

Lasery wykrywanie fal grawitacyjnych (Streszczenie)

Zdzisław Jankiewicz, Wiesław Woliński

Istnienie fal grawitacyjnych zostało postulowane równo 100 lat temu przez A. Einsteina w pracy dotyczącej Ogólnej Teorii Względności [1]. Zgodnie z OTW fale grawitacyjne docierając do ziemi traktować można jako tzw. „zmarszczki czasoprzestrzeni” i powinny manifestować się one zmianą długości obiektów fizycznych. Bezpośrednia obserwacja tych zmian była i pozostaje nadal trudna chociażby ze względu na fakt, że są one niezwykle małe (rzędu rozmiaru jądra atomowego). Znaleziono natomiast dość liczne dowody pośrednie na istnienie fal grawitacyjnych. Do najbardziej przekonujących należą wykonane w 1974 r. obserwacje zmian okresu obiegu dwóch okrążających się pulsarów PSR 1913-16, za które Joseph Taylor i Russel Hulse otrzymali w roku 1993 Nagrodę Nobla.

Zbudowanie przez T. H. Maimana w 1960 roku pierwszego lasera, oraz wykazanie, że optyczne generatory fal monochromatycznych nadają się do pomiarów zmian długości w zakresie nanometrowym, po raz pierwszy stworzyło nadzieję na możliwość bezpośredniej detekcji fal grawitacyjnych. Dla chronologii warto dodać, że budowa lasera była realizacją idei wzmacniacza kwantowego opublikowanej w 1917 r także przez A. Einsteina [2].

Autorzy tego wystąpienia uważają się za szczęściarzy. Tak się bowiem zdarzyło, że nie tylko w początkowym okresie ich aktywności zawodowej dokonano tego wynalazku, ale także mieli oni możliwość zajmowania się wytwarzaniem (generacją) i zastosowaniami promieniowania laserowego. Dziś, po blisko 60 latach, technika laserowa przyczyniła się do powstania nowej, ważnej dziedziny wiedzy – fotoniki. Fotonika porównywana jest z elektroniką, a ze względu na obszar i rangę jej zastosowań, wiek XXI ma szansę być nazwany *wiekami fotoniki*, tak jak wiek XX nazywany jest *wiekami elektroniki*.

Warto zauważyć, że dzięki technice laserowej dokonuje się znaczący postęp szczególnie w zakresie szeroko rozumianej metrologii. To nic dziwnego. Promień laserowy stanowi bardzo użyteczne i szeroko wykorzystywane narzędzie pomiarowe. Śledząc zastosowania laserów, chcemy przywołać tu jednak daleko bardziej istotny udział techniki laserowej w metrologii, udział o fundamentalnym wręcz cywilizacyjnym znaczeniu. Do takich można by zaliczyć **poprawę o trzy rzędy wielkości (z 10^{-15} do 10^{-18}) stabilność wzorców czasu**, (pośrednio i długości), oraz właśnie **wykrywanie fal grawitacyjnych**.

Pragniemy zauważyć, że przedmiotem naszego zainteresowania jest narzędzie, system pomiaru zmian długości drogi optycznej. Nie zamierzamy, nie czujemy się do tego powołani, by wypowiadać się odnośnie istoty, natury i sposobu oddziaływania fal grawitacyjnych z czasoprzestrznią i obiektami, które się w niej znajdują. Przyjmujemy zatem, że fale grawitacyjne powodują zmiany geometrycznej długości odcinka drogi, a zadaniem laserowego systemu pomiarowego będzie wykrycie i rejestracja tego faktu.

Budowę pierwszych urządzeń GWD (*Gravitational Wave Detectors*) planowano w USA już w 1972 r. System w Stanach Zjednoczonych, nazwany LIGO (*Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory*), składający się z dwóch identycznych zestawów interferometrów laserowych rozmieszczonych względem siebie w odległości ok. 3000 km (jeden w St. Luizjana, drugi w St. Washington) łącznie budowany był przez 43 lata.

[1]. Einstein, A. "Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation". *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften Berlin. part 1: 688–696, (1916).*

[2]. Einstein, A., "Zur Quantentheorie der Strahlung", *Physikalische Zeitschrift (in German), 18, 121–128, (1917).*

Docelowe parametry zmodernizowany aLIGO (*Advanced LIGO*) osiągnął w 2015 roku [3]. Mimo, że w międzyczasie w innych krajach powstało szereg innych urządzeń (GEO – Niemcy, VIRGO – Włochy, TAMA i KAGRA – Japonia, AIGO – Australia), przy omówieniu podstawowych cech i zasady działania GWD opierać się będziemy o system LIGO. Priorytet tego systemu wynika chociażby z faktu, że pierwsza detekcja fal grawitacyjnych została dokonana na początku 2016 r. właśnie za pomocą tych urządzeń [4].

Układ przeznaczony do wykrywania fal grawitacyjnych jest w swej istocie interferometrem Michelsona. Monochromatyczna, jednoczęstotliwościowa wiązka laserowa jest dzielona na dwie równe co do wartości części, które kierowane są w dwa prostopadłe względem siebie tory. Wiązki te, po odbiciu od zwierciadeł podwieszonych na końcach ramion interferometru, spotykają się w miejscu podziału, sumują się i kierowane są na detektor promieniowania optycznego, zamieniający je na równoważny sygnał elektryczny, który jest rejestrowany. Długości ramion interferometru dobiera się tak, by wiązki, po przebyciu podwójnej ich drogi, spotkały się w miejscu podziału w przeciwfazie (różnica podwójnych długości obydwu ramion interferometru powinna wynosić pół długości fali wiązki roboczej). W idealnych warunkach do detektora promieniowania optycznego nie powinien dochodzić wtedy żaden sygnał. Dochodząca do ziemi fala grawitacyjna powinna zakłócić ten stan równowagi. Zgodnie z OTW, długości ramion interferometru powinny ulec zmianie. Z racji prostopadłego ich usytuowania względem siebie, zmiany długości ramion nie mogą być jednakowe i rejestrowany przez detektor sygnał winien odtwarzać kształt i wartość dochodzącej do GWD fali grawitacyjnej.

Ta wręcz trywialnie prosta metoda (znana już przed skonstruowaniem lasera), w przypadku wykrywania fal grawitacyjnych nastrocza szereg problemów. Wynikają one z dwóch zasadniczych przyczyn.

1. Fale grawitacyjne generowane są w przestrzeni kosmicznej z udziałem wielkich mas. W związku z tym charakteryzują się małymi częstotliwościami zmian. Gdyby przyjąć, że częstotliwość fali grawitacyjnej wynosi 1Hz, a ramię interferometru traktować jako antenę, to chcąc zapewnić jej skuteczność, długość ramion interferometru powinna wynosić 75000 km (jedną czwartą część długości fali). W warunkach ziemskich nie jest możliwa budowa takiego interferometru. W GWD LIGO długości ramion wynoszą 4 km i mimo zastosowania dodatkowych rezonatorów w częściach roboczych ramion, równoważnych ich wydłużeniu, skuteczny odbiór fal grawitacyjnych zachodzi w otoczeniu ok. 100 Hz (pasmo od 10 Hz do 1000 Hz). Fale grawitacyjne w tym pasmie towarzyszą kosmicznym zjawiskom katastroficznym i niezbyt często występują. Znacznie lepszym byłoby pasmo w otoczeniu 0,01 Hz, w którym generują fale grawitacyjne kosmiczne układy binarne. Wtedy jednak interferometr powinien mieć ramiona o długościach rzędu 10^6 km i być budowany w przestrzeni kosmicznej.

2. Amplituda dochodzących do ziemi fal grawitacyjnych jest mała, a wywoływane nimi zmiany długości obiektów fizycznych, jak już wspomniano wyżej, są porównywalne z rozmiarami jądra atomu.

Tak niewielkie zmiany długości należy wykrywać w naturalnym otoczeniu ziemskim, gdzie niestabilności związane z warunkami sejsmicznymi i atmosferycznymi generują wahania znacznie przekraczające wartość podlegającą pomiarom.

Biorąc powyższe pod uwagę cały zestaw GWD wymaga starannej izolacji od warunków zewnętrznych, oraz takiej jego budowy, by w każdym jego punkcie nie powstawały szумы lub zakłócenia uniemożliwiające pomiar lub nadmiernie zmniejszające jego czułość. Wśród takich zabiegów należy wymienić[4]:

[3]. B. P. Abbott et al. „*Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*”, *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016)

[4]. Benno Willke „*Stabilized laser for advanced gravitational wave detectors*” *Laser & Photon. Rev.*, 1-15 (2010)

- Odpowiednią izolację mas testowych i umieszczonych na nich zwierciadeł oraz pozostałych newralgicznych węzłów interferometru od drgań skorupy ziemskiej;
 - Prowadzenie wiązek laserowych na całej długości ramion w próżni (w rurach stalowych o ciśnieniu rzędu 1 μPa), by uniknąć szumu związanego z rozproszeniem Rayleigha;
 - Dobór średnicy wiązek tak, by minimalizować szum związany z termicznymi ruchami Browna cząstek pokrycia zwierciadeł;
 - Zastosowanie detekcji promieniowania optycznego z wykorzystaniem światła ściśniętego.
- Powiększenia czułości układu uzyskuje się wtedy poprzez zmianę wartości czynników wchodzących w skład zasady nieoznaczoności Heisenberga. Powyższe rozwiązanie planowane jest w najnowszych rozwiązaniach układowych [5].

Interferometry stosowane w GWD stawiają niezwykle ostre wymagania zasilającym je laserom. W pasmie czułości urządzenia LIGO dominującym jest szum śrutowy. Zmniejszenie wpływu szumu śrutowego uzyskuje się przy wysokich mocach promieniowania. Dla systemu LIGO zbudowano laser (biorąc pod uwagę inne jego parametry), o bardzo wysokiej mocy ciągłej ok. 200W. Osiągnięto powyższe w układzie trójstopniowym złożonym z generatora zadającego (master oscylator) i dwóch układów wzmacniających: czterostopniowego przedwzmacniacza oraz również czterostopniowego głównego wzmacniacza dużej mocy. Dodatkowo laser powinien wytwarzać wiązkę o koherencji mierzonej praktycznie nieograniczoną drogą spójności. Chodzi o to, by wiązki, po dwukrotnym przejściu drogi równoważnej długości ramion interferometru, zapewniały pełny (100 %) kontrast prążków interferencyjnych. Spełnienie tego warunku jest trudne i wymaga zastosowania szeregu zabiegów.

- Generator zadający (master) wytwarzać powinien wiązkę o jednej częstotliwości w pojedynczym modzie wzdluznym TEM_{00} . Taka wiązka ma symetryczny rozkład poprzeczny opisywany funkcją Gaussa. Kształt ten nie powinien ulec deformacji w dalszych stopniach wzmacniających. Wymaganie to mimo niezwyklej staranności wykonania wzmacniaczy nie może być spełnione w sposób zadowalający. Dlatego przed wprowadzeniem promieniowania do interferometru pomiarowego wiązka jest filtrowana (czyszczona) z modów wyższych rzędów za pomocą odpowiednio skonstruowanych, pierścieniowych interferometrów Macha – Zehndera.

- Promieniowanie powinno być możliwie wolne od szumów i niestabilności zarówno mocy jak i częstotliwości szczególnie w pasmie pomiarowym urządzenia. Stąd konieczność stabilizacji mocy zasilania wszystkich stopni laserowych i biernej stabilizacji warunków otoczenia (temperatury ciśnienia itp.).

- Niezależnie od stabilizacji biernej w układzie istnieje konieczność zastosowania stabilizacji czynnej zasadniczych parametrów promieniowania lasera. Czynną stabilizację częstotliwości lasera prowadzi się w oparciu o jej porównanie z niezwykle stabilną częstotliwością wzorcowego rezonatora metodą PDH (Pounda – Drevera - Halla). Dla zapewnienia doregulowywania częstotliwości lasera w całym pasmie czułości GWD zastosowano aż trzy aktuatory (układy regulacyjne): cieplną regulację rozmiarów rezonatora generatora master, regulację częstotliwości zasilania komórki akusto - optycznej (AOM z akustyczną falą bieżącą) umieszczonej w torze stabilizacji i przesuwnika fazy w postaci komórki elektro – optycznej (EOM) umieszczonej w torze głównym.

Czynną stabilizację poziomu mocy lasera zapewniono przy pomocy tzw. układu „by pass” w postaci komórki akusto – optycznej (AOM), automatycznie odcinającego nadmiar mocy na ustalonym z góry poziomie.

- Wszystkie układy wymagające uzgodnienia ich częstotliwości własnych z częstotliwością lasera (liczne rezonatory i interferometry M-Z) są automatycznie dostrajane przez umieszczenie w nich strukturach przesuwników piezoelektrycznych (PZT).

[5]. Oelker E. et all. „Squeezed light for advanced gravitational wave detectors and beyond” *OPTICS EXPRESS*, 22, nr 17, 21106 (2014).

Orientując się w dotychczas budowanych zestawach laserowych do powszechnych (nie militarnych) zastosowań można zaryzykować twierdzenie, że układ laserowy stosowany w systemie LIGO jest konstrukcją najbardziej zaawansowaną, korzystającą z najbardziej współczesnych osiągnięć fotoniki. Podobnych zestawów powstało, jak już wspomniano, więcej. Ostatnio zaawansowano budowę bliźniaczego w stosunku do LIGO systemu w Indiach (LIGO INDIA albo INDIGO).

Patrząc od strony bieguna północnego zauważamy, że zbudowane systemy GWD tworzą coś w rodzaju sieci pomiarowej. O ile wiadomo, istnieje już porozumienie pomiędzy systemami LIGO w USA, LIGO w Indiach oraz VIRGO we Włoszech o utworzeniu takiej sieci i wspólnych obserwacjach fal grawitacyjnych. Rejestrując czas pojawienia się czoła fali w poszczególnych stacjach, udałoby się wtedy określić kierunek, z jakiego fala nadeszła i ewentualnie zidentyfikować jej źródło.

To nie wszystko. Zaawansowana jest koncepcja budowy systemu kosmicznego i głównych jego części. Znany jest on w literaturze pod nazwą LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) i tworzyłyby go trzy satelity tworzące trójkąt (równoboczny) o boku $5 \cdot 10^6$ km, krążący wraz z ziemią wokół słońca [6]. Fale grawitacyjne powodować będą deformację trójkąta, a umieszczone w satelitach lasery dokonywałyby precyzyjnych pomiarów tych deformacji.

Odmianą systemu LISA jest koncepcja oparta o satelity geostacjonarne (gLISA [7]), o znacznie krótszym boku trójkąta wynoszącym zaledwie 73000 km i o gorszych własnościach metrologicznych, lecz za to znacznie tańszy. Zgodnie z wcześniejszymi zapowiedziami rozpoczęcie budowy systemu LISA miało nastąpić w 2016 r. Na razie nie ma informacji, czy i który z systemów (LISA czy gLISA) będzie praktycznie realizowany?

Dotychczas na budowę GWD przeznaczono już znaczące środki. Układy typu LIGO są niezwykle kosztowne biorąc pod uwagę zarówno ich budowę jak i eksploatację. Czym uzasadnia się wydatkowanie tak poważnych sum? Chyba nie potrzebą, co czasem jest podkreślane, sprawdzenia słuszności OTW. Raczej byłibyśmy skłonni przyznać rację tym uczonym, którzy w detekcji fal grawitacyjnych widzą otwarcie nowego okna informacyjnego do poznawania wszechświata[8]. Rzeczywiście dotychczas stosowane metody są jednostronne i opierają się o detekcję (wykrywanie) fal elektromagnetycznych. Nie zmienia tego fakt, że detekcję fal e-m prowadzi się w bardzo szerokim pasmie od podczerwieni do przenikliwego promieniowania kosmicznego. Dotarcie do informacji niesionych przez fale grawitacyjne niewątpliwie poszerzy ludzką wiedzę o wszechświecie, a to warte jest każdej ceny.

[6]. Danzmann K., Rudiger A., "LISA technology—concept, status, prospects", *INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING CLASSICAL AND QUANTUM GRAVITY*, 20, S1–S9 (2003).

[7]. Tinto M., et all "gLISA: geosynchronous laser interferometer space antenna concepts with off-the-shelf satellites", *Review of Scientific Instruments* 86, 014501, (2015).

[8]. Hendry Martin, "Gravitational Wave Astronomy – Opening a New Window on the Universe" *School of Physics and Astronomy, Warwick (Aug. 2013)*