

Гравитационните вълни най-сетне засечени!

Деница Стайкова

Засичането на гравитационни вълни вече десетилетия наред е една от най-големите мечти на астрофизиката. Мистериозни и неуловими, родени от едни от най-зрелищните събития във Вселената, те носят в себе си обещание за ново измерение в познанието ни.

Също както подводните земетресения предизвикват вълни цунами, носещи се на хиляди километри към далечни брегове, така и мощта на някои астрофизични процеси предизвиква вълни

в тъканта на пространство-времето, които пренасят на огромни разстояния информация за източника си. За разлика от разрушителната сила на цунамито обаче гравитационните вълни са почти незабележими, поради което и откритието им бе посрещнато с такава радост от научната общност. Защото на 11 февруари 2016 г. говорители на LIGO (съкращение за лазерно-интерферометрична обсерватория за гравитационни вълни) обявиха пред света, че са засекли гравитационни вълни! Родени най-вероятно от бурното сливане на две черни дупки в трета, тяхното откритие сложи край на продължилата повече от 40 години битка с технологиите и постави началото на нова ера в астрофизиката – тази на гравитационната астрономия.

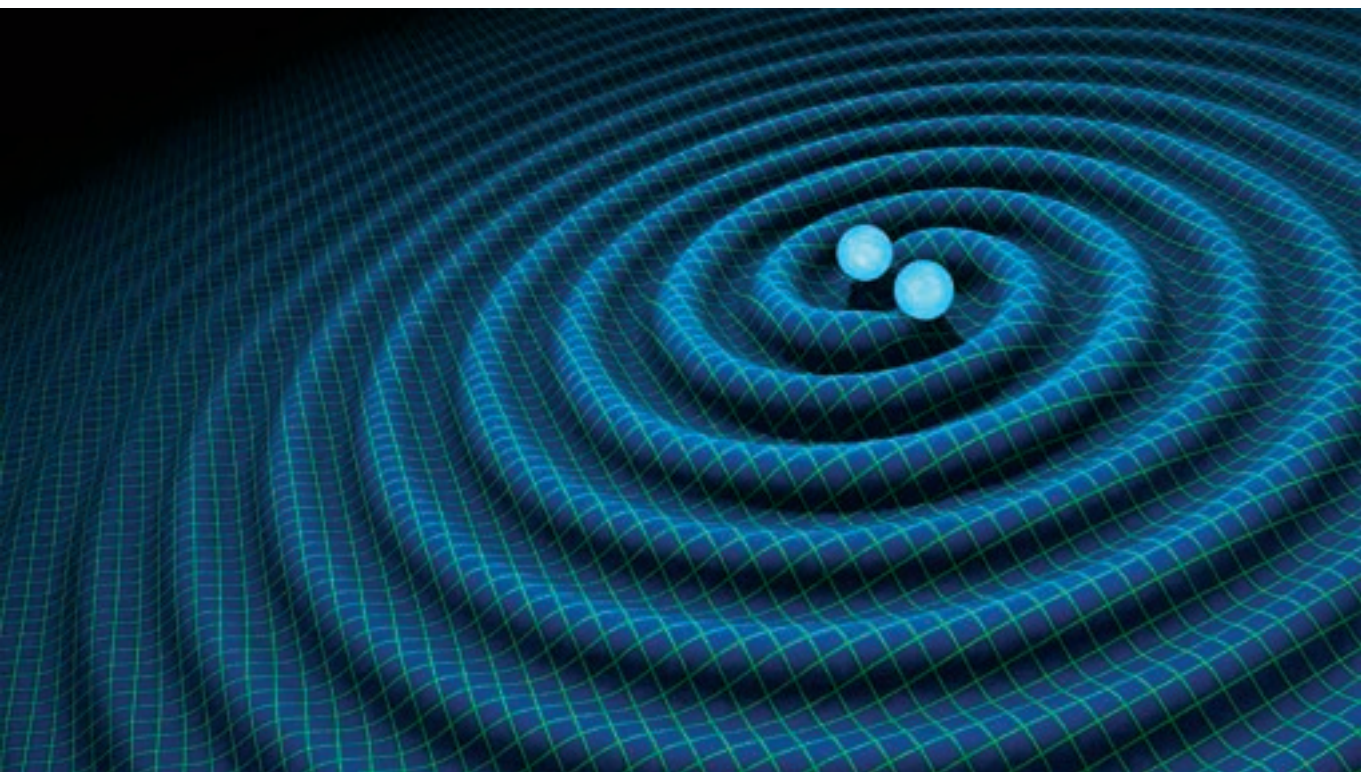
В рамките на първите 24 часа основната статия за откритието беше свалена

над 229 000 пъти. Освен нея същия ден бяха публикувани още 12 съпътстващи статии, а през цялата следваща седмица бяха проведени десетки академични семинари по темата в различни

точки на земното кълбо. За какво е целият този шум?

Гравитационните вълни са предгледани в работа на Алберт Айнщайн (Albert Einstein) през далечната 1916 г. като решения на линеаризираните едноименни уравнения в режим на слаба гравитация. Тогава той ги определя като незначителни поради изключително малката им амплитуда, непосилна за наблюдение с тогавашните технологии. Дълго след това тяхното съществуване е било поставяно под въпрос.

Доказателството идва през 1974 г. от изследването на система от две неутронни звезди, една от които пулсар (обяснението след малко). В двойната система PSR B1913+16, открита и наблюдавана от Джоузеф Теълър (Joseph Hooton Taylor, Jr.) и Ръсел Хълс (Russell Hulse), неутронните звезди обикалят толкова близо и бързо една око-



Артистична представа за сливането на две черни дупки. Когато две масивни тела се слоят, се отделя толкова много енергия, че успява да разлюлее пространство-времето и да предизвика изключително слаби гравитационни вълни, които могат да бъдат засечени на огромни разстояния от сливането. Източник: R. Hurt – Caltech/JPL

ло друга, че теорията на относителността предвижда постепенно намаляване на орбиталните им периоди заради загуба на енергия от системата, излъчена под формата на гравитационни вълни. Наблюденията потвърждават теорията с голяма точност и за работата си Хълс и Тейлър са удостоени с Нобелова награда през 1993 г. Но макар съществуването на гравитационните вълни да е доказано по неоспорим начин, за използването им за астрофизични цели са нужни още цели 100 години след работата на Айнщайн. Защо?

Първо, малко астрофизика. „Масата казва на пространство-времето как да се огъва, а пространство-времето казва на масата как да се движи.“ Това е цитат на извест-

ния американски астрофизик Джон Уилър (John Archibald Wheeler), известен като баща на термина „черна дупка“. Така той синтезира основния постулат на теорията на относителността, а именно, че масата изкривява пространство-времето. Колкото е по-голяма масата и по-малък радиусът ѝ (т.е. тялото е компактно), толкова по-голямо е изкривяването. Когато изключително масивни тела се движат релативистки (т.е. със скорости, близки до тази на светлината), те предизвикват вълни в пространство-времето, които наричаме гравитационни, и които се разпространяват със скоростта на светлината. Тяхната амплитуда е пренебрежимо малка, така че ефектът им в общия случай е незабележим.



Д-р Деница Стайкова работи в Института за ядрени изследвания и ядрена енергетика към БАН и основният ѝ изследователски интерес е численото моделиране на черни дупки и неутронни звезди.

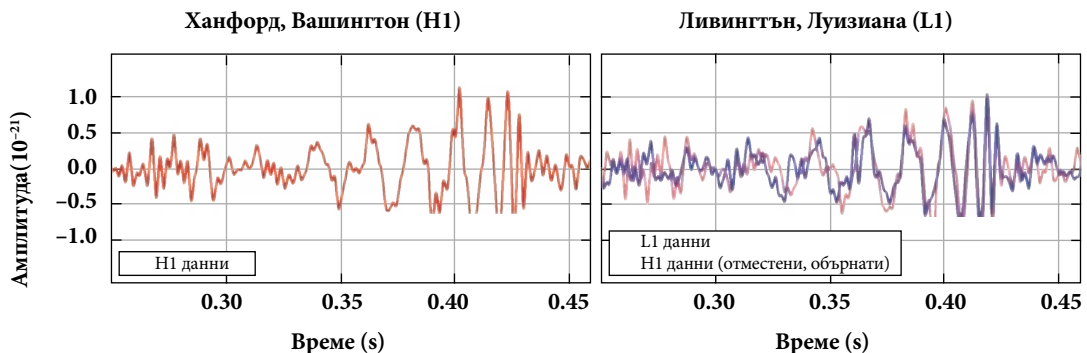
Когато обаче тялото е достатъчно масивно и движението му е достатъчно бурно, като например сблъсъкът на две масивни тела, тези вълни могат да бъдат засечени от изключително чувствителни детектори. Наблюдавали ли сме такива тела? Да.

Астрофизичните черни дупки са тъмни компактни масивни обекти, наблюдавани от астрономите в огромен диапазон от маси – от звездни черни дупки с маса от порядъка на 4 – 5 слънчеви маси (1 слънчева маса е равна на 2×10^{30} kg) до свръхмасивни черни дупки с милиони слънчеви маси, криещи се в центъра на галактиките, включително и на Млечния път. Теоретично, черните дупки са решения на уравненията на Айнщайн, имащи сингулярност (т.е. област, в която кривината на пространство-времето става безкрайна) в центъра си, скрита зад хоризонт на събитията, от който дори светлината не може да се освободи. За описанието на черна дупка са нужни само 2 параметъра – масата и въртенето ѝ.

Неутронните звезди са звезди в края на активния си живот, с маси в интервала 1,1 – 3 слънчеви маси и радиус около 10 km. Често притежават силни магнитни полета (тогава се наричат магнетари) или се въртят изключително бързо, излъчвайки подобно на космически фар лъч от електромагнитна радиация (т.нар. пулсари). Плътноста им е огромна, от порядъка на тази в атомните ядра, поради което представляват интерес не само за астрофизиката, но и за ядрената физика. Описанието им е много по-сложно, тъй като състоянието на веществото при подобни плътности не е ясно.

И неутронните звезди, и черните дупки са дълго изучавани в различни области на електромагнитния спектър – от радиовълни през видимата светлина чак до гама-вълните. В резултат, разполагаме с теоретични модели и съответни числени симулации, обясняващи много от техните характеристики. Но остават и много отворени въпроси, нуждаещи се от нов поглед. Поглед, за който са ни нужни нов тип инструменти, например телескопи, „виждащи“ гравитационни вълни.

Също както през XVII в. Галилео Галилей е отворил нов прозорец към Вселената, насочвайки телескопа си към небето, така и всеки нов тип телескоп ще доведе до качествено ново познание. Електромагнитните вълни страдат от едно важно ограничение – преди да достигнат до нас, преминават дълъг път, осеян с препятствия, с които си взаимодействат – чрез абсорбция, дифракция, гравитационно пречупване и т.н. Преимуществото на гравитационните вълни е, че ни носят пряка информация за източника си, без да бъдат деформирани от взаимодействия по пътя си. Макар и изключително трудни за наблюдение, те са преки свидетели на едни от най-мощните събития във Вселената. Събития, които трудно могат да бъдат видени чрез електромагнитни вълни, защото или не ги излъчват изобщо, или са скрити зад много



Амплитудата на гравитационната вълна, наблюдавана в двата детектора H1 и L1 като функция на времето. Двата сигнала съвпадат изключително добре в рамките на нужната точност. Амплитудата h е отношението на наблюдаваното изменение в дължината на рамото към дължината на рамото на детектора, или $h = \Delta L / 2L$. Източник: Abbott et al. (2016)

материя и/или силни полета, пречещи ни да видим източника.

Но да се върнем на откритието. Анализът на сигнала, засечен от двете обсерватории на LIGO в Ханфорд, Вашингтон (H1) и Ливингстън, Луизиана (L1) на 15.09.2015, показва с голяма вероятност, че е излъчен от система от две въртящи се черни дупки съответно с маси: 29 и 36 слънчеви маси и радиуси от порядъка на 100 – 150 km. Двата масивни обекта са в крайна фаза на сливането си и „пред очите“ на детекторите те се сблъскват и се ражда нова, сравнително бързо въртяща се черна дупка с маса 62 слънчеви маси и параметър на въртене $a = 0,67$ (т.е. 67 % от скоростта на максимално въртяща се черна дупка).

В сигнала се отличават ясно три етапа:

1. Сближаване: Когато две компактни масивни тела образуват двойна система, те прекарват дълъг период на спокойно обикаляне около общия си център на масите. Рано или късно обаче те се приближават толкова, че привличането им става неустойчиво. В този период, наричан спираловидно сближаване, двете тела скъсяват разстоянието помежду си все по-бързо и драматично, излъчвайки все повече

енергия под формата на гравитационни вълни. Последните няколко орбити от това сближаване са именно първият етап, видян от LIGO с начална честота 30 Hz и начално ефективно разстояние между черните дупки около 350 km. Системата в този етап се описва със сравнително близка до познатата ни Нютонова физика.

2. Сливане: След около 0,4 секунди навлизаме в същинския сблъсък и сливане на двете черни дупки. То се случва за около 20 милисекунди с максимална честота 150 Hz. През този етап системата се описва със силно нелинейните уравнения на Айнщайн и пиковата ѝ светимост в гравитационни вълни се равнява на 200 слънчеви маси за секунда, огромна енергия, с която за 20 милисекунди сливането засенчва енергетично цялата видима Вселена.

3. Затихване: Последният етап е експоненциално-затихващо звънене на новородената черна дупка (нейните квазинормални честоти). Той продължава също милисекунди и се описва с т.нар. линеаризирана теория на пертурбациите. Именно от честотата в края учените получават параметрите на крайната черна дупка (маса и въртене), а от амплитудата на грави-

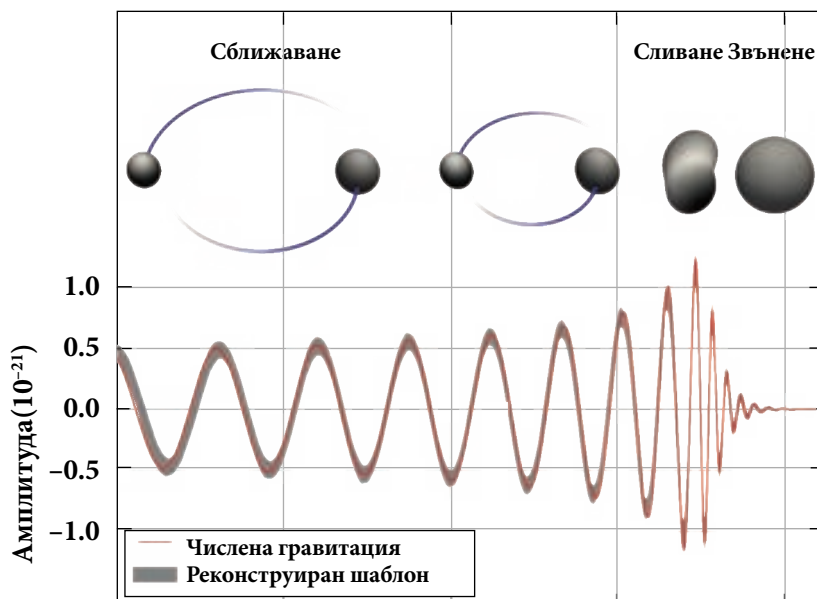


Схема на сливането на двете черни дупки, видени като функция на амплитудата h . Различават се 3 фази: а) спирално сближаване, при което относителната скорост на черните дупки расте (до 0,6 пъти скоростта на светлината), а разстоянието между тях намалява до 0, б) сливане и в) звънене. Източник: Abbott et al. (2016)

тационната вълна – разстоянието до източника ѝ – 410 мегапарсека. Това значи, че събитието се е случило преди 1,3 млрд. години. От разликата между масите на началните черни дупки и крайната се съди, че общата енергия, излъчена от системата под формата на гравитационни вълни, е 3 слънчеви маси.

Какъв е ефектът, отчетен на Земята от това невероятно мощно сливане? Максимумът на амплитудата на отместване, дължащо се на гравитационните вълни в детектора, е ... $h = 10^{-21}$! Или за всеки метър от дължината на детектора пространство-времето се е разпънало и свило с 10^{-21} метра, или около 1/1000 от радиуса на протона. Как бихме могли да наблюдаваме подобно отместване? Време е да представим звездата на вечерта – лазерния интерферометър!

Пътят на LIGO започва преди почти 50 години. Първият лазерен интерферометър е предложен от Михаил Герценштейн и Владислав Пустовойт в Москва и независимо няколко години по-късно от Джоузеф Уебър (Josef Weber) и Рей Уайз (Ray Wise) в САЩ. През 1972 г. Уайз успява да идентифицира всички фундаментални източници на шум, които биха попречили на работата на лазерния интерферометър, и определя методи, за да ги елиминира. Скоро след това прототипи на такива интерферометри са направени в лаборатории в САЩ, Германия и Шотландия. През 1980 г. Националната научна фондация на САЩ финансира първите два прототипа (40-метров и 1,5-метров), а през 1990 г. одобрява строежа на два 4-километрови интерферометъра – в Ханфорд, Вашингтон, и Ливингстън, Луизиана. Развитието на про-

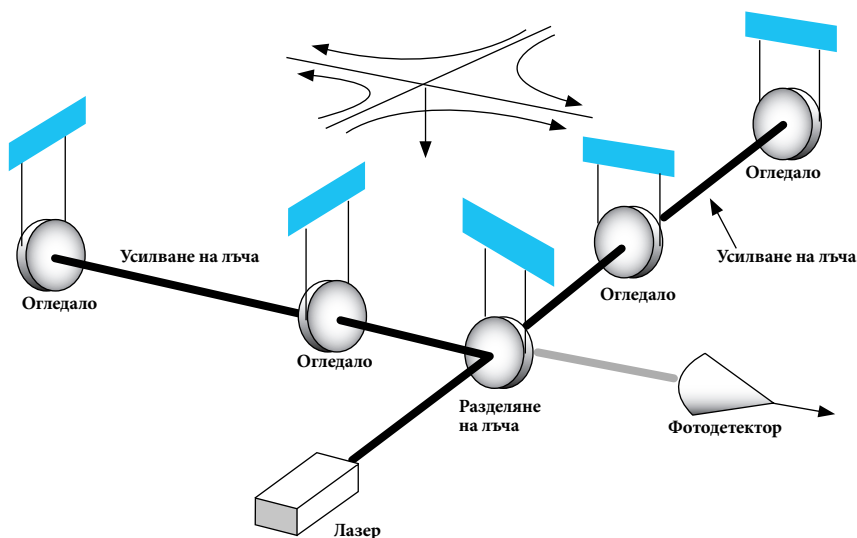


Схема на гравитационния интерферометър. Лазерният лъч се разделя и се пуска по двете рамена на детектора. След многократно отражение между двете двойки огледала във всяко рамо, целящо увеличаването на мощността на лазерния лъч, двата лъча се събират отново и се изпращат към фотодетектор. Когато през рамената на детектора мине гравитационна вълна, тя нарушава фино настроената интерференция между двата лъча и в детектора се засича фотосигнал. Източник: Wikipedia

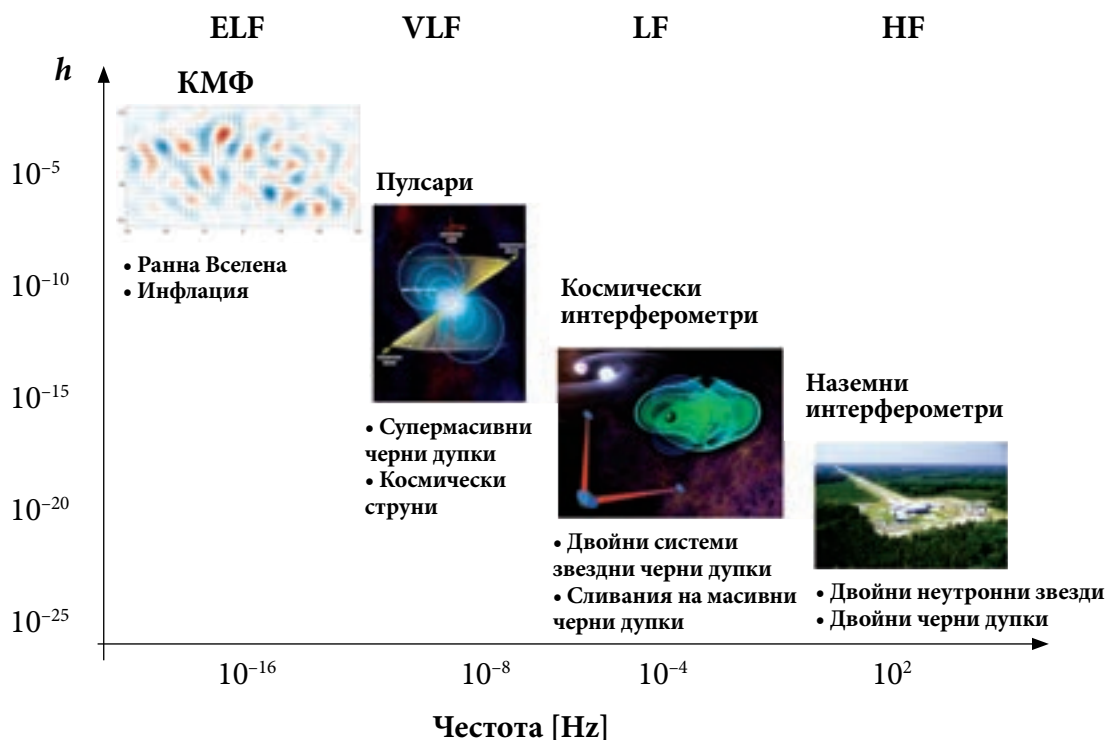
екта минава през 3 фази: начална (2000 – 2005), подобрена (2009 – 2010) и напреднала (от 2015 г.), през които точността на детекторите се подобрява. Данните, събрани от тях, са публикувани в над 75 статии, от които едва последните 12 с положителни резултати. В момента колaborацията LIGO наброява около 1000 учени, от 75 институции от 15 нации по целия свят. Общата инвестиция в детектора надхвърля 1,1 млрд. долара.

Как работи лазерният интерферометър? Тъй като очакваното отместване, дължащо се на гравитационни вълни, е изключително малко (10^{-18} – 10^{-21}), то изисква изключително прецизна технология за неговото измерване. Ако вземем за пример Слънцето и най-близката до него звезда, Проксима Центавър, намираща се на 4,24 светлинни години от нас ($\sim 4 \times 10^{16}$ м), LIGO

трябва да може да измери това разстояние с точността на човешки косъм (около 20 микрона). Как се постига тази невероятна точност?

Всеки от детекторите на LIGO има формата на буквата Г с дължина на рамената от по 4 км. Най-общо принципът му на работа е следният. Лазерен лъч се разделя на две и се пуска по двете рамена на детектора, в края на които има двойка масивни огледала. След многократно отражение лъчите се събират и изпращат към фотодетектор. Лъчът е така разделен, че вследствие на деструктивна интерференция във фотодетектора да не достига никаква светлина. Ако през детектора премине гравитационна вълна обаче, вследствие на свиването и разпъването на пространство-времето светлината в двете рамена ще измине различен път, интерференцията ще се наруши

Голямата картина на гравитационната астрономия



Голямата картина на гравитационната астрономия. На фигурата са показани различните планирани детектори на гравитационни вълни: а) от космическия микровълнов фон (МКФ), б) пулсарни времеви матрици, в) космическите интерферометри и г) наземните интерферометри, както и събитията, които те ще изучават. Източник: NanoGrav

и на изхода ще се наблюдава фотосигнал. Схемата е проста, но истинското предизвикателство е в детайлите.

Тъй като очакваното отместване е изключително малко, всеки шум или смущение може да поречи на работата. Това значи, че трябва да бъдат отстранени или отчетени шумове от сеизмичен, квантов, гравитационен, термичен, оптичен и браунов характер. Например: в тунела в ултрависок вакуум са поставени многобройни сензори, следящи за всевъзможни смущения, огледалата са окачени на електронна система от 4 махала, която постоянно

коригира окачването на огледалата, така че те да са идеално неподвижни. Отчита се дори, че при тази точност отразяващият слой на огледалата проявява квантови ефекти. Самите огледала тежат 40 kg и имат най-високия известен отражателен индекс. За да се избегне фотонният шум, ефективната мощност на лазера е 100 киловата, като целта е да бъде достигнат 1 мегават.

А как протича експериментът? Данните от фотодетектора се събират непрекъснато и се сравняват с оценката на шума в момента. На всеки 3 минути

различни алгоритми претърсват данните и определят потенциалните събития, като отстраняват шума от експерименталните данни и ги сравняват с шаблони за възможни събития, получени чрез методите на числената гравитация. При съвпадение се проверява дали другият интерферометър е засякъл същото с необходимото отместване във времето. Ако сигналът премине всички проверки, се разпраща съобщение до учените от колаборацията, които да се включат в анализа на данните.

За наблюдаването на 14.09.2015 г. събитие вълните пристигат първо в L1, а 7 ms по-късно (или точно времето, нужно на вълна, движеща се със скоростта на светлината, да премине разстоянието между L1 и H1) достигат и до H1. При сравняването на двата сигнала се вижда, че те съвпадат с голяма точност и събитието се отчита като сигнал от гравитационни вълни.

След месеци на обработка на данните резултатът е:

- първо засичане на гравитационни вълни от наземен детектор
- първо пряко наблюдение на сливане на две черни дупки, и то в интервал 30 – 70 слънчеви маси
- първи тест на теорията на Айнщайн за сливане в динамични условия на екстремна гравитация
- раждане на изцяло нова област в астрофизиката.

Какво е бъдещето на гравитационната астрономия? Освен интерферометрите L1 и H1 на LIGO в момента работи и GEO 600 в Германия (който не е работел в момента на събитието), довършва се подобряването на VIRGO в Италия, както и започването на работа на KAGRA в Япония. Планирано е и изграждането на LIGO в Индия. Всичко това говори за бляскаво бъдеще на наземната гравитационна астрономия.

Наличието на повече детектори води до по-добра локализация на сигналите, което ще е от полза при търсене на съпътстващ електромагнитен сигнал с наличните ни телескопи. Сигнал за слабо гама-избухване, съвпадащо с наблюдаваното гравитационно събитие, бе докладвано от гама-обсерваторията Fermi и вече се проучва. Перспективите пред съвместно използване на гравитационни, електромагнитни и даже и неутринни телескопи (като ANTARES и ICECUBE) са огромни.

Нов етап в изследванията ще отвори и мисията за космически лазерен интерферометър (LISA). Началната ѝ фаза (LISA Pathfinder), спонсорирана от Европейската космическа агенция, бе изстреляна успешно тази година. Работи се интензивно и по търсенето на гравитационни вълни чрез пулсари (мисията NanoGrav).

Всички тези експерименти ще се допълнят взаимно и ще ни позволят да погледнем в различни части от гравитационния спектър, също както правим с електромагнитния. Ще можем да изучаваме началните етапи от развитието на Вселената и може би ще разберем що е то тъмна енергия. Ще изучаваме свръхмасивните черни дупки в центъра на галактиките и може би ще „осветлим“ тъмната материя. Освен тях ще се наблюдават сливания на черни дупки и неутронни звезди, избухването на свръхнови и техният колапс към черни дупки или неутронни звезди (или нещо друго?), звездотресенията на неутронни звезди, както и процесите, водещи до внушителните астрофизични струи във всякакви мащаби. Предстои ни да надникнем в най-съкровениите тайни на Вселена. Както казва Габриела Гонзалес, говорител на LIGO:

„Извървахме много дълъг път, но това е само началото. Сега можем да започнем да слушаме Вселената“. ■