

# Astronomia fal grawitacyjnych

Sławomir Stachniewicz

14 III 2016

# 1. Ogólna Teoria Względności

Podstawowa idea: wszelki ruch określa się i mierzy względem innych określonych układów odniesienia. W odróżnieniu od STW są to dowolne układy, nie tylko inercjalne. Prawa fizyki mają identyczną postać matematyczną bez względu na układ odniesienia. **Zasada równoważności**: nie można lokalnie rozróżnić spadku swobodnego w polu grawitacyjnym od ruchu w układzie nieinercjalnym. Masa bezwładna i grawitacyjna są równoważne.

Obecność masy zakrzywia przestrzeń i dlatego poruszające się ciała mają tory zakrzywione ku tej masie. W ten sposób powstają przyspieszenia i jest to obserwowane jako działanie sił grawitacyjnych.

Pełny opis matematyczny OTW wymaga znajomości rachunku tensorowego i geometrii różniczkowej. Istnieje kilka prostych przewidywań:

- ⇒ zakrzywienie toru światła obok dużych mas (np. Słońce może odchylić światło gwiazd o 1,6 sekundy łuku)
- ⇒ spowolnienie ruchu zegarów w obecności pola grawitacyjnego – jedną z konsekwencji jest fakt, że światło emitowane z powierzchni masywnego ciała ma niższą częstotliwość, czyli większą długość; jest to efekt, który musi być uwzględniany m.in. w nawigacji GPS
- ⇒ anomalny ruch perycentrów (w przypadku peryhelium Merkurego jest to ok. 48 sekund łuku na stulecie)

⇒ istnienie czarnych dziur czyli ciał, z których powierzchni nic się nie może wydostać – nawet światło. Promień takiego ciała musi być mniejszy od tzw. **promienia Schwarzschilda** równego  $2GM/c^2$  (dla ciała o masie Słońca jest on równy ok. 3 km, dla Ziemi niecałe 9 mm).

## 2. Fale grawitacyjne

Równania pola Einsteina, opisujące Ogólną Teorię Względności, można zapisać jako

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

gdzie  $R_{\mu\nu}$  jest tzw. tensorem Ricciego,  $R = R^\mu{}_\mu$  jego zwężeniem (skalar krzywizny),  $g_{\mu\nu}$  tensorem metrycznym a  $T_{\mu\nu}$  tensorem energii-pędu. Równania te są silnie nieliniowe i **nie** obowiązuje w nich zasada superpozycji.

Można próbować badać tzw. **przybliżenie słabych pól** i sprawdzić, co się dzieje jeśli metryka nie odbiega zbytnio od metryki

Minkowskiego ze Szczególnej Teorii Względności  $\eta_{\mu\nu}$ . W tym celu można przyjąć, że

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

gdzie  $h_{\mu\nu}$  jest jakąś małą poprawką do metryki. Po wprowadzeniu nowej wielkości

$$\psi_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - g_{\mu\nu} h^\alpha{}_\alpha$$

i nałożeniu pewnych ograniczeń na wybór układu współrzędnych okazuje się, że małe zaburzenia czasoprzestrzeni Minkowskiego są opisywane **równaniami identycznymi z równaniami bezmasowego pola o spinie 2 w czasoprzestrzeni Minkowskiego**. Tłumacząc na polski: propagują się jak fala. Dlatego przypuszcza się, że **grawitony**, czyli hipotetyczne kwanty pola grawitacyjnego, są bezmasowe i mają spin równy 2.

### 3. Źródła i pośrednie dowody

Źródłami fal grawitacyjnych mogą być wszelkie gwałtowne procesy z udziałem masywnych, zwartych obiektów, w szczególności kolizje gwiazd neutronowych i czarnych dziur. Źródłem fal grawitacyjnych powinien być również Wielki Wybuch.

Wykrywanie fal grawitacyjnych jest niesłychanie trudne, dlatego najpierw były znane dowody pośrednie. Dwa szybko obiegające się obiekty powinny emitować fale grawitacyjne, wskutek czego orbita powinna ulegać powolnemu zacieśnianiu. W 1974 r. [R.Hulse](#) i [J.Taylor](#) wykryli taki efekt w pulsarze podwójnym [PSR B1913+16](#) (okres 7.75 godziny, skraca się o 76.5 mikrosekundy na rok). W 1993 roku dostali za to nagrodę Nobla.

W latach 1990. satelita ROSAT odkrył źródło rentgenowskie J0806. Okazało się, że jest to jeden obracający się lub dwa orbitujące wokół siebie białe karły. W 2004 r. teleskop Chandra obserwował ten układ w zakresie miękkich promieni X. Dzięki temu można było postawić hipotezę, że jest to układ dwóch bardzo bliskich białych karłów; odległość ok. 80 tys. km, masy ok. pół masy Słońca, okres obiegu nieco ponad 5 min. i zmniejsza się o ok. 1.23 milisekundy na rok.



## 4. Próby bezpośredniej detekcji

Wykrywanie fal grawitacyjnych jest bardzo trudne – przejście teoretycznie przewidywanych fal przez obiekt o długości 400 m skracałoby go o mniej niż  $10^{-19}$  m.

Pierwsze próby: lata 1960., **detektor Webera**. W próżni zawieszono cylinder o wadze ok. 1 tony i badano jego wibracje. Tego typu instalacja była w dwóch różnych miejscach. Pierwsze doniesienie o odkryciu fal grawitacyjnych pochodziło z 1969 roku, ale okazało się fałszywe. Nb. rzekomo wykryte oscylacje były o wiele rzędów wielkości większe od przewidywanych.

Kolejne detektory: podobna zasada, chłodzone ciekłym helum w celu usunięcia szumu termicznego.

Trzecia generacja: wykorzystanie [interferometrii](#). Dwie wiązki laserowe są wysyłane wzdłuż ramion interferometru i odbijane od zwierciadeł. Ewentualne zmiany w obrazie interferencyjnym mają świadczyć o zmianie długości ramion interferometru, czyli o przejściu fali grawitacyjnej.

Dość nieoczekiwanie w marcu 2014 r. eksperyment BICEP2 (badający mikrofalowe promieniowanie tła) stwierdził istnienie polaryzacji typu B w promieniowaniu tła. Miałyby to być pozostałość po falach grawitacyjnych wyemitowanych podczas fazy inflacyjnej. Pół roku później stwierdzono, że popełniono błędy metodyczne i przy opracowaniu pomiarów nie uwzględniono szumu pochodzącego od obiektów astronomicznych.

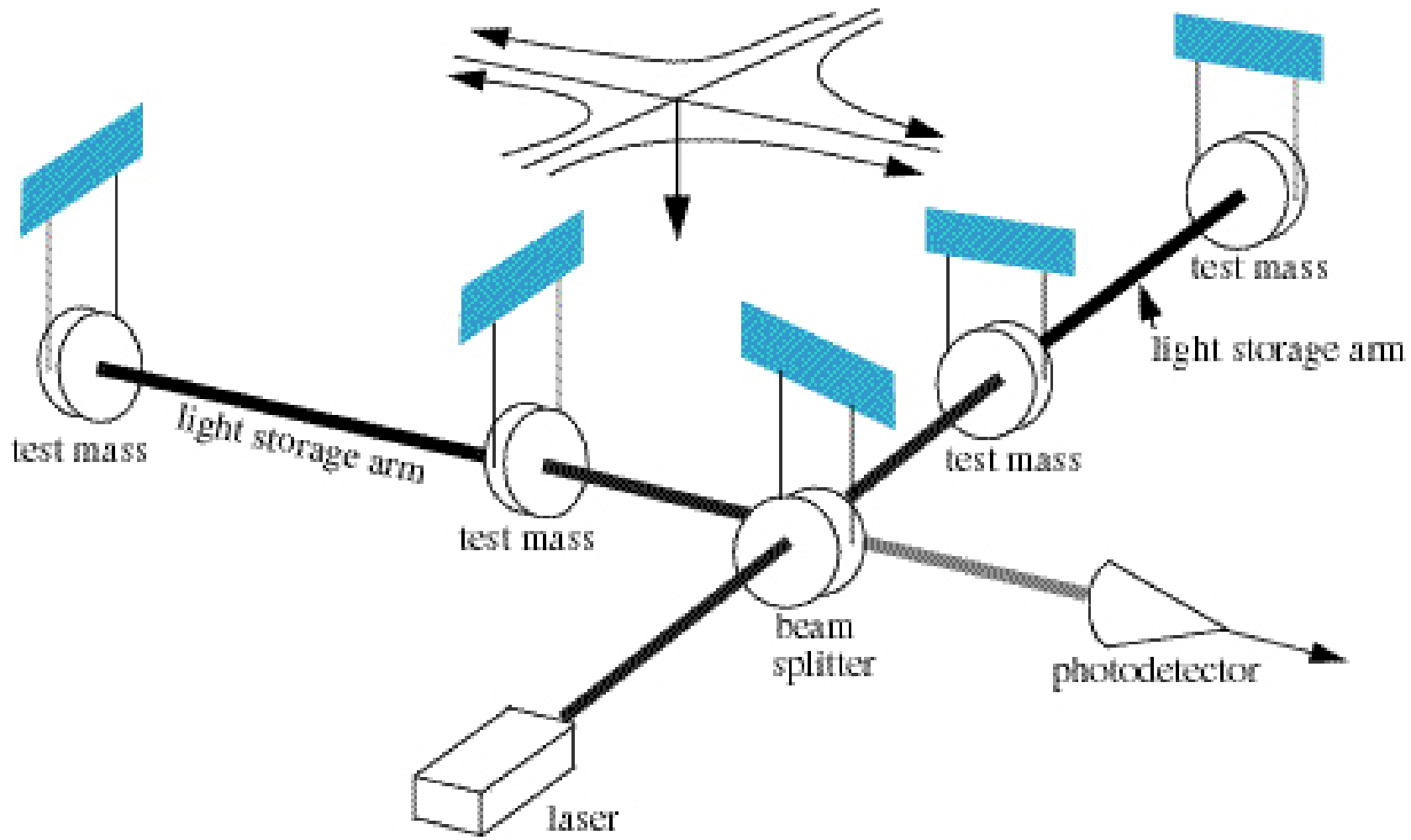
## 5. Długo oczekiwane odkrycie

14 września 2015 eksperyment **LIGO** zarejestrował przejście fali grawitacyjnej. Są to dwa identyczne detektory, umieszczone na przeciwległych krańcach USA, odległe o ok. 3000 km. Składają się z dwóch rur o długości 4 km i średnicy 2 m, w których panuje wysoka próżnia. Aby wydłużyć drogę, **wiązka jest odbijana w obie strony 100 razy**, po czym trafia do interferometru, w którym widać ewentualną zmianę różnicy dróg optycznych.

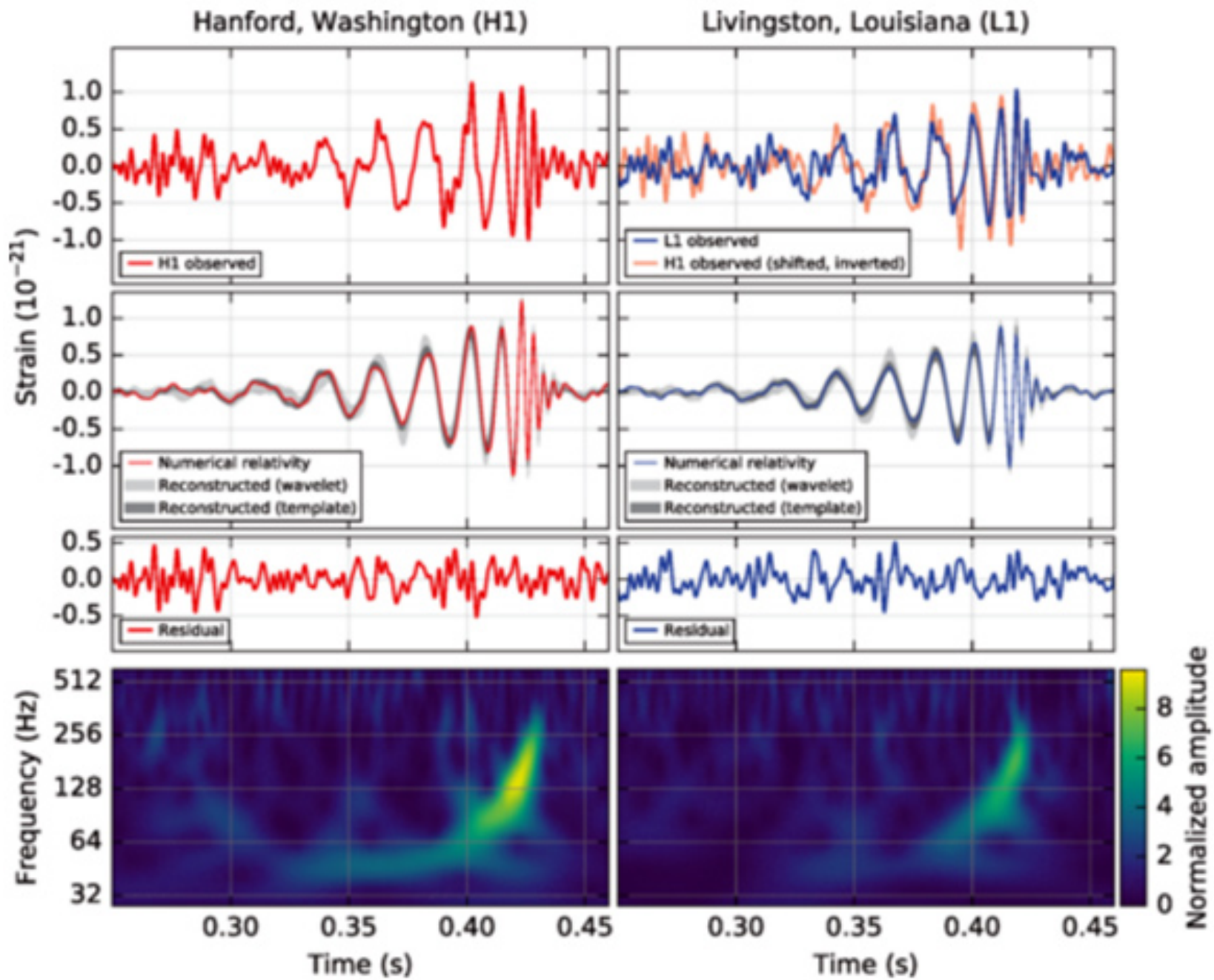
Aby zminimalizować zakłócenia (np. wstrząsy sejsmiczne, a nawet przelot samolotu), zastosowano wiele systemów tłumiących drgania. Służy temu również instalacja w dwóch odległych miejscach oraz specjalnie opracowane programy komputerowe, oddzielające szumy od rzeczywistych wyników.



Detektor LIGO z lotu ptaka



Schemat detektora LIGO



Słynny wynik pomiarów

Sensacyjny wynik opublikowano dopiero 11 lutego, czyli niemal 5 miesięcy po zarejestrowaniu. Chciano możliwie najlepiej zweryfikować dane, aby uniknąć losu poprzedników zmuszonych do odwoływania ich „odkryć”. Zdaniem specjalistów, źródłem fali było zderzenie czarnych dziur o masach ok. 29 i 36 mas Słońca, do którego doszło  $1.3 \pm 0.6$  mld lat temu.

Oprócz LIGO działają również inne detektory tego typu. Obecnie są to GEO600 (na północ od Hanoweru, współpraca niemiecko-brytyjska), VIRGO, TAMA 300 i MiniGrail. Planowane jest wybudowanie detektorów naziemnych AIGO i LCGT oraz satelitarnych LISA i BBO.

## 6. Perspektywy astronomii fal grawitacyjnych

Jeśli odkrycie zostanie potwierdzone przez kolejne pomiary (a wydaje się, że tym razem nie popełniono błędu, nb. pomiar wyróżniał się z tła na poziomie  $5.1\sigma$ ), będzie to oznaczać otwarcie nowego „okna” obserwacyjnego. Potencjalnie można będzie obserwować układy podwójne gwiazd neutronowych i czarnych dziur (być może również z udziałem supermasywnych czarnych dziur).

Fale grawitacyjne mogą również pochodzić z rozszerzania Wszechświata – Wielkiego Wybuchu i ewentualnej fazy inflacyjnej. Byłyby to **pierwotne fale grawitacyjne** – jedyne fale możliwe do zaobserwowania, pochodzące sprzed uwolnienia Kosmicznego Promieniowania Tła.