



Wytwarzanie fraktalnych struktur niskowymiarowych metodą galwanizacji

Janusz Strzelecki

student fizyki UMK Toruń



Wykonanie tego doświadczenia umożliwia badanie widowskich zjawisk formowania agregacji ograniczonych dyfuzją (DLA – *diffusion limited aggregates*). Zestaw doświadczalny jest bardzo prosty do wykonania, a rezultaty są niezwykle interesujące. Obserwuje się dzięki niemu wytwarzanie miedzianych dendrytów¹ o małych rozmiarach z możliwością sterowania ich prędkością wzrostu i stopniem rozgałęzienia. Badania nad tymi strukturami są prowadzone w wielu placówkach naukowych, widzi się w nich bowiem szansę na budowę nowych, trójwymiarowych układów scalonych. Pierwsze doświadczenie może być wykonane przy użyciu najprostszycy materiałów, natomiast drugie i trzecie są bardziej zaawansowane.

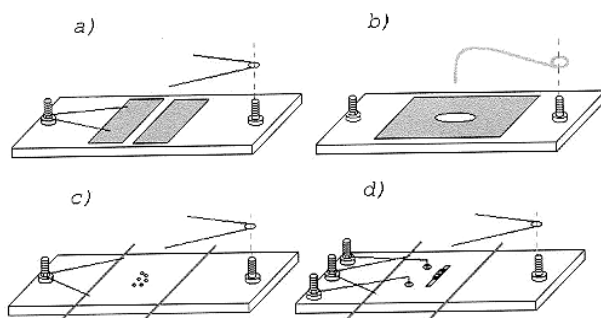
1.

Przygotowanie tego zestawu sprowadza się do naklejenia elektrod miedzianych na przezroczystą płytkę. Elektrody można zaprojektować na kilka sposobów. Można wykonać je w postaci dwóch pasków 10×20 mm, wyciętych z bardzo cienkiej (0,1 mm) blachy miedzianej, które następnie naklejamy równoległe do siebie w odległości 2 mm na mikroskopowym szkiełku podstawowym (rys. 1a). W przypadku trudności ze zdobyciem takiej miedzianej folii można wyciąć kawałek jednostronnej płytki drukowanej z jasnego laminatu i wytrawić na jej środku 2-milimetrową przerwę. Można też przykleić równoległe do siebie dwa miedziane druty.

Innym rozwiązaniem jest wycięcie w miedzianej blaszce 3-milimetrowego otworu za pomocą ostrego wycinaka do skóry. Drugą elektrodę stanowi miedziany drut ($\varnothing 1$ mm), zgięty pod kątem prostym i umieszczony w centrum otworu (rys. 1b).

Na samym początku po prostu lutowałem przewody bezpośrednio do elektrod, jednak nie jest to dobre rozwiązanie. Dużo lepiej jest przykleić do boków płytki dwie śrubki o płaskich łóbkach, najlepiej za pomocą żywicy epoksydowej. Śrubki te utrzymują krótkie kawałki sprężystego drutu, które stykają się z elektrodami. Elektroda z drutu z rozwiązania drugiego również jest mocowana do śrubki. W ten sposób możemy szybko łączyć elektrody z zasilaczem za pomocą krokodylków.

¹ **Dendryt** – kryształ dendrytyczny, agregat krystaliczny o rozgałęzionej, fraktalnej strukturze przypominającej drzewo bądź kryształy lodu na szybie (patrz *Wielka Internetowa Encyklopedia Multimedialna*: wiem.onet.pl, a także software fraktalny, dostępny on-line spanky.triumf.ca/www/fractint/fractint.html)



Rys. 1

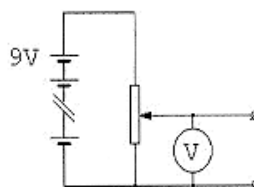
Zasilacz stanowi po prostu ogniwo baterii 9 V. Do tego doświadczenia wystarczą dwie takie baterie, ale w następnych dwóch eksperymentalnych potrzebne będą co najmniej cztery. Łączymy je z potencjometrem pełniącym funkcję dzielnika napięcia (rys. 2). Dobrze jest również połączyć z wyjściem woltomierz, aby łatwo kontrolować potencjały na elektrodach.

Zjawisko obserwujemy pod mikroskopem. Większość szczegółów widoczna jest już przy powiększeniu 40 ×. Przy prezentowaniu doświadczenia większej liczbie osób konieczny jest zwykle mikroskop sprzęgnięty z kamerą lub projektorem.

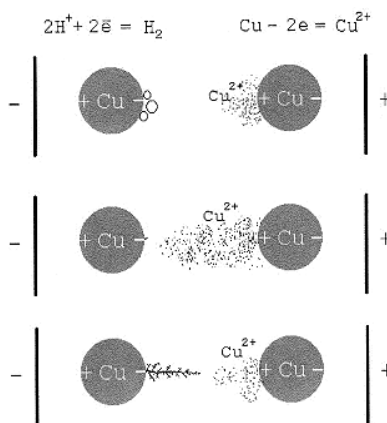
Pomiędzy elektrody наносimy kilka kropli wody za pomocą zakraplacza. W przypadku gdy są to elektrody z blachy, warto jest przykryć szczelinę szkiełkiem nakrywkowym lub rozprościć wodę, by nie tworzyła soczewki zniekształcającej obraz. Po podłączeniu elektrod do zasilacza i umieszczeniu płytki pod mikroskopem ustawiamy potencjometrem różnicę potencjałów na ok. 20 V i włączamy zasilanie.

Niemal natychmiast powinniśmy zaobserwować tworzenie się gazowych pęcherzy na ujemnie spolaryzowanej elektrodzie. Jest to wodór, powstający podczas redukcji wody. Równolegle na elektrodzie dodatniej zachodzi utlenianie miedzi, w wyniku którego jony miedzi przedostają się do wody.

Po mniej więcej minucie koncentracja jonów w pobliżu elektrody ujemnej jest na tyle duża, że redukcja ulega zahamowaniu, a jony przyłączają się do elektrody. Tworzy się DLA, kształtem przypominający kla-



Rys. 2



Rys. 3

syczny fraktal drzewkowy (rys. 3). Rośnie on do momentu zetknięcia z elektrodą przeciwną. Możliwe jest sterowanie prędkością wzrostu poprzez zwiększenie napięcia. Warto zaobserwować zwłaszcza moment, gdy napięcie jest na tyle duże, że kształt ścieżek staje się zbliżony do prostych „pajęczynok” z niewielką liczbą odgałęzień. Badać można także zależność prędkości wzrostu od napięcia. Struktury, które otrzymaliśmy, mogą także posłużyć jako obiekty badań z matematyki stosowanej. Na stronie www.scissors.com opisany jest projekt sprawdzania samopodobieństwa powstałych fraktali DLA.

2.

Wspomniano już o ewentualnym zastosowaniu tych struktur w mikroelektronice. Łatwo jednak zauważyć, że powyższa metoda, przy użyciu której musimy być bezpośrednio podłączeni do punktu wzrostu ścieżki, jest wielce kłopotliwa. W 1997 roku zespół J. C. Bradleya zaprezentował prostą i pomysłową metodę, dzięki której problem ten może zostać ominięty.

Tym razem drobne wysepki miedziane zostają umieszczone w wodzie wraz z oddalonymi nieco od nich elektrodami. W polu wytwarzanym przez te elektrody wysepki polaryzują się i przy odpowiednim jego natężeniu może dojść do procesu opisanego powyżej, ale w dowolnie wybranej przez nas skali i bez bezpośredniego połączenia z zasilaczem. Ponadto tworząc odpowiednią matrycę wysepek, możemy sterować kierunkiem wzrostu.

Największy problem stanowią elektrody zewnętrzne, muszą być bowiem wykonane z elektrochemicznie nieaktywnego materiału. Najlepszym rozwiązaniem jest drut platynowy o średnicy 1 mm. Można również przeprowadzić próby z palczkami grafitowymi, są one jednak dużo bardziej kłopotliwe. Oczywiście, do jednorazowych prób można zastosować dowolny metal, jednak należy się liczyć ze znacznymi zanieczyszczeniami roztworu.

Płytkę wykonamy poprzez trawienie jednostronnie krytego miedzią laminatu w chlorku żelazowym. Na wyciętą płytkę nanosimy drobne kropelki lakieru. Można to zrobić za pomocą igły lub też użyć specjalnego pisaka olejnego do rysowania płytek drukowanych. Po godzinie płytkę wrzucamy do roztworu FeCl_2 . Gotową płytkę, jak poprzednio, zaopatrzymy w śrubki. Zewnętrzne elektrody w postaci kałków drutu mocujemy do płytki poprzez sprężyste dociski (rys. 1c).

Postępujemy podobnie jak poprzednio, z tym że używamy napięcia rzędu 40 V. Odległość pomiędzy elektrodami zewnętrznymi a wysepkami powinna być większa niż odległość pomiędzy wysepkami. Stosując różne matryce wysepek, możemy ukierunkować wzrost ścieżek.

3.

Zaprezentowana w poprzednim punkcie technika może zostać zastosowana do zrobienia prostego, samorosnącego układu elektronicznego. Dioda LED zostanie tu poprzez miedziane ścieżki podłączona do zasilania.

Płytkę wytrawiamy tak, jak pokazuje rys. 1d. Stosujemy LED SMD o możliwie jak najmniejszych rozmiarach. Aby przylutować go do dwóch wysepek, stosujemy zwykłą lutownicę, na której grot nawijamy trochę drutu o pożądanej przez nas grubości i ukośnie spiłowanym końcu. Zasilanie doprowadzamy poprzez dwa sprężyste, zagięte i zaostrzone druty, które stykają się z wysepkami. Diodę zasilac będziemy z wykonanego poprzednio zasilacza.

Po uruchomieniu zasilania czekamy, aż wytworzą się połączenia. Kiedy to nastąpi, odłączamy krokodylki od elektrod i skręcamy potencjometr do minimum. Krokodylki podłączamy pod wyprowadzenia diody i powoli zwiększamy napięcie, aż do momentu zapalenia diody. Jeśli po rozerwaniu ścieżek dioda gaśnie, to znaczy, że na skutek przewodnictwa wody efekt ten nie ma miejsca.

Na zakończenie pragnę przestrzec, że doświadczenia 2 i 3 bywają kapryśne i potrafią „odmówić współpracy” w sytuacji, gdy powinny działać bez zarzutu. Jednym z najważniejszych warunków powodzenia jest czystość elementów. Największy problem sprawiają płytki wykonane z trawionego laminatu, gdyż wszelkie zanieczyszczenia wbijają się w liczne pory. Czasami wykonana płytka jest po prostu z gruntu wadliwa i pozostaje tylko wykonanie nowej. Warto także sprawdzić, czy wysepki nie ekranują się nawzajem. W powyższych doświadczeniach stosowano czystą destylowaną wodę, można jednak eksperymentować z dodawaniem niewielkich ilości kwasu siarkowego lub słabym roztworem CuSO_4 .

Wszystkich zainteresowanych odsyłam do artykułu *Creating electrical contacts between metal particles using directed electrochemical growth* Jean-Clauda Bradleya *et al.* (*Nature*, 18 września 1997, vol. 389). Znajdują się tam wszystkie najważniejsze informacje, oraz wiele odnośników do innych prac. Wszystkie pytania i uwagi proszę kierować na adres: raistlin@actyn.phys.uni.torun.pl



Fale grawitacyjne i ich detekcja

Jarosław Stasielak

student fizyki UJ



Wstęp

W newtonowskiej teorii grawitacji oddziaływanie pomiędzy dwoma ciałami jest natychmiastowe. Jednak według ogólnej teorii względności prędkość światła jest największą prędkością, z jaką mogą rozchodzić się oddziaływania. Jeżeli pewne ciało zmieni swój kształt, to odpowiadająca temu zmiana w polu grawitacyjnym będzie się rozchodzić na zewnątrz z prędkością światła. To rozchodzące się zaburzenie jest właśnie falą grawitacyjną.

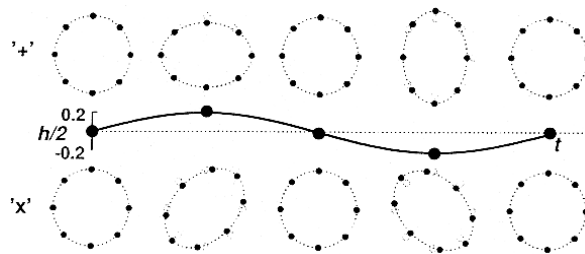
Zgodnie z ogólną teorią względności układ traci swoją energię i moment pędu poprzez emisję fal grawitacyjnych. W ostatnich latach Hulse i Taylor zaobserwowali straty energii i kąty w podwójnym pulsarze PSR 1913+16, za co dostali Nagrodę Nobla w 1993 roku. Było to bardzo ważne odkrycie, ponieważ pośrednio potwierdzało istnienie fal grawitacyjnych. Jak dotąd jest to jedyny dowód na istnienie tych fal, gdyż do tej pory nie udało się bezpośrednio ich wykryć.

Istnienie fal grawitacyjnych wynika z równań Einsteina. Równania te są nieliniowe, a przez to skomplikowane.

Właściwości fal grawitacyjnych

Jak wiadomo, metryka odpowiada za geometryczne właściwości czasoprzestrzeni, a więc w szczególności za odległości przestrzenne między różnymi jej punktami. Fala grawitacyjna zmienia odległości przestrzenne między cząstkami próbnymi umieszczonymi na jej drodze. Fizycznie wynika to z faktu, że cząstki próbne umieszczone w różnych punktach czasoprzestrzeni spadają w polu grawitacyjnym o różnym natężeniu lub kierunku, a zmiana ich względnej odległości jest związana z różnicą przyspieszeń w tych polach. Mówi się, że na cząstki działają siły pływowe. Analogiczny efekt mamy dla układu cząstek, który swobodnie spada w polu ziemskim. Siła grawitacji działająca na cząstki jest skierowana do centrum Ziemi, wobec czego w czasie spadku cząsteczki zbliżają się do siebie.

Analiza równania Einsteina prowadzi do wniosku, że podobnie jak fale elektromagnetyczne, fale grawitacyjne są falami poprzecznymi. Oznacza to, że względna zmiana odległości między cząstkami następuje tylko w kierunkach prostopadłych do kierunku rozchodzenia się fali, a nie ma jej wzdłuż tego kierunku. Okazuje się również, że fale grawitacyjne posiadają dwie niezależne polaryzacje „+” i „X”.



Rys. 1

Wyobraźmy sobie pierścień cząstek próbnych, który jest ustawiony prostopadle do padającej fali grawitacyjnej. Przechodząca fala będzie powodować jego odkształcenie. W przypadku czystych polaryzacji „+” i „X” deformacje, jakim podlega pierścień, są przedstawione na rys. 1. Można powiedzieć, że fala przedstawia impuls grawitacyjnych sił pływowych, pod wpływem których pierścień doznaje odkształcenia. Odkształcenie to jest proporcjonalne do rozmiarów pierścienia. Pola-

ryzacje „+” i „X” są obrócone o 45° . Można w tym miejscu zdefiniować parametr h , który opisuje „siłę” fali grawitacyjnej. Jeżeli dwie cząstki próbne są oddalone od siebie o L , a w czasie przechodzenia fali maksymalna zmiana ich odległości wynosi δL , to h jest zdefiniowane następującym wzorem:

$$\frac{1}{2}h = \frac{\delta L}{L} \quad (1)$$

Oznacza to, że h jest wielkością, która mówi, jak duża będzie względna zmiana odległości między dwoma cząstkami próbnymi.

W przeciwieństwie do fal elektromagnetycznych źródłem fal grawitacyjnych nie może być dipol. Pole elektromagnetyczne jest polem wektorowym i fale elektromagnetyczne mogą być generowane przez źródła wektorowe, takie jak prądy elektryczne lub drgania ładunków elektrycznych. Innymi słowy, dipole mogą już być źródłami (dipol można przedstawić za pomocą wektora). Pole grawitacyjne ma charakter tensorowy i do jego wzbudzenia konieczne jest źródło o większej liczbie składowych niż dipol (wektor). Skoro tensor można uważać za wynik koniunkcji dwóch wektorów, to źródło musi być co najmniej tak skomplikowane jak układ dwóch wektorów (kwadrupol). Oznacza to, że źródłem fal grawitacyjnych nie może być sferycznie symetryczny rozkład masy (pulsująca gwiazda), natomiast będzie nim zmienny w czasie moment kwadrupolowy.

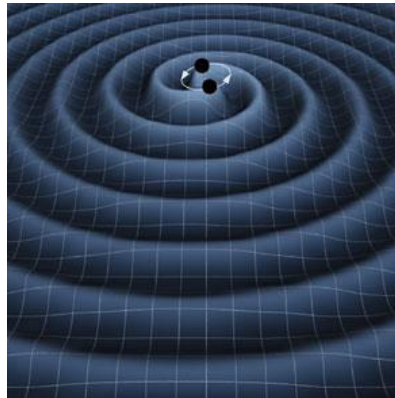
Również obserwacja fal grawitacyjnych różni się od obserwacji fal elektromagnetycznych [4]. W przypadku detekcji fal elektromagnetycznych wykorzystuje się metody bolometryczne. Polegają one na mierzeniu energii fali (ilości fotonów i ich częstotliwości), nie rejestrując przy tym fazy. Fale elektromagnetyczne oscylują po prostu zbyt szybko, aby ją zarejestrować. Spektroskopia jest tutaj dosyć skomplikowana i wymaga użycia specjalnych urządzeń, np. siatek dyfrakcyjnych czy pryzmatów. Inaczej jest w przypadku fal grawitacyjnych. Oscylują one z częstotliwością rzędu kHz lub niższą i są bezpośrednio związane z ruchem mas w źródle. Prawie wszystkie użyteczne informacje zawarte są w ich fazie. Detekcja polega na mierzeniu amplitudy i fazy fali. Spektroskopia jest bardzo prosta i polega na rozkładzie mierzonego sygnału na szereg Fouriera. Wystarczająca ilość danych, znane procedury (m.in. odróżnianie szumów), dobry komputer już na to pozwalają.

Potencjalne źródła fal grawitacyjnych

We Wszechświecie znajduje się wiele źródeł wytwarzających silne fale grawitacyjne. Przykładem mogą być podwójne układy gwiazd neutronowych, czarnych dziur, ciasne układy podwójne białych karłów, akrecja materii na czarną dziurę, czy implozja jądra gwiazdy, która powoduje wybuch supernowej. Źródłem fal grawitacyjnych jest również sam Wielki Wybuch. Warto tutaj przedstawić proces ewolucji układów podwójnych. W miarę wypromieniowywania fal grawitacyjnych rozmiary orbit składników takiego układu będą się zmniejszać. Skoro moment pędu układu jest zachowany, gwiazdy będą wirować wokół siebie coraz szybciej. Będzie to powodować emisję fal o coraz większej częstotliwości i coraz większej amplitudzie. W końcu gwiazdy zblizną się do siebie na tyle, że zaczną się ze sobą stykać

i rozpocznie się proces ich łączenia. Proces ten jest bardzo krótkotrwały (rzędu 50 ms) i jest źródłem silnych fal grawitacyjnych. Okazuje się, że ze względu na słabość sygnałów grawitacyjnych, w najbliższej przyszłości możliwe do detekcji będą tylko najsilniejsze źródła tych fal. Należą do nich ostatnie stadia ewolucji podwójnych układów gwiazd neutronowych lub czarnych dziur.

Jednym z najsilniejszych źródeł fal grawitacyjnych we Wszechświecie są zderzające się czarne dziury (rys. 2). Spróbujmy oszacować „siłę” fali grawitacyjnej emitowanej przez taki proces. Kiedy fala jest ciągle w pobliżu czarnych dziur, jej amplituda jest równa w przybliżeniu 1 ($h \approx 1$). Oznacza to, że fala rozciąga i ścisną obiekty prawie o tyle, ile wynosi ich rozmiar. Człowiek zostałby zabity przez tak silną falę. Jednak w miarę oddalania się od źródła amplituda fali, podobnie jak dla światła, maleje odwrotnie proporcjonalnie do odległości ($h \sim 1/r$). Proces zderzania się czarnych dziur jest bardzo krótkotrwały, ponadto jest raczej mało prawdopodobne, że zajdzie w pobliżu Ziemi. Jeżeli chcemy go zaobserwować w rozsądnym czasie (np. w ciągu roku), to musimy obserwo-



Rys. 2. Dwie czarne dziury, zbliżając się do siebie, promieniują fale grawitacyjne (Tim Carnahan (GSFC) / William Folkner (JPL) / NASA)

wać duże obszary Wszechświata (np. do odległości rzędu 10^9 lat świetlnych). Wobec tego wydaje się rozsądnym założenie, że typowe odległości do zderzających się czarnych dziur są równe 10^9 lat świetlnych. Dla tej odległości dostajemy amplitudę fali w pobliżu Ziemi $h \sim 10^{-21}$. Taka fala powoduje zmianę średnicy Ziemi rzędu 10^{-14} m, co jest równe 10^{-4} średnicy atomu! Jak widać, typowe fale grawitacyjne są bardzo słabe, dlatego do tej pory nie zostały bezpośrednio zaobserwowane. Aby zmierzyć tak niewielkie odległości, potrzebne są bardzo wyrafinowane metody pomiaru.

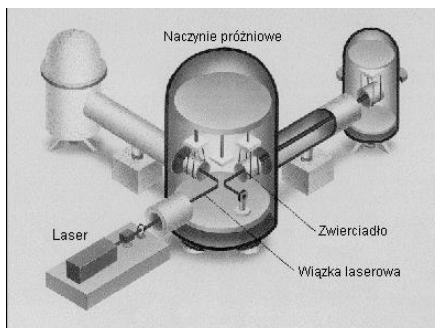
Detektory fal grawitacyjnych

Pierwszą laboratoryjną antenę do odbioru fal grawitacyjnych zbudował w 1959 roku prof. Joseph Weber z Uniwersytetu Maryland. Przez blisko 10 lat był on jedynym badaczem pracującym w dziedzinie astronomii grawitacyjnej. Zastosowanym przez niego detektorem był aluminiowy cylinder o długości 1,53 m i średnicy 0,66 m, ważący 1,4 tony. Jego częstość rezonansowa była równa 1660 Hz. Środkowa część cylindra była pokryta kryształem piezoelektrycznym. Gdy cylinder wibrował, jego powierzchnia ścisłała i rozciągała kryształ, który wytwarzał napięcie elektryczne. Aby wykryć fale o amplitudzie $h = 10^{-21}$, detektor ten musiałby wykryć zmianę długości równą 10^{-6} średnicy nukleonu!

Obecnie detektory cylindryczne są w stanie wykryć fale o amplitudzie $h = 10^{-17}$, co jest o cztery rzędy wielkości za mało w porównaniu do wymaganej czułości $h = 10^{-21}$. Drugą poważną wadą jest fakt, że wykrywają one tylko fale o częstotliwości zbliżonej do ich częstotliwości naturalnej. Trzeba by użyć tysięcy cylindrów, aby pokryć cały zakres częstotliwości fal grawitacyjnych.

W ostatnich latach duże nadzieje wiąże się z wykorzystaniem zasady działania interferometru Michelsona.

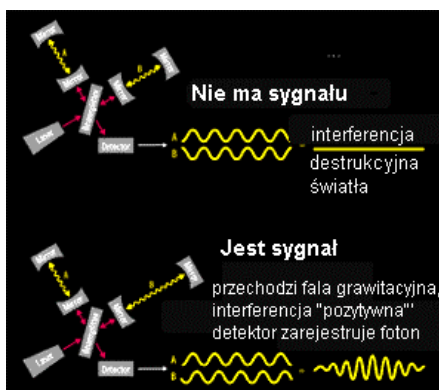
Jeden z możliwych układów tego typu, przedstawiony na rys. 3, składa się z lasera i pięciu zawieszonych na drucie masywnych zwierciadeł. Spójne światło lasera, padając na zwierciadło umieszczone na przecięciu ramion interferometru, zostaje rozdzielone na dwie wiązki, które wpadają do tych ramion. Każda z wiązek wielokrotnie odbija się między dwoma zwierciadłami umieszczonymi w ramionach interferometru. Po wielu odbiciach obie wiązki łączy się i rejestruje za pomocą



Rys. 3

fotodetektora. Jeżeli odległość między zwierciadłami w jednym ramieniu interferometru jest taka sama jak między zwierciadłami w drugim ramieniu, to w wyniku destruktywnej interferencji fotodetektor nie zarejestruje światła (rys. 4). Przejście fali grawitacyjnej spowoduje skrócenie jednego ramienia interferometru, a wydłużenie drugiego.

Wprowadzi to różnicę dróg optycznych między obiema wiązkami. Interferencja nie będzie już całkowicie destruktywna i fotodetektor zarejestruje światło (rys. 4). Mierzac natężenie odbieranego światła możemy określić różnicę długości obu ramion interferometru, a więc „siłę” fali grawitacyjnej. Czułość interferometru można podnosić przez wydłużenie jego ramion lub zwiększenie liczby odbić między zwierciadłami dzięki zastosowaniu zwierciadeł o bardzo dużej zdolności odbijającej. Powoduje to efektywnie zwiększenie ramion interferometru, przez co światło w obu ramionach przebywa większą drogę. Różnica dróg optycznych między dwoma wiązkami zwiększa się, co wprowadza większe różnice w natężeniu światła odbieranego przez fotodetektor. Zaletą takiego układu jest duża czułość i fakt, że rejestruje on fale w szerokim zakresie częstotliwości. Poważną jednak wadą jest wysoki koszt budowy takiego detektora.



Rys. 4

GEO 600

Obecnie w fazie konstrukcji jest wiele detektorów wykorzystujących zasadę działania interferometrów. Przykładem mogą być projekty LIGO w USA (rys. 5), GEO 600 w Niemczech, VIRGO we Włoszech, TAMA 300 w Japonii czy wreszcie projekt LISA. W tym rozdziale skupię się wyłącznie na projekcie GEO 600.



Rys. 5. Jeden z interferometrów projektu LIGO w Hanford w USA.
LIGO Laboratory, Caltech

Początki tego projektu sięgają 1985 roku, gdy grupa naukowców z Instytutu Maxa Plancka w Garching zaproponowała budowę dużego detektora o długości ramion interferometru równej 3 km. Rok później podobny projekt zaproponowała angielska grupa z uniwersytetu w Glasgow. Obie grupy połączyły swe wysiłki w 1989 roku. Tak narodził się projekt GEO. Jednak z powodów finansowych budowa detektora nie rozpoczęła się. Dopiero w 1994 roku zaproponowano budowę pod Hannoverem mniejszego detektora GEO 600 o długości ramion równej 600 metrów. Budowa ta rozpoczęła się we wrześniu 1995 roku. Obecnie projekt jest w fazie uruchamiania. Poniżej widok detektora GEO600 z lotu ptaka (DEUTSCHE LUFTBILD W. Seelmann & Co. GmbH, Hamburg) (rys. 6).



Rys. 6

Interferometr GEO 600 składa się z dwóch ramion o średnicy 60 cm, w których utrzymywana jest wysoka próżnia (8–10 mBar). W układzie wykorzystywany jest laser o pojedynczym modzie 1064 nm i mocy 10 W. Specjalne zwierciadła ze szkła kwarcowego zapewniają dużą liczbę odbić między zwierciadłami w ramionach interferometru, która może dochodzić nawet do tysiąca. Czułość detektora powinna wynosić od $h \sim 10^{-20}$ – 10^{-21} dla sygnałów impulsowych (krótkotrwałych), aż do

$h \sim 10^{-26}$ dla sygnałów ciągłych, przy czasie zbierania danych równym jednemu rokowi. Częstotliwości fal grawitacyjnych rozciągają się od mHz do kHz. Jednakże szumy sejsmiczne ograniczają wszystkie ziemskie detektory do częstotliwości większych od 10 Hz. GEO 600 może wykrywać fale w zakresie od 50 Hz do 1,5 kHz.

Poważnym problemem mogą być szumy interferometru imitujące fale grawitacyjne. Takie szumy prawie nigdy nie występują jednocześnie w dwóch różnych detektorach. Wobec tego, aby je wykluczyć, potrzebne są dwa takie detektory. W rzeczywistości, aby uzyskać pełną informację (pozycję źródła, polaryzację) z impulsowego sygnału fali grawitacyjnej (np. pochodzącej ze zderzenia się czarnych dziur), potrzebne są aż cztery detektory. Dodatkowo używanie większej liczby detektorów pozwala osiągnąć o wiele większą dokładność. Dlatego grupa naukowców z GEO 600 współpracuje z innymi grupami w USA (LIGO), Francji/Włoszech (VIRGO) i w Japonii (TAMA 300).

Najsilniejsze fale grawitacyjne są emitowane w regionach o bardzo silnych polach grawitacyjnych, gdzie duże ilości materii poruszają się lub wirują z prędkościami bliskimi światła. Takie regiony są często otoczone przez cienką warstwę materii, która absorbuje fale elektromagnetyczne, ale nie absorbuje fal grawitacyjnych. Regiony o silnych polach grawitacyjnych nie emitują więc promieniowania elektromagnetycznego. Przeciwnie, promieniowanie elektromagnetyczne obserwowane przez astronomów prawie całkowicie pochodzi z regionów o słabych polach grawitacyjnych i niskich prędkościach materii. Przykładem może być powierzchnia gwiazdy czy supernowa. Fale grawitacyjne niosą więc informacje z zupełnie innych regionów niż fale elektromagnetyczne. Rozwój astronomii fal grawitacyjnych może zrewolucjonizować nasze rozumienie Wszechświata nawet bardziej, niż zrobił to rozwój radioastronomii. Celem GEO 600 i innych detektorów fal grawitacyjnych jest uzyskanie informacji na temat supernowych, czarnych dziur, zwartych układów podwójnych czy grawitacyjnego promieniowania relikтового, które to informacje nie mogą być uzyskane w inny sposób. Dodatkowo obserwacje układów podwójnych pozwolą na określenie masy ich składników, położenia, odległości od Ziemi oraz kształtu ich orbit. Można również będzie określić pewne parametry kosmologiczne np. stałą Hubble'a.

Fale grawitacyjne powinny zostać już niebawem zaobserwowane. Początkowo obserwacje te nie będą zbyt dokładne, ale na pewno w niedalekiej przyszłości czułość detektorów ulegnie znacznej poprawie.

Zakończenie

Fale grawitacyjne to nic innego jak falowanie krzywizny czasoprzestrzeni. Są one produkowane przez przyspieszane masy. Ponieważ oddziaływanie grawitacyjne jest bardzo słabe, więc do wytworzenia fal grawitacyjnych o znaczącej amplitudzie (którą można zarejestrować) potrzebne są duże masy i silne przyspieszenia. Warunki te są spełnione podczas gwałtownych wydarzeń astrofizycznych. Detekcja i zrozumienie fal grawitacyjnych są bardzo ważne z naukowego punktu widzenia. Dają one nowe możliwości, dzięki którym będziemy mogli zebrać nowe informa-

cje na temat różnych astrofizycznych układów – eksplozji supernowych, pulsarów oraz zwartych układów podwójnych. Jest całkiem możliwe, że nastąpią zupełnie nieoczekiwane odkrycia, podobnie jak miało to miejsce w radioastronomii.

Artykuł napisany na podstawie pracy seminaryjnej, wykonanej pod kierunkiem prof. dr. hab. E. Malca.

Bibliografia:

- [1] Schutz Bernard F., *Wstęp do ogólnej teorii względności*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1995
- [2] Davies Paul C. W., *Fale grawitacyjne*, PWN, Warszawa 1985
- [3] Thorne Kip S., *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*, W. W. Norton & Company, Inc., New York 1994 (rozdział: *Ripples of Curvature*)
- [4] <http://www.geo600.uni-hannover.de/>

Zachęcam do zajrzenia na następujące strony w Internecie:

<http://www.astronomy.com>

strona domowa TAMA300 <http://tamago.mtk.nao.ac.jp/tama>

strona domowa GEO600 <http://www.geo600.uni-hannover.de/geo600>

<http://www.ligo-wa.caltech.edu>



Czwarte piętro, szumy i ja

Bartłomiej Dybiec

doktorant, Instytut Fizyki UJ



Jak znalazłem się na czwartym piętrze? Pierwszą nasuwającą się odpowiedzią jest: wyszedłem po schodach lub wyjechałem windą. W tym przypadku nie chodzi o jakieś zwykłe czwarte piętro w jakimś zwyczajnym budynku. Chodzi o budynek Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego, w którym znajduje się Zakład Fizyki Statystycznej. W tej sytuacji można by powiedzieć, że przez przypadek. Niestety, i ta odpowiedź nie jest w pełni prawdziwa, ale jest w niej przysłowiowe ziarenko prawdy.

Po trzecim roku studiów musiałem podjąć decyzję dotyczącą wyboru specjalizacji. Dokładnie zapoznałem się z wszystkimi istniejącymi możliwościami i zdecydowałem się na fizykę teoretyczną. W moim przypadku wybór wiązał się też z ustaleniem problematyki, którą będę się zajmował. Po raz pierwszy w Zakładzie Fizyki Statystycznej znalazłem się podczas egzaminu z fizyki statystycznej, po raz

drugi – poszukując opiekuna naukowego. Moje pierwsze spotkanie z przyszłą Panią Promotor odbyło się we wrześniu 1999 roku. Termin został ustalony drogą elektroniczną, ponieważ dr hab. Ewa Gudowska-Nowak przebywała wówczas w Niemczech. Zaopatrzony w kopie poleconego artykułu poszedłem na spotkanie nieznanego. Na początek dostałem pewien mały i prosty problem do rozwiązania. Patrząc z dzisiejszej perspektywy, stwierdzam, że był prosty. Jednakże wtedy, gdy miałem „coś mu zrobić”, prosty na pewno nie był. Mówiąc bardzo skrótowo, polegał on na zbadaniu pewnych własności błędzenia przypadkowego (ruchów Browna) w polu zewnętrznych, zmiennych w czasie sił. Ruchy Browna po raz pierwszy zostały zauważone przez Jana Ingenhousza w 1785 roku. Ponad pół wieku później obserwował je także angielski botanik Robert Brown, oglądając pod mikroskopem zawieszinę pyłków roślinnych. Ruchy te są spowodowane nieustannymi zderzeniami cząstek ośrodka z sobą. Ich teoretyczne uzasadnienie zostało podane przez Alberta Einsteina oraz Mariana Smoluchowskiego, patrona Instytutu Fizyki UJ.

Tutaj po raz pierwszy pojawiają się zagadkowe, występujące w tytule szumy. Szumy modelują oddziaływanie badanej przez nas cząstki z innymi cząstkami ośrodka i mają bardzo ważne znaczenie. W fizyce występuje cała grupa zjawisk, które pokazują konstruktywną rolę szumów, m.in. w układach fizycznych i biologicznych. Stwierdzenie, że w pewnych przypadkach szum może wzmocnić sygnał, w pierwszym momencie brzmi trochę paradoksalnie, kłóci się z intuicją wyniesioną z życia codziennego – przecież nikt nie lubi, gdy radio trzeszczy. W układach fizycznych szum może być bardzo pożyteczny, dzięki oddziaływaniu z cząstkami ośrodka możliwa jest ucieczka cząstki z minimów („dołków”) potencjału, czyli miejsc, w których zewnętrzna siła działająca na cząstkę wynosi zero. Oznacza to, że cząstka nie musi przez cały czas przebywać w okolicach „dołka”, ale może dowolnie zmieniać położenie. Czasem trzeba tylko bardzo dłuugo czekać, aż znajdzie się w jakimś innym miejscu. Oczywiście, są też sytuacje, w których szum jest niepożądany. Przy pomiarach bardzo słabych sygnałów problemem jest odróżnienie tego, co chcemy zmierzyć, od szumu. Generalnie w układach elektronicznych chcemy się go pozbyć. Jednakże w przypadku, którym zajmowali się Arno Penzias i Robert Woodrow Wilson, „niepożądany” szum okazał się być promieniowaniem reliktowym, za odkrycie którego otrzymali w 1978 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki.

Prosty problem dość naturalnie przerodził się w temat pracy magisterskiej. Stał się doskonałym polem do nauki pewnych metod i technik obliczeniowych, a także doskonałym miejscem do sprawdzania nowych pomysłów. Obecnie jestem słuchaczem studiów doktoranckich i zajmuję się czymś trochę innym, co nadal jednak wiąże się szumami, a na czwarte piętro staram się chodzić po schodach.