeń w postaci fal grawitacyjnych. Przemierzały one kosmos z energią około 50 razy większą od energii wszystkich gwiazd i galaktyk, jakie wtedy istniały w obserwowanej części wszechświata. Te właśnie fale po raz pierwszy w historii udało się zarejestrować za pomocą instalacji LIGO. Nie jest to jednak rzadkie zjawisko. Takie fale są obecne cały czas, jednak ich sygnał jest zbyt słaby, żeby można go było wychwycić.

„Nie możemy zobaczyć fal grawitacyjnych przez teleskop. To pierwszy raz kiedy zostały one zarejestrowane. Nie poprzez wpływ na wszechświat, lecz przez energię, którą emitują” – powiedziała Vicky Kalogera, jedna z liderów grup naukowców pracujących nad eksperymentem LIGO [<https://news.northwestern.edu/stories/2016/02/gravitational-waves-detected/>].

„To największa eksplozja, jaką zarejestrowaliśmy w historii. Kataklizm większy niż wybuchy supernowych czy błyski gamma, tyle że praktycznie całą uwolnioną energię uniosły niewidoczne dla oka fale grawitacyjne” – powiedział profesor Michał Berger [<http://wiedzoholik.pl/mamy-je-potwierdzono-istnienie-fal-grawitacyjnych-to-jedno-z-najwiekszych-odkryc-wspolczesnej-nauki/>].

5. CIEKAWOSTKI

Kilka ciekawostek na temat interferometru LIGO:

- jest to najbardziej czułe i dokładne urządzenie na Ziemi. Jest w stanie wychwycić zmianę w długości ramion detektora mniejszą niż jedna dziesięciotysięczna średnicy protonu;

- zawiera drugą co do wielkości komorę z próżnią na świecie. Większa jest tylko komora Wielkiego Zderzacza Hadronów w Szwajcarii. Każda z rur ma objętość 10000 m^3 . Taka objętość powietrza mogłaby służyć do napompowania 1,8 miliona piłek do piłki nożnej;
- w rurach panuje bardzo niskie ciśnienie, równe jednej bilionowej ciśnienia atmosferycznego. Aby je osiągnąć, powietrze z komór usuwano przez 40 dni;
- na każdą z rur naciska 155 mln kg powietrza, a co ciekawe, każda z nich jest wykonana ze stali o grubości 3 mm;
- ramiona detektora LIGO mają 4 km, jest to na tyle duża odległość, że krzywizna ziemi powoduje różnicę w wysokości około 1 m, dlatego rury musiały być poziomowane, aby skompensować tę różnicę;
- zwierciadła znajdujące się w urządzeniu LIGO ważą po 40 kg i są zrobione z kwarcu. Duży rozmiar zwierciadeł zapobiega zmianie kształtu wywołanego nagrzaniem laserem;
- jedna z uczelni w Stanach Zjednoczonych przechowuje obecnie około $4,5 \text{ Pb}$ ($4,5 \cdot 10^{15}$ bitów) danych z obserwacji LIGO;
- szacowany koszt projektu to około miliard dolarów. Jest on finansowany przez National Science Foundation (była to największa tego typu inwestycja, jaką NSF kiedykolwiek sfinansowało). LIGO Scientific Collaboration (LSC) to grupa ponad 1000 osób (w tym około 250 studentów) z ponad 90 uniwersytetów z 15 krajów;
- planowana jest budowa trzeciego obserwatorium LIGO w Indiach. Projekt nosi nazwę INDIGO i będzie podobny do detektorów w Stanach Zjednoczonych. Trzecie obserwatorium znacznie zwiększy dokładność badań, a wyniki będą jeszcze bardziej pewne;
- w badaniach fal grawitacyjnych brali udział także Polacy. POLGRAW to akronim zespołu badaczy, którym kierował profesor Andrzej Królak. Zespół brał czynny udział w pracach nad projektem. Grupa jest jedną z 19 zespołów zaangażowanych w Virgo Collaboration (organizację zrzeszającą naukowców z różnych krajów Europy, którzy biorą udział w analizach danych z laboratoriów LIGO i VIRGO). To, że pierwszy odczyt fal grawitacyjnych będzie pochodził od zderzenia czarnych dziur, przewidzieli właśnie naukowcy z grupy POLGRAW. Polski zespół oprócz analizy danych zajmuje się również modelowaniem astrofizycznych źródeł fal grawitacyjnych, obserwacjami emisji elektromagnetycznej towarzyszącej emisji fal grawitacyjnych oraz budową europejskiego interferometru VIRGO.

6. PODSUMOWANIE

Dotychczas podczas badań kosmosu korzystano z obserwacji fal elektromagnetycznych (w zakresie ultrafioletu, podczerwieni, promieniowania gamma, światła widzialnego czy mikrofal). Fale grawitacyjne dają całkowicie nowe możliwości. Ich odkrycie znacznie poszerzyło naszą wiedzę, jak również otworzyło wiele nowych możliwości badań tego, co już wydarzyło się we Wszechświecie. Również tych wydarzeń, które dopiero nastąpią. Będzie można badać dotychczas niedostępne obszary czasoprzestrzeni, a nawet te obiekty, o istnieniu których jeszcze nie wiemy. Możliwe, że wkrótce uzyskamy więcej informacji na temat Wielkiego Wybuchu, gdyż fale grawitacyjne wywołane przez tanto wydarzenie wciąż są obecne i niosą (dotąd ukryte przed ludzkością) informacje na temat samego początku Wszechświata.

„Mamy dwa odkrycia w jednym. Już sama bezpośrednia detekcja fal grawitacyjnych ma fundamentalne znaczenie. Ale dodatkowo mamy też odkrycie układu podwójnego czarnych dziur, który nigdy dotąd jeszcze nie był zaobserwowany” – skomentował profesor Królak [<http://naukawpolsce.pap.pl/aktualnosci/news,408395,przelomowe-odkrycie-zaobserwowano-na-ziemi-zmarszczki-czasoprzestrzeni.html>].

„Jesteśmy u progu badań fal grawitacyjnych i kto wie, czy następne pokolenia nie znajdą dla nich jakiś praktycznych zastosowań” – powiedział profesor Piotr Jaranowski z Wydziału Fizyki Uniwersytetu w Białymstoku [<http://tvnmeteo.tvn24.pl/informacje-pogoda/nauka,2191/fale-grawitacyjne-namieszaly-w-nauce-podreczniki-trzeba-napisac-od-nowa,193399,1,0.html>].

LITERATURA

Źródła internetowe

<http://naukawpolsce.pap.pl/aktualnosci/news,408395,przelomowe-odkrycie-zaobserwowano-na-ziemi-zmarszczki-czasoprzestrzeni.html>.

<http://tvnmeteo.tvn24.pl/informacje-pogoda/nauka,2191/fale-grawitacyjne-namieszaly-w-nauce-podreczniki-trzeba-napisac-od-nowa,193399,1,0.html>.

<http://wiedzoholik.pl/mamy-je-potwierdzono-istnienie-fal-grawitacyjnych-to-jedno-z-najwiekszych-odkryc-wspolczesnej-nauki/>.

<http://www.wyborcza.pl/1,75400,19613683,dzieki-detektorowi-ligo-po-raz-pierwszy-zarejestrowalismy.html>.

<https://news.northwestern.edu/stories/2016/02/gravitational-waves-detected/>.

<https://www.ligo.caltech.edu/page/about-aligo>.

<https://www.ligo.caltech.edu/page/ligos-ifo>.