# Promieniowanie grawitacyjne

**Andrzej Krasiński**

## 1. Co to jest promieniowanie grawitacyjne?

W związku z niedawnym zderzeniem komety *Shoemaker - Levy* z Jowiszem, zastanówmy się nad następującym problemem. Przed zderzeniem masa Jowisza była rozłożona po jego objętości w sposób prawie sferycznie symetryczny (niewielkie, choć mierzalne, spłaszczenie jest spowodowane siłą odśrodkową w ruchu obrotowym. Z premedytacją udajemy, że nie wiemy o innych zaburzeniach). Obserwator na Ziemi mógłby *w zasadzie* skonstruować przestrzenną mapę fragmentu pola grawitacyjnego Jowisza (w praktyce byłoby to przedsięwzięcie skrajnie trudne, jak wyniknie z dalszego ciągu artykułu). Poziomicami tej mapy byłyby współśrodkowe powierzchnie kul, na każdej z nich natężenie pola grawitacyjnego Jowisza byłoby inne. Oczywiście, wskutek zmiany odległości Jowisza od Ziemi podczas obiegu wokół Słońca, mapa taka byłaby inna w każdej chwili, ale (znów *w zasadzie*) można ją skonstruować dla dowolnej ustalonej chwili.

Bezpośrednio po zderzeniu na powierzchni Jowisza pojawiła się dodatkowa masa o małej objętości, która zaburzyła istniejącą przedtem symetrię pola grawitacyjnego. Energia i pęd przekazane materii Jowisza w zderzeniu spowodowały przemieszczenia masy w jego wnętrzu i nad powierzchnią. Po pewnym czasie zaburzenia te ustały i pole grawitacyjne Jowisza powróciło do dawnej symetrii, ale w krótkim okresie przejściowym reagowało ono na ruchy mas w pobliżu punktu zderzenia i było nieregularne. Obserwator na Ziemi mógłby na swojej mapie pola grawitacyjnego Jowisza zauważyć odpowiednie zmiany (mógłby w *zasadzie*, w praktyce byłoby to znowu skrajnie trudne, o tym właśnie będzie mówił niniejszy artykuł). Pytanie, które chcemy tu postawić, jest następujące: czy obserwator na Ziemi zauważyłby te zmiany w tym samym momencie, w którym nastąpiło zderzenie?

Teoria grawitacji Newtona kazałaby spodziewać się odpowiedzi twierdzącej. Skądinąd wiemy jednak, że żaden sygnał nie może poruszać się szybciej niż światło. Światło wysłane z Jowisza dociera do Ziemi z opóźnieniem od ponad 30 minut do nieco ponad 50 minut, zależnie od położenia Ziemi i Jowisza na ich orbitach. Z takim samym lub większym opóźnieniem powinna dotrzeć do Ziemi informacja o zaburzeniu pola grawitacyjnego przy powierzchni Jowisza. To wędrujące przez przestrzeń zaburzenie pola grawitacyjnego nazywa się **falą grawitacyjną**.

Możliwość istnienia fal grawitacyjnych wynika z *Ogólnej Teorii Względności* i została przewidziana przez Einsteina już w 1916 roku. W świetle dzisiejszej wiedzy należałoby mówić raczej o konieczności ich istnienia. Każdy zmienny w czasie niesymetryczny rozkład masy (np. podwójny układ gwiazd czy wybuchająca supernowa) powinien wysyłać fale grawitacyjne, bo jeśli tego nie robi, to... gdzieś w *Teorii Względności* kryje się zasadniczy błąd.

Proces wytwarzania i rozchodzenia się fal grawitacyjnych jest pod wieloma względami podobny do dobrze zbadanego i zrozumianego procesu wytwarzania i rozchodzenia się fal elektromagnetycznych. Istnieją jednak ważne różnice. Z punktu widzenia teorii najważniejsza różnica to nieliniowość oddziaływań grawitacyjnych. Własności pola elektromagnetycznego opisują równania liniowe. Jeśli znamy rozwiązanie tych równań opisujące jedno zjawisko (np. pole elektrostatyczne ładunku punktowego) i drugie zjawisko (np. wędrówkę fali elektromagnetycznej przez pustą przestrzeń), to sytuację, w której oba te zjawiska zachodzą równocześnie (w podanych przykładach: fala elektromagnetyczna biegnie przez przestrzeń wypełniona polem elektrycznym ładunku punktowego) możemy ściśle opisać po prostu dodając do siebie dwa znane rozwiązania.

Całkiem inaczej zachowuje się pole grawitacyjne. Oddziaływanie grawitacyjne ujawnia się poprzez zakrzywienie przestrzeni. Fala grawitacyjna biegnie przez zakrzywioną przestrzeń, ale jej przejście zaburza krzywiznę, co z kolei zmienia warunki rozchodzenia się fali. Ten skomplikowany proces, nazywany **wpływem odwrotnym**, do dziś sprawia kłopoty teoretykom. Równoczesne występowanie dwu zjawisk nie jest opisywane sumą rozwiązań, z których każde opisuje jedno zjawisko z osobna. Dla kombinacji dwu zjawisk trzeba szukać nowego rozwiązania od początku.

Przez długie lata fale grawitacyjne były opisywane jedynie przybliżonymi rozwiązaniami równań pola grawitacyjnego (**nazywanych równaniami Einsteina**), otrzymanymi przy założeniu, że obydwa pola grawitacyjne (pole samej fali i pole istniejące przedtem na trasie jej wędrówki) są na tyle słabe, że zachowują się w przybliżeniu liniowo i efekt wpływu odwrotnego można zaniedbać. Ten uproszczony, ale ciągle jeszcze skomplikowany i miejscami niejasny opis dla wielu fizyków wyglądał podejrzanie. Dopiero w latach 60-tych uzyskano pierwsze ścisłe rozwiązania równań Einsteina opisujące fale grawitacyjne, a w latach 70-tych stało się możliwe badanie pewnych własności rozwiązań równań Einsteina w oparciu o same równania, bez konieczności szukania ścisłych rozwiązań. Dzisiaj nikt już nie wątpi, że *Teoria Względności* przewiduje istnienie fal grawitacyjnych, które powinny rozchodzić się z prędkością światła.

## 2. Wytwarzanie fal grawitacyjnych.

Zajmiemy się najpierw procesem wytwarzania fal elektromagnetycznych, który jest prostszy. Rozkład pola elektrycznego wokół pewnego rozkładu ładunków można obliczyć metodą kolejnych

przybliżeń, nazywaną **rozwinięciem multipolowym**.

• *Pierwszym członem* tego przybliżenia jest pole sferycznie symetryczne (monopol). Jest to pole wytwarzane przez taki sam ładunek, jak w badanym układzie, ale rozłożony sferycznie symetrycznie. Natężenie tego pola maleje odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości od źródła i jest wprost proporcjonalne do całkowitego ładunku w źródle.

• *Drugim członem* tego przybliżenia jest dipol. Jest to pole elektryczne wytworzone przez dwa blisko siebie położone ładunki przeciwnych znaków. Natężenie takiego pola maleje odwrotnie proporcjonalnie do trzeciej potęgi odległości od źródła i jest wprost proporcjonalne do momentu dipolowego wektorowej wielkości określającej ładunki tworzące dipol i ich ustawienie w przestrzeni. Pole dipola jest osiowo symetryczne, ale nie sferycznie symetryczne; poza osią symetrii siła działająca na ładunki elektryczne umieszczone w polu dipola nie jest skierowana wzdłuż prostej łączącej ładunek z dipolem (Rys. 1).

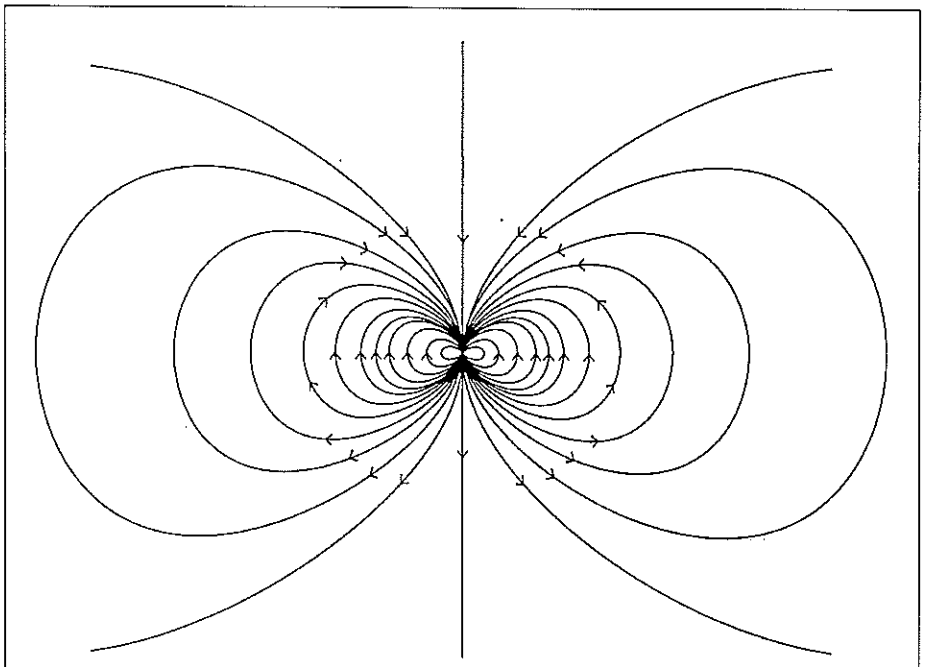
• *Trzeci człon* przybliżenia (kwadrupol) można interpretować jako dwa przeciwnie skierowane dipole położone blisko siebie, ale nie pokrywające się. Natężenie pola elektrycznego kwadrupola maleje odwrotnie proporcjonalnie do czwartej potęgi odległości od źródła, jest zaś wprost proporcjonalne do momentu kwadrupolowego wielkości macierzowej opisującej rozmieszczenie i wartość ładunków w układzie.

We wzorze opisującym pełne pole elektryczne występują wyższe przybliżenia zanikające coraz szybciej z odległością, ale do naszych rozważań nie będą one potrzebne.

Fale elektromagnetyczne powstają, gdy wielkości charakteryzujące poszczególne człony tego rozwinięcia (momenty multipolowe) zmieniają się w czasie.

Całkowity ładunek nie może się zmienić - byłoby to sprzeczne z równaniami Maxwella, w które nikt dziś nie wątpi. Wynika stąd, że sferycznie symetryczne pulsacje rozkładu ładunków nie mogą wysłać fali elektromagnetycznej. Zewnętrzne pole elektryczne układu sferycznie symetrycznego jest zawsze niezależne od czasu.

Zmienny w czasie elektryczny moment dipolowy można wytworzyć na dwa sposoby: albo poprzez przepływy ładunku między dwoma biegunami dipola (tak właśnie działa radiowa antena nadawcza) albo przez poruszanie monopolowym rozkładem ładunku tam i z powrotem po odcinku linii prostej. Moc wysyłanego promieniowania jest wtedy proporcjonalna do kwadratu drugiej pochodnej momentu dipolowego po czasie (czyli, przy drugim sposobie wytwarzania fali, do kwadratu przyspieszenia, z jakim porusza się ładunek).



Rys. 1. Linie sił pola elektrycznego dipola - przekrój płaszczyzną zawierającą oś symetrii. Strzałki pokazują zwrot siły działającej na dodatni ładunek próbny.

Zmienny w czasie moment kwadrupolowy można wytworzyć albo poprzez przepływy ładunków wewnątrz kwadrupola albo poprzez obracanie dipolem wokół osi prostopadłej do osi symetrii dipola. Moc promieniowania jest proporcjonalna do kwadratu trzeciej pochodnej momentu kwadrupolowego po czasie.

Promieniowanie elektromagnetyczne posiada pewną magiczną własność, dzięki której jest tak przydatne w praktyce. Pole elektryczne i pole magnetyczne w biegnącej przez przestrzeń fali zmniejszają swoje natężenie odwrotnie proporcjonalnie do pierwszej potęgi odległości od źródła, niezależnie od tego, który kolejny multipol jest odpowiedzialny za ich wytworzenie. Pole fali elektromagnetycznej zanika więc z odległością znacznie wolniej niż statyczne pole rozkładu ładunków, które te fale wytworzyły. Dzięki temu można na przykład odbierać w Warszawie fale elektromagnetyczne wysłane z nadajnika MTV w Londynie, chociaż beznadziejna byłaby próba zmierzenia w Warszawie siły elektrostatycznej wytworzonej przez tę samą antenę, gdyby na pewien czas nadać jej stały w czasie moment dipolowy[1]. Własność ta wydaje się magiczna w porównaniu z własnościami pól statycznych, ale jest zgodna z równaniami Maxwella i można ją udowodnić za pomocą ścisłego rachunku.

Musimy wspomnieć o jeszcze jednej własności promieniowania elektromagnetycznego, którą posiada też promieniowanie grawitacyjne. Czysty sygnał fali można odebrać tylko w odpowiednio dużej odległości od źródła, gdzie zakłócenia wywołane polem krótkozasięgowym (szybciej zanikającym z odległością) są niewykrywalne. W małych odległościach od źródła składowa krótkozasięgowa powoduje silne zaburzenia. Uprzedzając dalszy wywód możemy więc od razu stwierdzić, że nie da się zmierzyć na Ziemi promieniowania grawitacyjnego wysyłanego przez inne planety Układu Słonecznego. Ziemia jest zbyt blisko generatora, a w przypadku Marsa, Jowisza i dalszych planet wewnątrz generatora (generatorem fal grawitacyjnych jest układ Słońce - planeta).

Wiele własności promieniowania grawitacyjnego można objaśnić za pomocą

[1] W tym ostatnim zdaniu kryje się małe oszustwo: dodatkowym utrudnieniem przy pomiarze pola statycznego jest jego stałość w czasie. Łatwiej jest wykryć krótkookresowe zmiany pewnej wielkości, niż zmierzyć jej wartość. Problem ten występuje powszechnie w technice.

analogicznych własności promieniowania elektromagnetycznego. Na przykład, nie jest możliwa zmiana całkowitej masy układu promieniującego (poza zupełnie nierealistycznym przypadkiem, gdy układ składa się z materii wymieszanej z antymaterią i zamienia swoją masę w promieniowanie. Takich obiektów nie zaobserwowano). Sferycznie symetryczna (monopolowa) składowa pola grawitacyjnego jest więc zawsze statyczna i nie może wytwarzać żadnego promieniowania.

W porównaniu z polem elektromagnetycznym występują jednak trzy komplikacje:

**1.** W oddziaływaniach grawitacyjnych rolę ładunku pełni masa. Masy są zawsze dodatnie, tzn. siły grawitacyjne są zawsze przyciągające. Z tego powodu nie istnieje „czysty dipol" grawitacyjny. „Czysty dipol" elektryczny składa się z ładunku dodatniego (+e) i ładunku ujemnego (-e) o tej samej wartości bezwzględnej. Całkowity ładunek czystego dipola elektrycznego jest równy zeru i jego pole elektryczne nie ma składowej monopolowej. W przypadku grawitacji układ, którego całkowita masa byłaby równa zeru, nie wytwarzałby żadnego pola grawitacyjnego i nie moglibyśmy dyskutować o jego promieniowaniu[2]. Dipol grawitacyjny może występować tylko jako poprawka do monopola. Ta sama uwaga dotyczy wszystkich wyższych multipoli.

**2.** Oddziaływanie grawitacyjne jest wielokrotnie słabsze od elektromagnetycznego. Siła przyciągania grawitacyjnego między dwoma elektronami jest około $4.2 \cdot 10^{42}$ razy mniejsza niż siła ich wzajemnego odpychania elektrostatycznego. Słabość tę odzwierciedla współczynnik $G/c^5$ występujący we wzorach na natężenie pola grawitacyjnego fali grawitacyjnej (G - stała grawitacyjna, c - prędkość światła). W jednostkach CGS $G/c^5 = 2.74 \cdot 10^{-60}$ sek$^3$/(g· cm$^2$). Jak łatwo zgadnąć, wykrywanie fal grawitacyjnych jest w tej sytuacji wielokrotnie trudniejsze niż wykrywanie fal elektromagnetycznych. Szczęściem w nieszczęściu jest fakt, że tak jak dla fal elektromagnetycznych, natężenie pola fali grawitacyjnej maleje odwrotnie proporcjonalnie do odległości od źródła. Dzięki temu, chociaż wykrywanie fal grawitacyjnych jest poza zasięgiem obecnie istniejących możliwości technicznych, trudności wydają się jednak możliwe do pokonania; wspomnimy o tym dalej.

**3.** Prędkość zmian grawitacyjnego momentu dipolowego jest równa całkowitemu pędowi układu. Pęd jest jednak stałą ruchu we wszystkich procesach fizycznych. Na przykład, przy starcie promu kosmicznego zmiana pędu pojazdu jest w każdym odcinku czasu równa co do wartości bezwzględnej pędowi wyrzucanych z silnika gazów, ale jest przeciwnie skierowana. Całkowita zmiana pędu układu jest równa zeru. Druga pochodna momentu dipolowego po czasie, równa pochodnej całkowitego pędu po czasie, jest więc też równa zeru. Oznacza to, że nie istnieje promieniowanie grawitacyjne wytwarzane przez zmienny w czasie dipol grawitacyjny. Główny przyczynek do promieniowania grawitacyjnego może pochodzić od zmian kwadrupola w czasie. Jest to dalsze utrudnienie techniczne - do wzoru na moc promieniowania wchodzi trzecia pochodna momentu kwadrupolowego po czasie.

Promieniowanie grawitacyjne wytwarzane przez obiekty dostępne bezpośrednim badaniom jest tak słabe, że nie ma nadziei na wykrycie go. Wyobraźmy sobie taką sytuację: meteoryt o masie $2 \cdot 10^7$ kg uderza w Ziemię z prędkością 11 km/sek i zatrzymuje się po zaryciu na głębokość 200 m. Całkowita energia wypromieniowana w tym przypadku w postaci fal grawitacyjnych wynosi $2 \cdot 10^{-19}$ ergów. (Przykład ten jest zapożyczony z książki: H. C. Ohanian, R. Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, W. W. Norton & Co, London 994, s. 299). Wystarczyłaby ona, aby podrzucić na wysokość około 120 cm... jeden atom wodoru.

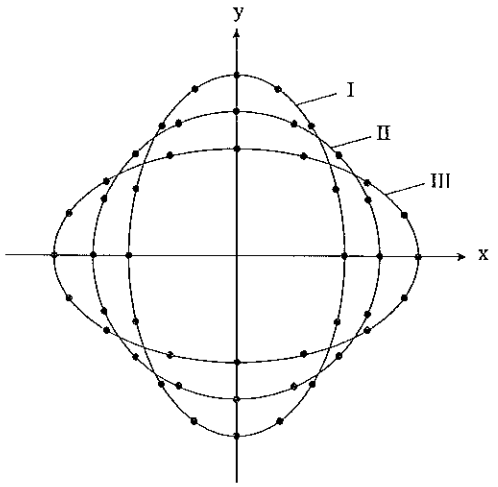
Co gorsza, energia ta rozchodzi się we wszystkich kierunkach i obserwator ma szanse zarejestrować tylko jej małą część. Parametrem, który charakteryzuje szanse obserwatora na wykrycie fali, jest gęstość przepływu energii. Jest to energia przepływająca w ciągu sekundy przez 1 cm$^2$ powierzchni prostopadłej do kierunku obserwacji w punkcie, w którym dokonujemy pomiaru. Załóżmy, że fale grawitacyjne wypromieniowane przy zderzeniu meteorytu z Ziemią rozchodzą się równomiernie we wszystkich kierunkach i że obserwator znajduje się w odległości 1 km od punktu zderzenia (musi być na tyle daleko, aby pole krótkozasięgowe nie zakłócało pomiaru. Abstrahujemy tu od utrudnień związanych ze zjawiskami sejsmicznymi i atmosferycznymi towarzyszącymi upadkowi meteorytu). Załóżmy też, że meteoryt po upadku porusza się ruchem jednostajnie opóźnionym. Czas hamowania wynosi wtedy 0.036 sek. Gęstość przepływu energii zmierzona w takich warunkach wynosiłaby $4.38 \cdot 10^{-29}$ ergów/(cm$^2$· sek).

Energie wypromieniowywane w postaci fal grawitacyjnych w procesach kontrolowanych przez człowieka są znacznie mniejsze. Wystarczy porównać parametry ruchu. Przyspieszenie, jakiego doznaje meteoryt z powyższego przykładu podczas hamowania w Ziemi wynosi około 30 000 g, gdzie g jest przyśpieszeniem ziemskim. Spośród rakiet używanych w technice kosmicznej największe przyspieszenie osiąga rakieta *Pegasus*, wynosi ono 2.7 g[3]. Największą masę startową ma rakieta *Saturn V*, wynosi ona 2913 ton (ok. 1/7 masy meteorytu z przykładu), ale osiąga przyspieszenie 1.2 g. Duży tankowiec z pełnymi ładowniami ma masę około 6 razy większą niż meteoryt z przykładu. Aby jednak osiągnąć takie samo przyspieszenie, jak meteoryt ryjący w Ziemi, musiałby w zderzeniu z przeszkodą albo z innym statkiem, przy prędkości początkowej równej 36 km/godz = 10 m/s, zatrzymać się na odcinku 1/6 milimetra. Wymaganie to jest nierealistyczne - wiadomo skądinąd, że kadłuby statków zostają podczas zderzeń rozprute na wielometrowych odcinkach, a więc taka jest realistyczna droga hamowania.

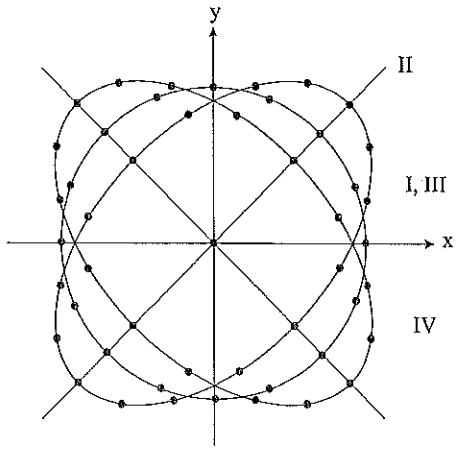
Większe energie wypromieniowywane są przez obiekty astronomiczne, choć na niekorzyść obserwatorów działa tu wielka odległość od źródeł promieniowania. Mimo to, dzięki dużym masom i dużym przyspieszeniom, wypromieniowywana w postaci fal grawitacyjnych energia jest na tyle duża, że jej wykrycie staje się realnym zadaniem dla (przyszłej!) techniki. Porównamy tu ze sobą gęstość przepływu energii, która powinna być mierzona na Ziemi, dla kilku rodzajów obiektów

[2] Uwaga - drugie oszustwo! Stwierdzenie to jest ściśle prawdziwe w teorii grawitacji Newtona, według której promieniowanie grawitacyjne i tak nie istnieje. W teorii względności udowodniono możliwość istnienia obiektów zbudowanych z samego promieniowania (nazywanych geonami), które mają zerową masę, ale niezerowe pole grawitacyjne, wytworzone przez energię promieniowania.

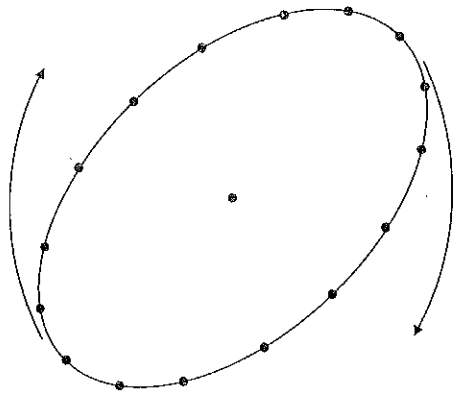
[3] Dane techniczne rakiet podane za: *Tablice fizyczno-astronomiczne*. Opr. W. Mizerski, W. Nowaczek. Wydawnictwo Adamantan, Warszawa 1995, s. 161.




**Rys. 2.** Oddziaływanie płaskiej fali grawitacyjnej o stałej w czasie polaryzacji na pierścień zbudowany z mas próbnych. Pierścień oscyluje z częstotliwością równą częstotliwości fali przechodząc cyklicznie przez stany I II III II I, itd.




**Rys. 3.** Każdą płaską falę grawitacyjną można rozłożyć na dwie składowe o stałych polaryzacjach, obróconych względem siebie o 45° - taką, jak na Rys. 2 i taką, jak powyżej.



**Rys. 4.** Jeśli fala z Rys. 3 ma tę samą amplitudę, co fala z Rys. 2 i podąża za falą z Rys. 2 w tym samym kierunku z opóźnieniem 1/4 okresu, to w wyniku dostajemy falę spolaryzowaną kołowo. Pierścień mas próbnych jest stale zdeformowany w elipsę, która obraca się ze stałą prędkością. Każda z mas porusza się po prostej łączącej ją ze środkiem elipsy, obrót elipsy jest skutkiem synchronizacji oscylacji poszczególnych mas.

astronomicznych.

Jednym z możliwych rodzajów źródeł fal grawitacyjnych jest układ podwójny rozseparowany, tzn. taki, w którym obie gwiazdy są widoczne osobno. Najlepszym kandydatem do obserwacji jest w tej grupie Syriusz, odległy od Ziemi o niecałe 9 lat świetlnych. Spodziewana gęstość przepływu energii wynosi w tym przypadku $1.3 \cdot 10^{-24}$ ergów/(cm$^2$· sek) - ciągle bardzo mało, ale jednak 30 000 razy więcej niż w przypadku meteorytu.

Innym możliwym rodzajem źródła jest układ podwójny zaćmieniowy. W takim układzie gwiazdy każda blisko siebie (nie widać ich w teleskopach jako dwu osobnych obiektów), a więc poruszają się w silnych polach grawitacyjnych i doznają dużych przyspieszeń. W tej grupie źródeł typowym obiektem jest gwiazda β w gwiazdozbiorze Perseusza, odległa o 103 lata świetlne od Ziemi. Spodziewana gęstość przepływu energii w postaci fal grawitacyjnych wynosi dla niej $1.3 \cdot 10^{-13}$ ergów/(cm$^2$·sek) - już znacznie lepiej.

Podobnej gęstości przepływu energii ($2 \cdot 10^{-13}$ ergów/(cm$^2$·sek)) spodziewamy się w przypadku pulsara w układzie podwójnym o nazwie *PSR 1913+16*, o którym będzie jeszcze mowa dalej. Jest on odległy od Ziemi o 16 300 lat świetlnych.

Wreszcie, w przypadku dwu gwiazd neutronowych, każda o masie równej masie Słońca, krążących w odległości 10 000 km jedna od drugiej i odległych o 3500 lat świetlnych od Ziemi, gęstość przepływu energii mierzona na Ziemi wynosiłaby $2.7 \cdot 10^{-3}$ ergów/(cm$^2$·sek). To byłby naprawdę bardzo obiecujący przypadek, gdyby nie jeden problem: jest to przykład fikcyjny, takiego układu dotychczas nie zaobserwowano.

### 3. Wykrywanie fal grawitacyjnych.

Wyobraźmy sobie pierścień, na którym rozmieszczono równomiernie małe masy (małe, to znaczy nie zaburzające obserwacji swoim własnym polem grawitacyjnym). Wyobraźmy sobie, że z kierunku prostopadłego do płaszczyzny pierścienia nadbiega fala grawitacyjna najprostszego typu: o płaskich czołach i o stałej w czasie polaryzacji (tzn. kierunek najszybszego wzrostu natężenia pola grawitacyjnego fali jest w każdym punkcie przestrzeni zawsze taki sam). Odległości między różnymi masami na pierścieniu powinny wtedy zmieniać się tak, jak na Rys. 2. Pierścień o kształcie okręgu będzie periodycznie zmieniał się w elipsę, z powrotem w okrąg, w elipsę o zamienionych osiach, znów w okrąg, itd. Ogólną falę grawitacyjną można otrzymać przez składanie fal o różnych amplitudach i stałych polaryzacjach obróconych względem siebie o 45° (Rys. 3.). Jedną z możliwości jest fala spolaryzowana kołowo (rys. 4).

Tak prosto wygląda wykrywanie fal grawitacyjnych *w zasadzie*. W praktyce nic nie jest proste. Fala grawitacyjna jest „tylko" zaburzeniem pola grawitacyjnego, jeśli próbujemy opisać ją w języku teorii grawitacji Newtona. Ale w teorii Newtona fale grawitacyjne po prostu nie istnieją. Gdyby teoria Newtona była ściśle prawdziwa, wszystkie zaburzenia pola grawitacyjnego rozchodziłyby się w przestrzeni z nieskończoną prędkością jako zmiany pola sztywno związane ze zmianami rozkładu masy w źródle. Fale grawitacyjne można opisać tylko w języku *Teorii Względności*. W tym języku fala grawitacyjna jest zaburzeniem geometrii przestrzeni. Odległości pomiędzy różnymi elementami detektora zmieniają się nie dlatego, że elementy te poruszyły się, ale dlatego, że „coś" odkształciło linijkę używaną do pomiaru.

Na szczęście, dokładne rachunki pokazują, że skutki przejścia fali grawitacyjnej przez układ pomiarowy powinny być obserwowalne. Dwie masy zawieszone w polu grawitacyjnym Ziemi, pod wpływem fali grawitacyjnej nadbiegającej z kierunku prostopadłego do łączącej masy prostej, powinny doznawać przyśpieszeń skierowanych wzdłuż tej prostej. Przyspieszenie interpretuje się

w teorii Newtona jako skutek działania siły. Zatem, mamy jednak szansę na wykrycie fal grawitacyjnych.

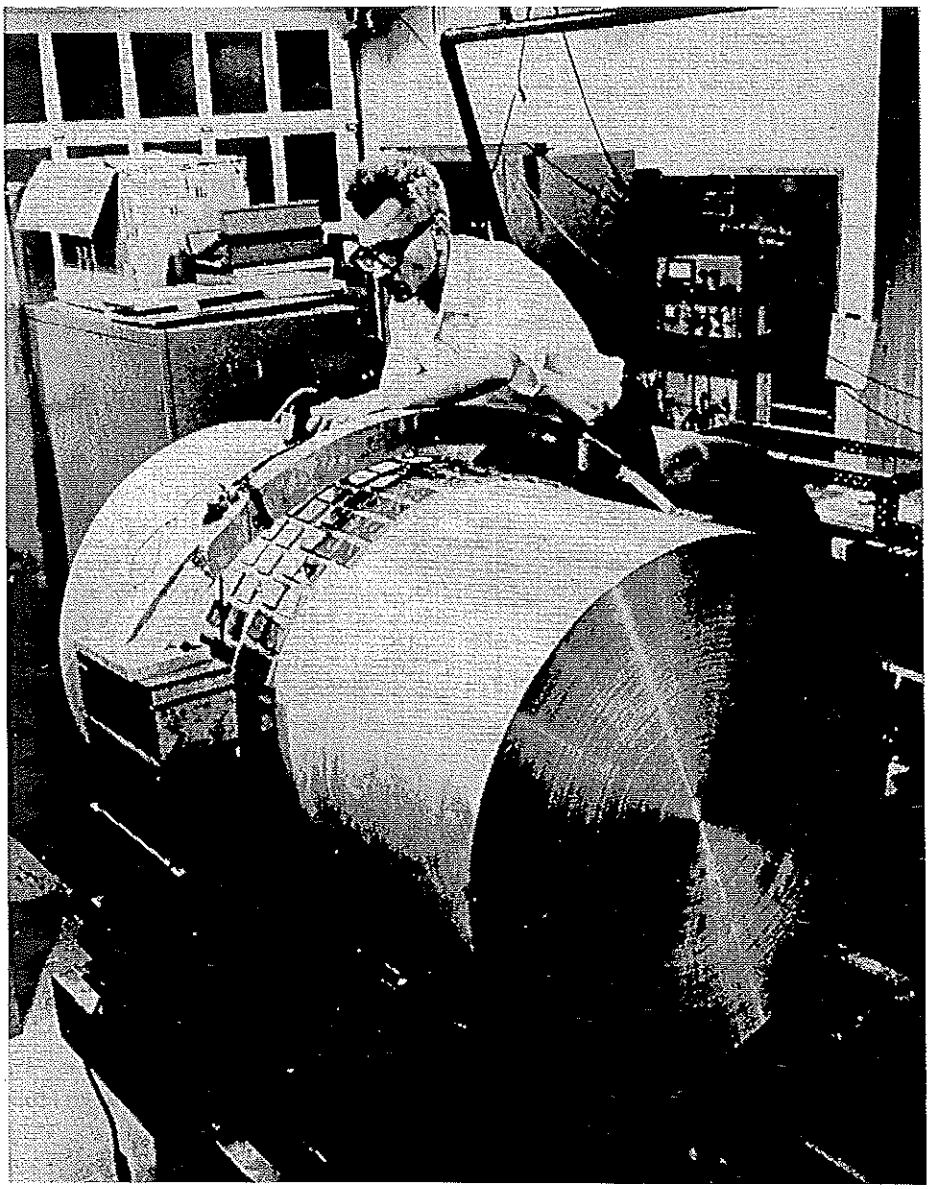
W fazę realizacji weszły dwa rodzaje detektorów:

1. Tzw. *sztaby Webera,* aluminiowe cylindry o masie od 1000 do 2000 kg. Fala grawitacyjna przechodząca przez cylinder powinna wytworzyć w nim naprężenia ujawniające się poprzez odkształcenia mechaniczne, tzn. fale akustyczne, które można wykryć odpowiednio czułą aparaturą (zdjęcie obok).

2. *Interferometry laserowe* również wynalezione przez Josepha Webera. W interferometrze wykrywaczem fal grawitacyjnych jest para zwierciadeł zawieszonych na wahadłach na końcach ramion kąta prostego (Rys. 5). Ustawienie i położenie zwierciadeł są kontrolowane za pomocą prążków interferencyjnych wytworzonych przez promienie świetlne z lasera biegnące wzdłuż różnych ramion kąta.

Podstawowym problemem technicznym w obu rodzajach detektorów są niekontrolowane, przypadkowe wpływy zewnętrzne. J. Weber opowiadał kiedyś, jak jego detektor zarejestrował wstrząs spowodowany przez urzędnika z Waszyngtonu wizytującego laboratorium, który zagapił się przy parkowaniu i wpadł samochodem na ścianę budynku. Nawet drgania termiczne atomów cylindra Webera mają w temperaturze pokojowej większą amplitudę niż spodziewana amplituda drgań wywołanych przejściem fali grawitacyjnej. Detektor musi więc być jak najstaranniej izolowany od drgań mechanicznych w otoczeniu (przez umieszczenie go na podstawie zbudowanej z warstw gumy przekładanych warstwami metalu), umieszczony w komorze próżniowej i ochłodzony do temperatury ciekłego helu (ok. 4 K = -269 °C, dla wytłumienia drgań termicznych). Dla jeszcze lepszej eliminacji przypadkowych wpływów stosuje się parę dwu detektorów umieszczonych w odległości kilkuset do kilku tysięcy kilometrów jeden od drugiego; aparatura elektroniczna wyławia te sygnały, które pojawiły się równocześnie w obu detektorach i miały tę samą zależność natężenia pola od czasu.

Dodatkowym utrudnieniem pomiaru jest fakt, że każdy detektor mechaniczny ma swoją charakterystyczną częstotliwość drgań. Może on wykrywać fale impulsowe (tzn. o krótkim czasie trwania) tylko wtedy, gdy mają one tę samą częstotliwość. Fale o innej częstotliwości mogą się ujawnić, jeśli przepływają przez detektor stałym strumieniem przez czas dłuższy niż czas tłumienia sygnału (typowo ok. 20 sek.).

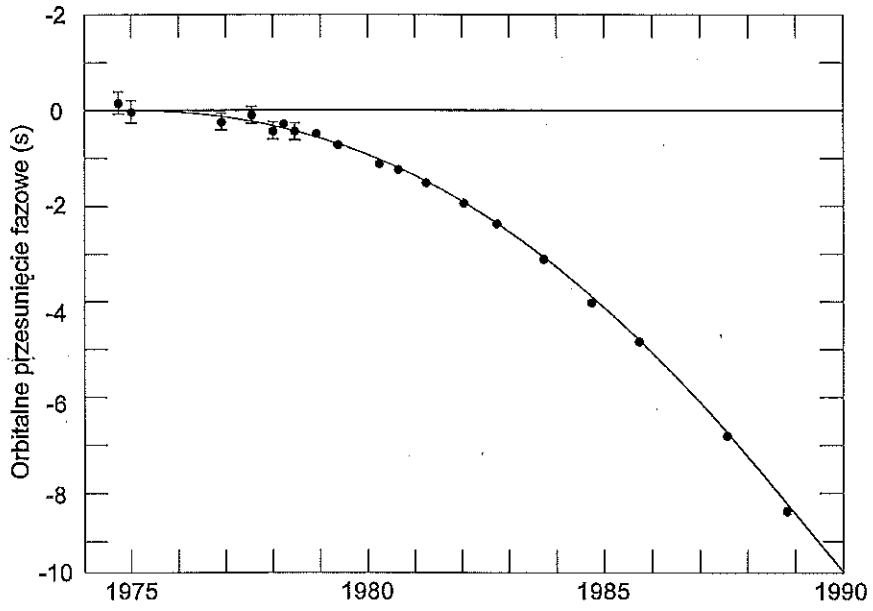


**Sztaba Webera i jej konstruktor. Czujniki opasujące metalowy walec mają wykrywać drgania mechaniczne.**

Trwa obecnie, ciągle jeszcze niezakończony, światowy wyścig o to, kto pierwszy osiągnie wszystkie parametry techniczne potrzebne do zredukowania poziomu szumów poniżej poziomu oczekiwanego sygnału. Wygodnym parametrem służącym do oceny możliwości detektora jest względna amplituda drgań, $A = \Delta l/l$, gdzie l jest początkową odległością obserwowanych mas w detektorze, zaś $\Delta l$ zmianą odległości pod wpływem fali grawitacyjnej (zakłada się, że detektor jest oscylatorem harmonicznym, tzn. że $\Delta l$ jest proporcjonalne do działającej siły). Dla różnych obiektów, które są możliwymi źródłami fal grawitacyjnych, spodziewana względna amplituda zawiera się w granicach od $0.12 \cdot 10^{-22}$ (dla pulsara *PSR 1913+16*) do $0.21 \cdot 10^{-19}$ (dla gwiazdy zmiennej zaćmieniowej $\mu$ *Sco*). Dla najlepszych działających obecnie detektorów typu Webera parametr ten wynosi około $10^{-18}$, czyli ok. 50 razy za dużo, aby zarejestrować spodziewany sygnał. Dla najlepszych detektorów interferometrycznych ten sam parametr wynosi teoretycznie od $10^{-20}$ do $10^{-19}$. Granica wykrywalności sygnału została więc w zasadzie osiągnięta, ale trudności techniczne (np. z utrzymaniem pełnej mocy lasera przez wystarczająco długi czas) ciągle uniemożliwiają dojście do względnej amplitudy $10^{-19}$ w praktycznym działaniu. Fal grawitacyjnych dotychczas nie zaobserwowano. W budowie są obserwatoria następnej generacji, które powinny osiągnąć względną amplitudę $10^{-22}$.

Jedynym jak dotąd, choć nie całkiem

pewnym świadectwem istnienia fal grawitacyjnych jest wspomniany już pulsar w układzie podwójnym *PSR 1913+16*. Dzięki trwającym od ponad 20 lat obserwacjom udało się wyznaczyć z dużą dokładnością różne parametry jego orbity, w tym okres obiegu i długości osi. Ponieważ pulsar ten porusza się w bardzo silnym polu grawitacyjnym, występuje w jego ruchu wiele efektów przewidywanych przez *Teorię Względności*. Jego orbitę można opisać jako elipsę, której osie obracają się w kierunku obiegu pulsara z prędkością 4.2 stopnia na rok (dla porównania, dla Merkurego ten sam efekt wynosi 43 sekundy łuku na stulecie). Okazało się, że energia ruchu orbitalnego pulsara *PSR 1913+16* maleje z czasem (maleje okres obiegu i średnica orbity), i to dokładnie w takim tempie, jak gdyby unosiły ją fale grawitacyjne (Rys. 6). Dla wielu ludzi jest to wystarczająco przekonujący dowód istnienia fal grawitacyjnych. Inni mówią: nie zaobserwowano drugiego składnika układu podwójnego. Znamy tylko jego masę, nie znamy jego rozmiaru ani momentów multipolowych, ani warunków panujących w jego otoczeniu. Układ może tracić energię na wiele różnych sposobów. Entuzjaści mówią na to: ale dokładnie w takim tempie, jak trzeba, przez tak długi czas byłoby dziwne, gdyby przyczyna była inna. Sceptycy odpowiadają: pomiar parametrów orbity polega na najlepszym dopasowaniu kilkudziesięciu nieznanych wielkości do skomplikowanej krzywej wyznaczonej doświadczalnie. Bezpośrednio mierzone są tylko profile czasowe impulsów promieniowania elektromagnetycznego pulsara i chwile ich dotarcia do detektora. W ten sposób można „objaśnić" prawie wszystko.

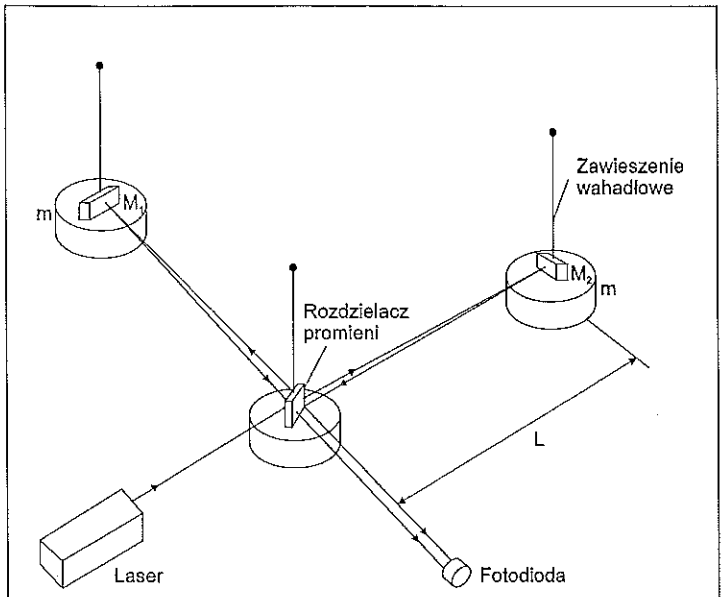



**Rys. 6.** Zmiany okresu orbitalnego pulsara *PSR 1913+16*. Na osi poziomej data obserwacji, na osi pionowej zmiana czasu przejścia pulsara przez periastrum (punkt orbity najbliższy drugiego składnika). Gdyby układ nie tracił energii, wykresem tej funkcji byłaby linia pozioma przechodząca przez początek układu (odstępy czasu między kolejnymi przejściami przez periastrum byłyby stale takie same). Wskutek utraty energii średnica orbity maleje, a wraz z nią maleje okres obiegu. Pulsar osiąga kolejne periastra z coraz większym wyprzedzeniem w stosunku do układu nie tracącego energii. Krzywa pokazuje to właśnie wyprzedzenie obliczone z teorii względności przy założeniu, że układ traci energię poprzez emisję fal grawitacyjnych. Punkty pokazują zaobserwowane odchylenia. Zgodność teorii z doświadczeniem jest imponująca, ale położenie punktów doświadczalnych na tym wykresie jest obliczane po elektronicznym odfiltrowaniu innych efektów, mierzonych w oparciu o te same dane obserwacyjne. Poprawność filtrowania jest głównym źródłem kontrowersji.

Nieufność trwa, chociaż badacze pulsara *PSR 1913+16*, J. Taylor i R. Hulse, dostali za swoje wyniki nagrodę Nobla w roku 1993. Zostanie ona przełamana, jeśli uda się zaobserwować fale grawitacyjne bezpośrednio. Jeśli będzie pewne, że naprawdę istnieją, to znikną opory psychologiczne przeciwko używaniu ich do bilansowania energii w obiekcie odległym o 16 300 lat świetlnych.

• • •

Astronomowie i fizycy wiele sobie obiecują po obserwacjach fal grawitacyjnych. Mogą one otworzyć całkiem nowy dział astronomii. To jest jednak temat na osobny artykuł, który stosowniej będzie napisać, gdy fale grawitacyjne będą już odkryte. Opowiadanie o cudownych możliwościach narzędzi, które jeszcze nie zostały stworzone, ma w Polsce zdecydowanie złą tradycję.




**Rys. 5.** Schemat interferometru laserowego. Fala grawitacyjna zmienia odległości między rozdzielaczem promieni a zwierciadłami na wahadłach, a więc wytwarza różnice dróg optycznych między dwoma promieniami. Wskutek tego zmieniają się położenia prążków interferencyjnych wytworzonych przez promień odbity od zwierciadła $M_1$ i promień odbity od zwierciadła $M_2$. Zmianę położenia prążków rejestruje fotodioda.

*Andrzej Krasiński jest astrofizykiem w CAMK-u w Warszawie. Jego naukowe zainteresowania koncentrują się na teoriach kosmologicznych. W PA pisał o sprawie Galileusza i soczewkach grawitacyjnych.*