

Първите преки наблюдения на гравитационни вълни

Пламен Физиев

Половината от сумата на Нобеловата награда е присъдена на Рейнер Вейс за това, че (по думите на Дейвид Шумакер - говорител на колаборацията LIGO) той е човекът с най-голям принос откритието да се случи, предлагайки в продължение на десетилетия идея след идея, работейки неуморно, за да могат много хора да се включат в тази научна авантюра, считайки, че дори и най-гребният проблем заслужава внимание, ако води към успеха. „Райнер спечели тази награда“, пише Дейвид Шумакер.

Работата по построяване на двата детектора LIGO отнема около 40 години теоретични и експериментални изследвания и разнообразни проби на поколения учени

Нобеловата награда по физика за 2017 г. беше присъдена на трима учени от САЩ – Рейнер Вейс от Масачузетския технологичен институт (МТИ), Бари Бариш от Калифорнийския технологичен институт (Калтек) и Кип Торн от Калтек за „техния решаващ принос за построяването на детекторите на гравитационни вълни LIGO и първото пряко наблюдаване на гравитационни вълни“, както гласи изключително прецизната формулировка на Нобеловия комитет.

и инженери от много страни, без приноса на които това епохално откритие би било невъзможно.

Втората половина от сумата на Нобеловата награда е разделена между Бари Бариш и Кип Торн. По думите на Дейвид Рейтце, сегашен директор на LIGO, в началото на 90-те години проектът изпитвал големи трудности поради изключителна-

та му сложност. Тогава Бари Бариш поема ръководството на проекта и от относително малкия колектив от Калтек и МТИ изгражда мощна организация (огромен международен колектив, наброяващ над 1200 учени и инженери от над 60 института от десетки страни), способна да построи двете обсерватории за гравитационни вълни и

детекторите LIGO край Ханфорд и край Ливингстон, да ги подготви за работа и да ги накара да работят по необходимия начин. Бари Бариш е архитектът на колаборацията LIGO. Той направи LIGO реалност.

Пак по думите на Дейвид Рейтце, през 80-те и 90-те години на миналия век Кип Торн е имал разбирането, интелекта, търпението и твърдата решимост да доведе LIGO от обща концепция до реалност, като се преодоляват съмненията на много учени, че това наистина е възможно, поради огромната сложност на проекта. Кип Торн е известен физик теоретик. Той дълбоко разбира структурата и работата на интерферометрите LIGO. Неговата група провежда основополагащи изследвания за разбирането и потискането на разсейването на светлината, за природата на топлинния шум, дифракцията на лазерния сноп в оптичните кухни, както и за създаването и използването на



Рейнер Вейс



Кип Торн и Бари Бариш



Двете обсерватории на гравитационни вълни на колаборацията LIGO в САЩ.

Изображението е направено с използване на данни, софтуер и Web-средства, поучени от The LIGO Open Science Center (<https://losc.ligo.org>), a service of LIGO Laboratory, the LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration. Колаборацията LIGO е основана от Националната научна фондация на САЩ (NSF). Колаборацията Virgo е основана от Френския национален изследователски център (CNRS), Италианския национален институт за ядрена физика (INFN) и Датският институт (Nikhef) с приноси на полски и унгарски институции

специални квантови състояния на светлината, които повишават чувствителността на интерферометрите.

Прецизната формулировка на Нобеловия комитет за наградата по физика за 2017 г. отразява ясното разбиране на етапа, на който днес се намират изследванията на гравитационните вълни и реалните постижения в тази област. По този въпрос има неразбиране и необосновани твърдения не само в популярната литература, но често и в сериозните научни публикации, в които теоретични хипотези и очаквания се представят често като „доказани факти“. Не

случайно във формулировката на Нобеловия комитет няма нито дума както за теориите, обясняващи наблюдаваните гравитационни вълни, така и за моделите на техните източници.

Същността на откритието, което според автора на тази статия е най-значителното в областта на гравитационната физика след откриването на гравитационното поле от Исаак Нютон през 17-ти век, е следната:

Исаак Нютон на базата на експериментално изучаване на движението на телата в близост до земната повърхност, на движе-

нието на Луната около Земята, както и на движението на планетите около Слънцето, установява наличието на гравитационно поле, свързано с телата, които са негови източници, и открива „закона за всемирното гравитационно привличане“. В рамките на съществуващата по негово време, а и няколко века по-късно, експериментална и наблюдателна точност, законът на Нютон обяснява изключително добре всички известни явления от този род в земни условия и в небесната механика. По същество откритията на Нютон са начало на съвременната наука.

Сега за пръв път колаборацията LIGO наблюдава пряко гравитационни вълни - принципно ново гравитационно явление, извън рамките на теорията на Нютон. Тези вълни представляват променливо гравитационно поле, откъснало се от своите източници и свободно движещо се в пространството с течение на времето. Това епохално откритие е база за съществено ново развитие на много области на съвременната фундаментална наука, не само на изследванията на гравитацията.

Основните, нерешени засега, въпроси са **два:**

1. Коя е правилната теория на гравитацията, която описва вече наблюдаваните гравитационни вълни в рамките на съвременната точност?

2. Каква е истинската природа на техните източници?

И по двата проблема съществуват значителен брой различни хипотези и модели, които очакват експериментална и наблюдателна проверка в рамките на достъпната ни точност. Тази проверка ще има решаващата дума като единствен критерий за истина в природните науки.

За целта е необходимо натрупване на повече наблюдения и данни с повишена точност, както и разработване на нови методи за обработка на данните и за тяхната интерпретация. В момента се работи много активно по тези две основни теми.



Проф. дфмн Пламен Физиев е дългогодишен преподавател по теоретична физика в СУ „св. Климент Охридски“, водещ научен сътрудник в Лабораторията по теоретична физика на Обединения институт за ядрени изследвания (ОИЯИ), Дубна и Председател на управителния съвет на Фондация Теоретична и изчислителна физика и астрофизика на СУ “Св. Климент Охридски”.

Но да се върнем към част от историята и по-подробното описание на откриването на гравитационните вълни.

Необходимостта от тяхното съществуване става ясна веднага след откриването на крайната скорост на разпространение на физичните процеси в природата, ограничена от крайната скорост на разпространение на светлината, което влиза в противоречие както с нютоновата механика, така и със закона за всемирното гравитационно привличане.

Това експериментално откритие довежда до теорията на електромагнетизма на Максвел, която предсказва съществуването на електромагнитните вълни. Те са сравнително бързо открити експериментално от Хенрих Херц.

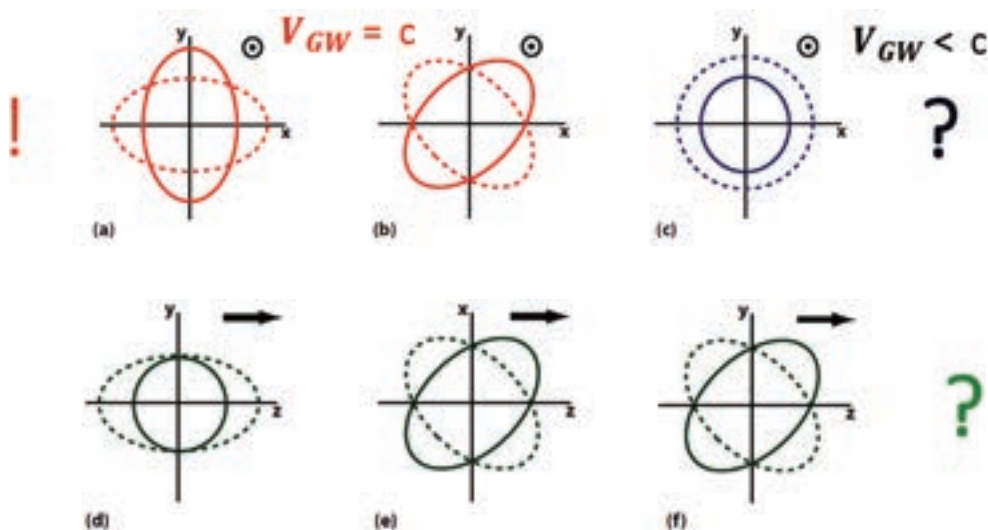
Без това фундаментално откритие не можем да си представим съвременната

цивилизация, основана на пренос и разпространение на информация чрез електромагнитни вълни и безбройните им приложения в техниката и бита.

Един от основните изследователи на теорията на електромагнетизма, Оливер Хевисайд, в неговата двутомна монография „Електромагнитната теория“, издадена през 1893 г., поставя въпроса за съществуването на гравитационни вълни, разпространяващи се със скоростта на светлината и предлага първата теория на такива вълни. За гравитационни вълни пишат също Хендриг А. Лоренц през 1900 г. и Анри Поанкаре през 1905 г. И двамата свързват съществуването на гравитационни вълни с крайната скорост на разпространение на физичните взаимодействия, но не предлагат конкретна теория на тези вълни. Те също обосновават възгледите си с това, че по закона на Нютон гравитацията се разпространява мигновено, т.е. с безкрайна скорост, което противоречи на релативистката теория и на електродинамика.

Първият много успешен опит за построяване на релативистична теория на гравитационните вълни е направен от Алберт Айнщайн през 1916 – 1918 г. след повече от 9 години работа върху създадената, главно от него, обща теория на относителността (ОТО). Основният физичен аргумент отново е, че гравитационното взаимодействие трябва да се разпространява с крайна скорост не по-голяма от тази на светлината.

ОТО предсказва не само съществуването на гравитационни вълни, но и това, че те се разпространяват точно със скоростта на светлината, имат (за разлика от електромагнитните вълни) тензорен характер като вълни на метриката на пространство-времето и са свързани с две физични степени на свобода на гравитационното поле в ОТО, определящи две възможни напречни поляризации на гравитационните вълни, т.нар. „+поляризация“ и „×поляризация“. Тези вълни се движат перпендикулярно на равнината Оху.



Схематично изобразяване на поляризацията на гравитационните вълни: при скорост на разпространение по оста Oz (насокена е към нас и е маркирана с малки кръгчета с точка), равна на скоростта на светлината за „+поляризация“ (a) и „×поляризация“ (b); при скорост на разпространение по оста Oz, по-малка от скоростта на светлината (c); при разпространение на вълните по оста Ox – в случая със скорост, по-малка от скоростта на светлината (d), по оста Oy (e) или Ox (f) със скорост, равна на скоростта на светлината

Поради тази причина антените за приемане и излъчване на гравитационни вълни не са диполи (като познатите ни от радиотехниката тънки метални пръчки или жици), а квадруполи, т.е. две, пресичащи се под ненулев ъгъл, антени. В детекторите на LIGO е избран прав ъгъл между двете рамена на антената, а за антени се използват мощни лазерни интерферометри. Тази идея е предложена през 1962 г. от съветските учени Герценщайн и Пустовойт. За да се сумират сигналите от двата детектора LIGO, с което се повишава общата им чувствителност, двете рамена на антените им са разположени в практически успоредни направления. Това обаче прави невъзможно определянето на поляризацията на наблюдаваните гравитационни вълни, а по този начин и проверката на тази част от предсказанията на ОТО.

Веднага трябва да отбележим, че многобройните обобщения на ОТО, съществуващи днес, предсказват гравитационни вълни с повече видове поляризации. Някои от тях се разпространяват със скорост, по-малка от тази на светлината, или пък по оста Ох или Оу. Проверката на броя на поляризициите на наблюдаваните гравитационни вълни би отсяло възможните теоретични модели. Обаче за целта е необходимо да разполагаме най-малко с 5 детектора от типа на LIGO, разположени на различни места по земната повърхност и с различни ориентации на антените. Вероятно това ще стане реалност след около 10 години, когато се реализират проектите за построяване на подобни детектори в Япония, Индия, Китай, Австралия и възможно в Русия. Изпълнението на някои от тези проекти вече е в ход, а други все още се планират.

От август 2017 г. започна да работи детекторът VIRGO на Европейския съюз с водещи страни Франция и Италия. Той се намира около гр. Пиза, но неговите параметри все още не достигат тези на LIGO поради финансови ограничения. Независимо от това, той даде значителен принос в изучаването на последните две регистрирани

събития с гравитационни вълни, в едно от които се наблюдаваха и гравитационни вълни, най-вероятно получени от сливането на две неутронни звезди.

Особено интересен в последния случай е фактът, че събитието беше наблюдавано за пръв път и от около 70 астрономически обсерватории, в това число – спътниците, във всички части на електромагнитния спектър (в радио, оптичен, инфрачервен, ултравиолетов, рентгенов и гама диапазони), което позволи: **Първо**, да се определят с невъзможна преди това точност положението на източника и разстоянието до него. **Второ**, да се сравни и покаже съвпадението – с огромна точност, на скоростта на наблюдаваните в това събитие гравитационни вълни с тази на светлината и по такъв начин да се отхвърлят редица теоретични модели. **Трето**, да се наблюдават за пръв път ядрени реакции, водещи до образуването на тежки елементи при сливане на неутронни звезди, в това число злато с обща маса около 5 земни маси(!) и т.н. чак до уран. Това потвърди една от основните астрофизични хипотези за възникването на тежките елементи в природата.

Ще напомним на читателя, че най-разпространените елементи във Вселената са водородът и хелият. Образуването на по-тежки елементи – от лития до въглерода – става в хода на ядрените реакции в обикновените звезди от типа на Слънцето и при образуването на т.нар. бели джуджета. Но образуването на значителни количества от елементи, по-тежки от желязото, е практически невъзможно при тези процеси. Можем да твърдим, че съвместното наблюдение на гравитационни и електромагнитни вълни от един и същ източник разкри механизма на образуване на тежките елементи във Вселената.

Какви данни се получават всъщност от интерферометрите LIGO и VIRGO? Техните антени представляват съвременни интерферометри на Майкелсон-Перо, които измерват промяната на дължината на двете рамена в резултат от преминаването на

гравитационни вълни. Тези вълни пренасят толкова малка енергия, че самият Айнщайн е считал, че наблюдаването им е невъзможно. Ефектът на относителната промяна на дължината на рамената е фантастично малък: 1, делено на число с 21 нули след единицата. В абсолютни единици при LIGO това е около една хилядна от размера на ядрото на водородния атом – т.е. на протона. Никога досега науката не е разполагала с технологии, способни да измерват такива малки промени на дължината, и точно това е един от мотивите за Нобеловата награда по физика 2017 г.

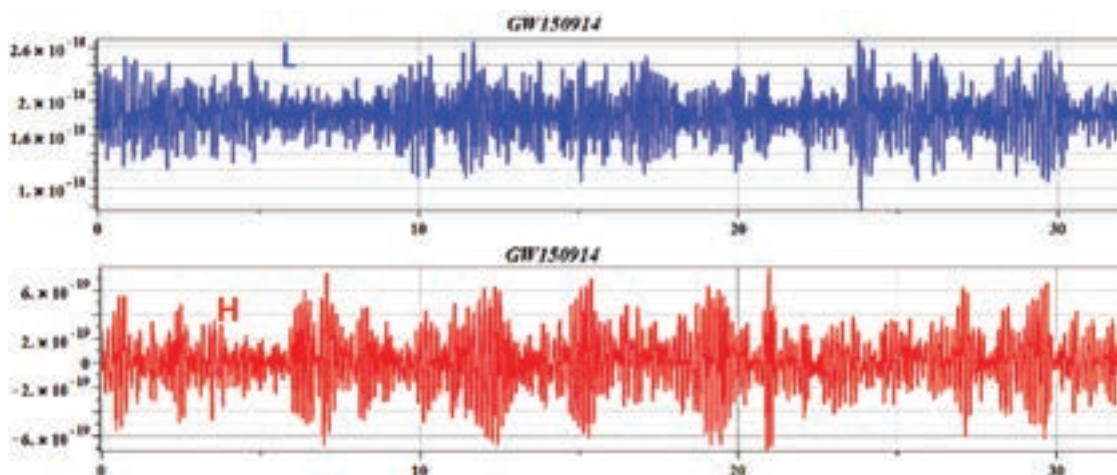
Но това технологично постижение е решение само на една малка част от многобройните проблеми. Защото всяко наблюдение на гравитационни вълни е уникално и не може да се повтори. Това прави невъзможно общоприетото намиране на експерименталните грешки по статистически път чрез многократни измервания при еднакви условия.

Освен всичко друго измерванията са повлияни от голям брой случайни фактори, наричани най-общо „шумове“ с най-различна природа. Причините за някои от тях са известни, например: вариации на напрежението в електрическата мрежа, топлинни и квантови шумове, шумове от сеизмичен

характер, от мънии по цялото земно кълбо, от прелитане на самолети, шумове от помпи на вакуумни инсталации и т.н., та дори от кацането на птици по някои открити устройства на интерферометрите. Голям брой от наблюдаваните шумове са с неизяснена природа и извън всякакъв контрол.

При първото наблюдение на гравитационни вълни в резултат от измерванията чрез двата детектора LIGO се получава сигнал, който варира с течение на времето. Някъде в него е скрит и сигналят, дължащ се на гравитационна вълна, но той е над 10 000 пъти по-слаб от шума и трябва да се отдели от него, за да може да се забележи. Използваните досега методи на многократно филтриране на шума и отделяне на полезния сигнал, макар и много сложни, си остават доста груби и очевидно замазват съществена част от информацията, например наличието или отсъствието на така наречените квазинормални моди, които са „отпечатъци на пръстите“, т.е. идентификаторите на източниците на гравитационни вълни.

Засега се счита, че най-ефективният метод за откриване на сигнала от гравитационна вълна е сравняването му с теоретичните шаблони за такива сигнали,

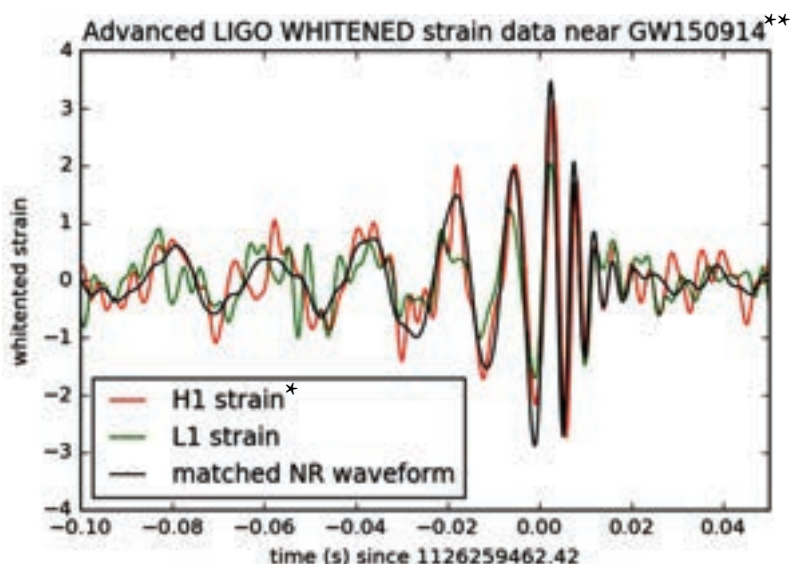


Регистрирани сигнали при първото наблюдение на гравитационни вълни чрез двата детектора LIGO

получени от численото решаване на уравненията на Айнщайн. Както всички числени резултати и тези шаблони съдържат неизбежни числени и систематични грешки, а изработването им изисква голямо и скъпо машинно време на най-мощните суперкомпютри. Ограничени са и възможностите за пресмятания при разни стойности на параметрите.

Всъщност за около 50 години развитие числената гравитация, основана засега само на ОТО, успя да реши донякъде задачата за движение на две идеализирани тела в ОТО, повече известна като задача за поведението на две черни дупки. Дефиниционна характеристика на черните дупки е наличието на хоризонт на събитията, заграждащ вътрешната им област, от която не могат да излизат никакви физични сигнали. Такъв хоризонт до момента не е наблюдаван никъде във Вселената, а числените изследвания на черни дупки изискват методи, които всъщност изключват неговото пряко третиране. Пълното разглеждане на тези въпроси е извън рамките на тази статия, но споменаването им е задължително, за да се разбере общият физичен проблем с черните дупки, а също и формулировката на Нобеловата награда за 2017 година.

Както се вижда **от изображението на чистия сигнал**, съответствието на получения от числени пресмятания най-добър шаблон с две черни дупки за първото наблюдавано събитие GW150914 е сравнително приемливо само в изключително тесен интервал от време – няколко стотни от секундата. При това е направено макси-



* Strain – деформация, предизвикана от гравитационна вълна

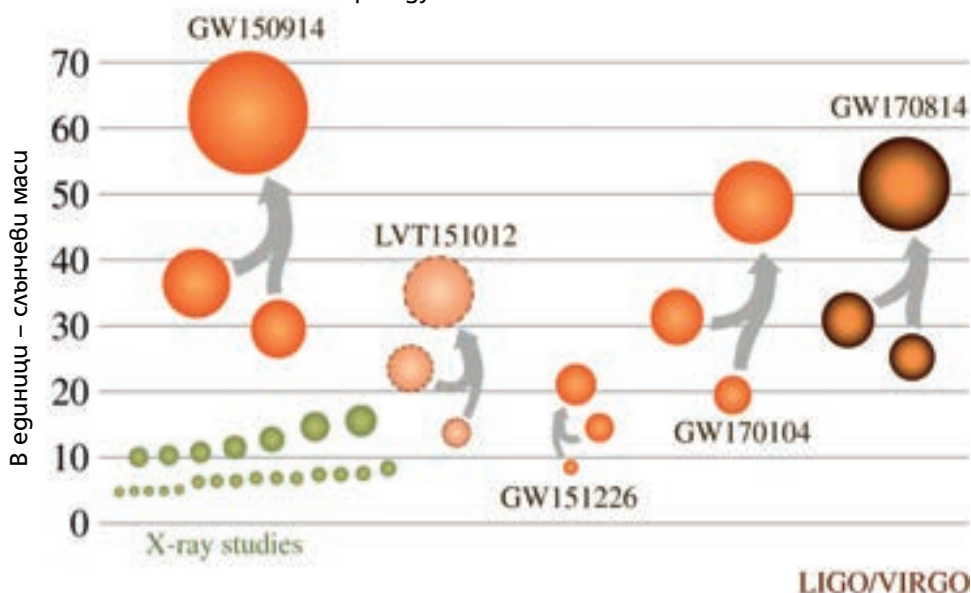
** Филтрирани данни около събитие GW150914, получени от LIGO

Сигналът, който се дължи на гравитационните вълни, получен след изчистване на страничния шум. Червената и зелената линия показват сигнала, регистриран от двата интерферометъра, а черната линия показва изчисления вид на сигнала от шаблона

малното възможно нагласяване на данните (червена и зелена линия от двата интерферометъра и шаблона - черната линия). Беше показано, че третирането като чист „шум“ на очевидните разлики между най-добрия шаблон и реалните данни до голяма степен е несъстоятелно и си остава засега необяснено.

Най-големият проблем на подхода, свързан с анализа на наблюденията чрез шаблони е, че по този начин се залага предварително хипотезата, че става дума именно за процес с участие на математическите черни дупки на ОТО, което не е доказано по никакъв независим начин. Този метод не позволява да се отчетат многобройните, донякъде изследвани, други възможности. Например в редица обобщения на ОТО съществуват други типове свръхкомпактни, тежки и много тъмни обекти с външни характеристики, много близки до тези на черните дупки на ОТО, но без хоризонт на събитията.

Черни дупки с известни маси



Как изглеждат резултатите от интерпретацията на наблюденията като сливане на две черни дупки, заедно с техните най-основни параметри – маси на изходните черни дупки и маса на получената от сливането им по-голяма черна дупка. Долу, вляво, са изброени кандидатите за черни дупки, регистрирани с други астрофизични методи

Затова основен проблем си остава да се установи истинската природа на източниците на наблюдаваните гравитационни вълни, макар че най-разпространената засега версия ги свързва със сливането на две черни дупки, описвани от ОТО.

Както се вижда, масите на черните дупки като възможно обяснение на източници на наблюдаваните гравитационни вълни са значително по-големи от масите на кандидатите за черни дупки на ОТО, наблюдавани с други астрофизични методи. Това е нерешен въпрос на теорията на черните дупки.

Могат да се поставят още редица въпроси към интерпретацията на вече наблюдаваните гравитационни вълни. Например доколко теоретичното приближение с участието само на две тела – чисти черни дупки от ОТО, описва реалността. В природата такива чисти черни дупки не се наблюдават, а т.нар. астрофизични черни дупки са обкръжени от много материя, която не се отчита в числената гравитация и прави пресмятанията многократно по-сложни и нереализирани до сега. Започна и интензивно изследване на подобни процеси в теориите на гравитацията, обобщаващи

ОТО, като резултати се очакват в близките няколко години.

Последната добра новина е, че колаборацията LIGO «разсекрети» данните от досегашните наблюдения, както и компютърните програми за тяхната обработка. Това беше направено на Първата работна среща по гравитационни вълни в Калтек в края на месец март 2018 г. от т. нар. група „Отворена научна колаборация LIGO“ (<https://losc.ligo.org/about/>). В тази среща взе участие и авторът на настоящата статия заедно с още 40 учени, които засега са извън колаборацията LIGO.

С предоставяне на достъп до данните и програмите на колаборацията LIGO се увеличила многократно перспективите за истинско участие в това грандиозно международно научно усилие.

Без преувеличение можем да кажем: Най-интересното наистина започва сега!

До края на 2018 г. се очаква да завърши поредното обновяване на детекторите LIGO и усъвършенстване на методите за обработка на данните, така че ни чакат нови открития и може би решаване на останалите нерешени проблеми. ■

Плъхове в помощ на медицинската диагностика



В началото на 21 в. от научните списания стана известно, че един вид южноафрикански плъхове могат да бъдат обучени да откриват успешно заровени в почвата военни мини. Това е видът *Cricetomys ansorgei*, известен и с популярното си английско име Гигантски торбест плъх (Giant pouched rat). Той наистина има внушителни размери и е един от най-едриите представители на съвременните плъхове на Земята. Тялото му достига до 40 – 45 см. дължина, а теглото му – до 1.5 kg. Разпространен е в голям брой африкански страни на юг от Сахара до Конго. Обучението на плъховете е извършвано главно в Аграрния университет в Сокоин (Танзания) с подкрепата на международната организация АРОРО и на белгийския специалист Барт Вийтенис (Bart Weetjens). Съобщава се, че до 2016 г. обучени гигантски торбести плъхове са открили успешно около 20 000 мини, заровени в земята в страни от Централна Африка и Югоизточна Азия и така са предотвратили смъртта на стотици или хиляди хора.

С цел да се проверят възможностите на гигантските торбести плъхове и за откриването на някои заболявания на човека и животните медицински сътрудници от университета в Сокоин (Танзания) извършвали различни експерименти с тях след 2005 г. В продължение на почти 10 години. И през м. април, 2018 г. екипът от изследователи, ръководен от г-р Жорж Мзого (George Mgode), публикува в сп. „*Pediatric Research*“ статия за резултатите от своите

изследвания, озаглавена „Откриване на детска туберкулоза, използвайки обучени гигантски торбести плъхове“ („*Pediatric tuberculosis detection using trained African giant pouched rats*“). В статията авторите пишат: „Всяко заболяване, особено органично, има свой мирис“ и посочват, че причинителят на туберкулозата *Mycobacterium tuberculosis* излъчва 13 специфични летливи вещества, различни от тези на другите болестотворни микроби. Обучението на плъхове за разпознаване на

тези вещества започва от 4 месечна възраст и продължава до 9 месечната им възраст. Обучените животни можели да разпознаят наличието на туберкулозно заболяване за много по-кратко време в сравнение с микроскопската лабораторна диагностика. Д-р Мзого посочва, че плъховете могат да „диагностицират“ около 100 проби от слюнка на болни от туберкулоза пациенти за по-малко от 20 минути, докато микроскопската диагностика изисква много повече време.

Като доказателство за надеждността на използването на обучени плъхове за диагностика на туберкулозата авторите на метода са извършили и следните допълнителни проучвания. През периода 2011 – 2015 г. те са изследвали общо 55 000 проби от слюнка на пациенти от различни клиники в Танзания за наличие на туберкулоза чрез двата метода – микроскопска диагностика и обучените плъхове. Чрез микроскопска диагностика били открити 8350 положителни проби, а обучените плъхове установили 2745 случая повече, т. наг 11 000 положителни случаи. Авторите на статията уверяват, че засега обучени гигантски торбести плъхове се използват успешно за откриване на туберкулоза в Танзания и Мозамбик, предвижда се скоро да се използват и в Етиопия и очакват утвърждаването на метода и от Световната здравна организация (СЗО).

По Science News