Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Л. Белопухов, Черные дыры существуют, *Квант*, 2021, номер 3, 2–11

DOI: <https://doi.org/10.4213/kvant20210301>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.162.27.143

26 апреля 2023 г., 13:22:46

Черные дыры существуют

Л. БЕЛОПУХОВ

НОБЕЛЕВСКАЯ ПРЕМИЯ ПО ФИЗИКЕ 2020 года – это официальное признание астрономией и физической космологией факта существования черных дыр.

Три года назад (2017 г.), когда Нобелевская премия была присуждена за регистрацию гравитационных волн, в официальной формулировке еще не было упоминания о черных дырах. Однако во всех комментариях по поводу той премии говорилось, что наблюдаемая гравитационная волна была рождена миллиард триста миллионов лет назад столкновением двух черных дыр.

К названию «черная дыра», введенному в научный оборот физиком Дж. Уилером в 1967 году, все уже привыкли. А благодаря научно-популярной литературе, фантастическим кинофильмам и компьютерным забавам эти слова становились знакомыми чуть ли не с детсадовского возраста. Уже очень необычны эти космические объекты. Среди многих эпитетов, которыми их награждали, самым безобидным было «бездонные творения Вселенной». А другие – такие, как «космические монстры», «по-

жиратели звезд», «невидимые убийцы», поневоле привлекали внимание. И действительно, необычны. И не то необычно, что большая масса притягивает к себе другие массы, а то, что она абсолютно невидима, не светится ни в каком диапазоне, от гамма-излучения до радиоволн.

Так если она невидима, то как же можно утверждать, что она существует? Но ведь и электрон невидим. А его существование косвенно доказывает и электрический ток, и фотоэффект, и атомные спектры, и все полупроводниковые устройства. То, что невидимый объект можно все же обнаружить, было ясно тем ученым, которые мысленно представили себе возможность существования такого объекта. Мы сейчас говорим: гипотеза родилась «на кончике пера теоретика».

За последние годы, несмотря на гипотетичность существования черных дыр, было опубликовано много серьезных научных статей и книг, но особенно много научно-популярных. Из научно-популярных статей следует выделить статью астронома и популяризатора науки В.Г. Сурдина в интернетовской энциклопедии «Кругосвет». При сравнительно небольшом объеме в ней изложена история астрономических

DOI: <https://doi.org/10.4213/kvant20210301>

Нобелевские лауреаты по физике 2020 года: Р. Пенроуз, А. Гез, Р. Генцель

догадок о черных дырах, четко и полно рассмотрены важнейшие свойства черных дыр. Этой статье уже больше 10 лет, и в ней, естественно, не отражены самые новейшие исследования, а главное, триумф окончательного признания существования черных дыр. Часть этого материала изложена В.Г.Сурдиным в его более поздних прекрасных популярных лекциях, с которыми легко ознакомиться в интернете.

В этой «нобелевской» статье будут приведены лишь самые основные сведения о черных дырах. По-видимому, первым из тех, кто выдвинул гипотезу о существовании черных дыр, был английский естествоиспытатель и священник Джон Мичелл (1724–1793). Он был вдохновлен ньютоновской теорией всемирного тяготения, в особенности тем, что тяготение представлялось ему (как и Ньютону) «некоторым наиболее неуловимым божественным духом» (цитата из послесловия Ньютона к его «Началам»). Все другое, что изучал Ньютон, имело свои видимые причины – пружинки деформировались под действием внешней силы, пушечное ядро летело под действием пороховых газов. А вот невидимое и неосязаемое тяготение проникает во все тела и заставляет их притягиваться друг к другу, как бы далеко они ни находились. Фактически Ньютон впервые ввел понятие силового поля. Но мало известно, что он задолго до Фарадея и Максвелла относил это понятие не только к гравитации, но и к притяжению и отталкиванию электрически заряженных тел.

В 1783 году Мичелл послал письмо, а затем и выступил на заседании Лондонского Королевского общества со следующим сообщением. Хорошо зная и понимая ньютоновскую механику и закон всемирного тяготения, Мичелл оценил ту скорость, которую нужно придать телу, чтобы преодолеть тяготение планеты (или звезды). Он назвал эту величину *скоростью убегания*. По-современному – это вторая космическая скорость. Квадрат этой скорости прямо пропорционален массе притягивающего объекта и обратно пропорционален его радиусу. И Мичелл впервые попробовал применить это понятие к свету. Он

знал, что скорость света очень большая. По измерениям астронома О.Рёмера, сделанным им еще в 1676 году в результате наблюдения за движением спутников Юпитера, она равна 214000 км/с (более точное значение 300000 км/с). Мичелл приравнял эту скорость к скорости убегания и вычислил массу и радиус воображаемой звезды, которая своим притяжением удерживала бы испускаемый ею свет. Считая ее плотность такой же, как средняя плотность Земли, он получил для радиуса этой звезды величину порядка 250 солнечных радиусов. А тот факт, что ничего подобного на небе не наблюдается, тем и объясняется, что она не отпускает свет от себя. И искать ее нужно не по ее свечению, а по действию на другие звезды и планеты. Но ученое сообщество не приняло гипотезы Мичелла, поскольку движение планет (законы Кеплера) уже было прекрасно объяснено Ньютоном для всех известных тогда планет и влияния какого-то огромного тела нигде не обнаруживалось.

Через 12 лет знаменитый французский математик, физик и астроном Пьер Симон Лаплас (1749–1827) в своем труде «Изложение системы мира» рассмотрел гипотезу Мичелла и в заключение повторил его вычисления. Правда, из последующих изданий этого труда Лаплас исключил это рассмотрение. В отличие от Мичелла (и Ньютона) Лаплас считал свет не частицами, а волнами и понимал, что нельзя так просто применять к свету закон всемирного тяготения.

На протяжении всего 19-го века астрономы не интересовались проблемой «невидимых звезд» Мичелла и Лапласа. И только в 20-м веке, после создания А.Эйнштейном общей теории относительности (ОТО), астрономы вспомнили о них. Первым был немецкий математик, физик и астроном Карл Шварцшильд (1873–1916). В 1915 году он присутствовал на эпохальном заседании Прусской академии наук, где Эйнштейн сделал сообщение о своей только что законченной (он потратил на нее шесть лет) работе – общей теории относительности. Фактически это была новая теория тяготения, в которой ньютоновский закон

был всего лишь частным случаем, приближенно применимым к слабым гравитационным полям. Главной идеей в докладе Эйнштейна было утверждение, что тяготение – это проявление искажения пространства-времени объектами, имеющими массу и (или) энергию. В качестве астрономического подтверждения своей гипотезы Эйнштейн произвел приближенный расчет наблюдаемого смещения перигелия орбиты Меркурия, которое ньютоновская теория не могла объяснить.

Шварцшильд был покорен математической красотой новой теории тяготения, и за последний год своей жизни он сумел выполнить несколько теоретических работ. В двух из них были получены первые точные решения полевых уравнений ОТО – так называемые внутренние решения для не вращающегося массивного шарообразного однородного тела и внешнее решение для пространства вокруг сферически симметричного тела. Из этих решений вытекала возможность существования «невидимой звезды». Вот почему некоторые термины из теории черных дыр носят имя Шварцшильда. Прежде всего, это радиус Шварцшильда (или радиус горизонта событий) – условный размер сферического массивного объекта, делающий его невидимым. Самое удивительное, что этот размер в точности совпал с величиной, получающейся из классического выражения для второй космической скорости, если приравнять ее к скорости света c в вакууме: $R = 2GM/c^2$, где M – масса притягивающего объекта, а G – гравитационная постоянная.

Сам Эйнштейн, хоть и одобрил появление этих работ, не стал развивать их дальше. Дело в том, что решения Шварцшильда приводили к нестационарности поведения материи внутри звезды, которая стала невидимой, и к появлению точки с бесконечно большой плотностью в ее центре – так называемой сингулярностью. А Эйнштейн считал, что решения ОТО должны быть стационарными и не допускать сингулярности. И только работы бельгийского священника, астронома, космолога и математика Жоржа Леметра (1894–

1966) и русского математика, физика и геофизика А. Фридмана (1888–1925), опубликованные в 1922–1924 годах, убедили Эйнштейна, что ОТО не противоречит возможности существования нестационарной расширяющейся Вселенной и наличию сингулярности при ее рождении. Но проблемой существования объектов с теоретически возможной в их центрах бесконечной плотностью стали заниматься другие ученые.

Таким образом, проблема коллапсаров, как стали называть невидимые звезды, оказалась тесно связанной с проблемой возникновения и развития Вселенной. Большой вклад в теорию рождения Вселенной внес Г.Гамов (1904–1968), введший в обиход термин «Большой взрыв» по отношению к возникновению Вселенной из точки сингулярности. Задача решения уравнений ОТО применительно к коллапсарам привлекала к себе астрофизиков, хорошо владевших математикой. В их числе были астрономы Ф.Цвикки и В.Бааде, физики Р.Оппенгеймер и Х.Снайдер, астрофизик С.Чандрасекар. Большой вклад в решение этой проблемы внесли российские ученые А.Черепашук, Я.Зельдович, И.Новиков, А.Старобинский. В 1960-е годы был опубликован ряд работ, в которых решались уравнения ОТО для все более и более сложных случаев. Новозеландский ученый Р.Керр получил решение для вращающейся черной дыры сферической формы, а английский астрофизик Р.Пенроуз решил задачу для вращающейся черной дыры произвольной формы. Тогда же и появилось впервые это название «черная дыра» (Дж.Уилер). И оно мгновенно заменило все прежние названия.

В это время астрономы открыли пульсары – звездные объекты большой массы, но очень маленького размера, их стали называть нейтронными звездами. И в 1963 году впервые появилось подозрение, что отжившая свой срок звезда после стадии сверхновой может превратиться не только в нейтронную звезду, но и в черную дыру (если у нее будет достаточная масса). Выдающимся событием в астрофизике ста-

ла разработка С. Хокингом термодинамической теории черных дыр. Казалось, что черная дыра нарушает законы термодинамики, неограниченно повышая свою энтропию при поглощении масс. Но С.Корн, Я.Зельдович и С.Хокинг показали, что черной дыре должна соответствовать некоторая абсолютная температура и она обязана излучать энергию.

Вначале было непонятно, как связать это с главным свойством черной дыры – ничего не отпускать от себя, быть полностью невидимой. С.Хокинг разработал квантовый механизм потери массы черной дыры. По квантовым представлениям, около горизонта событий черной дыры вследствие принципа неопределенностей могут появляться виртуальные фотоны. При этом может быть отличной от нуля вероятность превращения такого фотона в пару частица-античастица. И по законам сохранения импульса и энергии одна из них вернется в черную дыру, а другая будет стремительно удаляться и сможет навсегда расстаться с ней. Черная дыра будет «худеть». Хокинг назвал это гипотетическое явление «испарением черной дыры». Это достижение Хокинга можно считать эпохальным в развитии физики. Подтвердилось, что законы физики нельзя рассматривать изолированно. Для объяснения сугубо макроскопического явления, связанного с черными дырами, необходимо было привлечь квантовую механику и стандартную модель, которые были разработаны для микромира.

Оказалось, что черная дыра – неустойчивая, неравновесная система. Понятие абсолютной температуры для нее не вполне точное. Но грубо ее можно оценить как $T = 10^{29}/M$, где M – масса черной дыры (в килограммах). Легко убедиться, что для черных дыр с массами порядка солнечной массы абсолютная температура составляет доли одного кельвина, а для гигантских черных дыр она равна 10^{-7} К, т.е. практически равна абсолютному нулю. При «испарении» черной дыры масса ее уменьшается, следовательно, температура увеличивается и возрастает скорость потери ею массы. В конечном счете черная

дыра может исчезнуть полностью. Были подсчитаны мощность излучения черной дыры, скорость потери массы и время ее существования. Последнее определяется формулой $\tau = 2 \cdot 10^{18} M^3$, где M – масса черной дыры (в килограммах). Из этой формулы видно, что для черных дыр с массой порядка массы Солнца время существования составляет огромную величину, на много порядков большую возраста Вселенной. Любопытно, что перед запуском суперколлайдера БАК появилось много спекуляций на тему рождения в нем мини-черных дыр. Но даже если эти гипотезы и окажутся верными, то легко подсчитать, что время существования таких объектов будет столь ничтожным, что они никак не смогут представлять собой опасности для человечества.

Астрономы заметили у предполагаемых черных дыр странное явление. Когда обнаружится так называемый аккреционный диск – вращающийся по спирали огромный плазменный диск вещества, втягиваемого черной дырой, то по оси его вращения были обнаружены тонкие стержни плазмы, стремительно (со скоростями, близкими к скорости света) удаляющиеся от черной дыры. Это явление тормозит нарастание массы черной дыры. На каком-то расстоянии от дыры эти струи становились неустойчивыми и разбивались на отдельные участки. Явление получило название *джетов* черной дыры.

Теоретическое объяснение джетов заключается в рассмотрении сложного по своему характеру переменного магнитного поля, рождаемого аккреционным плазменным диском. Возникающее при этом вих-

Втягивание вещества в аккреционный диск и джеты

ревое электрическое поле и разгоняет плазму до релятивистских скоростей. Положительно заряженные частицы двигаются в одну сторону, отрицательно заряженные – в другую. Кроме того, по этим направлениям двигаются и фотоны – гамма-частицы огромных энергий, рождающиеся при столкновениях плазменных частиц. Получается очень красивая картина грандиозного космического объекта. И сегодня уже обнаружено несколько сотен таких «картинок». Но эта красивая картина может означать и смертельную опасность для тех объектов, которые окажутся на пути джетов. Но тем не менее появились и фантастические проекты использования энергии джетов для межзвездных перелетов. Теория образования джетов – это область магнитогидродинамики, и она очень сложна. Одна из последних моделей была рассчитана в лаборатории фундаментальных и прикладных исследований релятивистских объектов Вселенной Московского физико-технического института.

Разрабатывались и сценарии возникновения черных дыр. Главный сценарий – это прохождение цикла угасания достаточно массивной звезды через стадии: сверхновая – белый карлик – нейтронная звезда – черная дыра. Таково происхождение черных дыр с массами порядка до 100 солнечных масс. Один из вариантов – образование двойной звезды, когда черными дырами становятся либо обе звезды, либо одна из них. Только в одной нашей галактике – Млечном Пути – теоретически можно ожидать десятки или даже сотни миллионов черных дыр, примерно по одной на каждую тысячу звезд. Накопилось несколько сотен таких «кандидатов» в черные дыры. Сегодня можно считать их уже не кандидатами, а полноправными членами семейства черных дыр.

Другой тип черных дыр – это реликты ранней стадии рождения Вселенной. Теория этого этапа рождения Мира еще только начинает создаваться, но астрофизики все больше склоняются к мнению, что в центре каждой галактики должна быть сверхмассивная черная дыра – с массой порядка 10^7 – 10^8 солнечных масс. Почему

же ближайшая такая черная дыра в центре Млечного Пути была открыта только в последние годы? Понятно, ведь она была надежно укрыта от наблюдения теми объектами, которые она притягивает, прежде всего пылегазовыми облаками, сквозь которые было очень нелегко измерять параметры движения звезд около центра галактики. Но все-таки две группы астрономов сумели справиться с этой задачей. После почти двадцатилетней работы было доказано, что многие звезды около центра нашей галактики движутся под действием мощного притягивающего объекта, самого по себе невидимого. Их орбиты подчиняются закону тяготения. Несомненно, что этот центр – черная дыра. Определена и ее масса – 4,3 миллиона солнечных масс. Свет от нее доходит до нас через 26 тысяч лет. Предполагается, что ближе к «краю» Вселенной, где находятся самые ранние свидетели ее возникновения, должны существовать и одиночные черные дыры, еще не ставшие галактиками. И, как уже сказано выше, могут существовать (рождаться в природных «ускорителях» и погибать) многочисленные микроскопические черные дыры.

Десять лет назад создалась странная ситуация. Астрономы не могли еще ручаться, что их наблюдения надежно свидетельствуют о существовании черных дыр. А теоретики-астрофизики занимались теорией их возникновения и предсказывали все новые особенности этих объектов. И было много ученых, которые не верили в черные дыры, а теоретические работы о них считали ошибочными. Только вот конкретных ошибок они не могли найти в этих работах, для этого нужно было очень серьезно изучить общую теорию относительности. И остается только преклоняться перед упорством и мужеством тех теоретиков, которые занимались черными дырами. Их вдохновлял упорный труд астрономов, которые совместно с инженерами, создателями астрономической аппаратуры, в том числе и спутниковой, во второй половине прошлого века начали глобальный штурм неба, все более и более детально изучая каждый его участок.

Первые подозрения, что черные дыры все-таки существуют, появились еще в 1964 году, когда суборбитальный высотный зонд зарегистрировал сильное рентгеновское излучение, испускаемое источником, получившим имя Cygnus X3 в созвездии Лебедь. Как выяснилось из многочисленных более поздних наблюдений, этот объект представлял собой систему из вращающихся вокруг общего центра масс черной дыры с массой 15 солнечных масс и голубого сверхгиганта с 19 солнечными массами. Эта пара находится от нас на довольно большом расстоянии 6700 световых лет, но все же ближе центра нашей галактики (26000 световых лет). А что же излучало рентгеновские фотоны? Скорее всего, внутренняя часть аккреционного диска перед поглощением ее черной дырой. По расчетам теоретиков, температура там достигает миллионов градусов. Для равновесного излучения (по закону Вина) максимум излучения как раз и приходится на рентгеновский диапазон. Но возможно, что в это излучение дает свой вклад и излучение джетов.

В 1960-х годах возникла загадка квазаров. К 1964 году было уже найдено несколько этих таинственных небесных объектов, находящихся очень далеко (по первым оценкам на расстоянии больше 10 миллиардов световых лет), но тем не менее наблюдаемых (главным образом радиотелескопами). Термин «квазар» (quasar) – это приближенная аббревиатура от их первого официального названия **quasi-stellar radiosource** (квазизвездный радиоисточник). Развитие радиоастрономии позволило открыть (и пронумеровать) сотни тысяч квазаров. Трудно назвать самый мощный из них, поскольку обработка наблюдений с трудом поспевает за автоматической регистрацией. На сегодня (начало 2021 года) – это зарегистрированный 17 июня 2020 года квазар с очень длинным регистрационным обозначением, содержащим 23 символа: SDSSJ140821.67+025733.2. Этот источник излучает в одну секунду энергии больше, чем, например, наше Солнце излучает за несколько сотен лет! Только поэтому его и можно заметить, хотя он находится от нас на расстоянии свыше 13 миллиардов све-

товых лет (на «краю» Вселенной). Его масса – 0,2 триллиона солнечных масс.

Главной загадкой квазаров была огромная величина излучаемой ими энергии. В 1964 году, когда было известно всего несколько гораздо менее мощных квазаров, после публикации об открытии в нашей галактике таинственного объекта, напоминающего гипотетическую черную дыру, независимо друг от друга советский ученый Я.Зельдович и американский астрофизик Э.Соллитер впервые сделали предположение о механизме излучения от квазаров и черных дыр (вернее, от вещества, падающего в черную дыру) и произвели оценочные расчеты возможной мощности этого излучения. Им тогда мало кто поверил. Ведь они опередили официальное признание черных дыр больше чем на пятьдесят лет! Сегодня излучение квазаров объясняется (по Зельдовичу) излучением аккреционных дисков вокруг центра молодой галактики, являющегося мощной черной дырой. Многие из них «съедают» все вещество вокруг и становятся тогда полностью ненаблюдаемыми объектами. Галактика с приведенным выше длинным номером регистрации 13 миллиардов лет назад была активно «работавшей». И она была поистине огромной – ее горизонт событий, или, что почти то же самое, внутренний диаметр ее аккреционного диска, имел размер, сопоставимый с размером Солнечной системы.

За изучение предполагаемой черной дыры в центре нашей галактики двадцать три года назад взялись две группы астрономов. Одну из них возглавлял немецкий астрофизик Райнхард Генцель. В 1987 году было начато сооружение комплекса радиотелескопов в Чилийской высокогорной пустыне Атакама на высоте 5058 метров. Группа Генцеля (европейские и чилийские астрономы) начали работу всего лишь на нескольких установках, а сегодня там 66 параболических антенн! Успех наблюдения обеспечивался огромной точностью их установки – тридцатиметровые расстояния между фокусами антенн определялись с точностью до сотых долей миллиметра. Это и принесло успех наблюдений.

Обсерватория Кека на Гавайях

Практически в то же время на Гавайях на высоте 4145 метров заканчивалось сооружение двух мощных оптических телескопов-рефракторов. Там работала группа американских ученых под руководством Андреа Гез. Она хотела стать астрономом, но в конечном счете закончила два из лучших американских технологических университетов – Массачусетский (МТИ) и Калифорнийский (Калтех). Несмотря на молодость она уже прославилась своими астрономическими наблюдениями и стала ведущим астрономом США. А ее энергия и увлеченность привлекли ряд спонсоров, обеспечивших финансовую сторону создания телескопов и строительства всей лаборатории. Главным из них был благотворительный фонд У.М.Кека (70 миллионов долларов). Два рядом расположенных телескопа работали в инфракрасном диапазоне. Тогда это были самые крупные инфракрасные телескопы в мире, на которых была использована ранее разработанная адаптивная оптика – способ с помощью расширения лазерного луча в верхних слоях атмосферы определять конкретное состояние погоды на пути наблюдения на определенную звезду и вносить изменения в компьютерную обработку результатов этих наблюдений.

Научное дружеское соревнование групп Гез и Генцеля принесло свои плоды. При изучении звездного скопления SO-2 в со-

звездии Стрельца, закрывающего центр Млечного Пути, были обнаружены большие скорости движения отдельных звезд этого скопления. А рассмотрение их эллиптических траекторий показало, что они подчиняются кеплеровским законам, что и дало возможность определить массу того тела, которое управляло движением звезд. Она составляла 4 миллиона солнечных масс и заставляла крутиться ближайшему к ней газовому облаку с релятивистскими скоростями порядка 0,3 скорости света.

Почти двадцать лет длились наблюдения, результатом которых стала уверенность, что в центре Галактики находится мощная черная дыра. Удалось также восстановить ее «биографию». Вначале она была очень активной, но потом ее активность стала уменьшаться – она не станет поглощать все звезды Млечного Пути (и нашу Землю). Правда, есть угроза со стороны соседней галактики (Туманности Андромеды), которая потихоньку приближается к нашей галактике и через пару миллиардов лет возможно их гигантское столкновение.

Астрономы групп Генцеля и Гез были, конечно, горячими сторонниками существования черных дыр. И для них большой радостью было известие о регистрации гравитационных волн, возникших так далеко, что их можно было объяснить только столкновением черных дыр.

И вот в 2020 году Нобелевскими лауреатами по физике стали Райнхард Генцель (Reinhard Genzel) и Андреа Гез (Andrea Ghez), разделившие половину Нобелевской премии «за открытие сверхмассивного компактного объекта в центре нашей Галактики». Вторая половина Нобелевской премии 2020 года была присуждена почетному профессору математики Оксфордского университета Роджеру Пенроу-

зу (Roger Penrose) «за открытие, согласно которому общая теория относительности надежно предсказывает рождение черных дыр». Впервые в текстах обоснований Нобелевских премий появился термин «черные дыры». Это и следует считать уже окончательным признанием существования во Вселенной этих объектов.

Из истории теоретических обоснований черных дыр следует, что теоретиков-астрофизиков, вложивших вклад в это обоснование, было довольно много. И трудно разобраться, кто из них внес самый большой вклад. Тем более, что работа Пенроуза 1965 года с окончательным изложением своих результатов была представлена всего лишь на двух с половиной журнальных страницах и не содержала математических доказательств. Возможно, Р.Керр или С.Хокинг сделали больше. А сам Пенроуз через несколько лет стал заниматься совсем другими теоретическими вопросами. Но дело в том, что сегодня из всей плеяды теоретиков, занимавшихся ранее черными дырами, остались только Р.Пенроуз, Р.Керр и К.Торн. Но К.Торн, «главный эксперт по общей теории относительности», стал в 2017 году Нобелевским лауреатом «за решающий вклад в развитие детектора LIGO и наблюдение гравитационных волн» (см., например, «Квант», 2018, №3). А дважды Нобелевским лауреатом по физике был только Дж.Бардин (за создание транзистора и за теорию сверхпроводимости). Р.Керр (совместно с Р.Блэндфордом) стал лауреатом престижной премии Краффорда по астрономии (присуждается Шведской Королевской академией наук реже чем раз в четыре года) «за фундаментальные работы по черным дырам». Правда, Р.Генцель тоже стал Краффордским лауреатом – еще в 2012 году «за работы по наблюдению за звездами, вращающимися вокруг галактического

центра, которые указывают на наличие массивной черной дыры».

Вообще говоря, за астрономию Нобелевские премии ее основателем не были предусмотрены (как и за математику). Но астрономия сейчас так тесно связана с физикой, что Нобелевский комитет уже стал присуждать премии и за астрономические работы. Впервые это произошло в 1967 году (Х.Бёте, «за вклад в теорию ядерных реакций, особенно за открытия, касающиеся источников энергии звезд»). С тех пор это случалось 10 раз, из них 4 – в прошедшем десятилетии (2011, 2017, 2019, 2020). За все время существования Нобелевских премий по физике из 214 лауреатов 24 – это астрофизики. А вот за последнее десятилетие из 27 лауреатов астрофизиков уже почти половина (12). Вот в какую область сейчас переместился центр интересов физической науки!

Безусловно, это связано, прежде всего, с прогрессом в конструировании телескопов, особенно радиотелескопов. И, конечно, с установками телескопов на орбитальных космических станциях. Среди многочисленной армии конструкторов, инженеров и техников этого оборудования невозможно выделить несколько (по традиции Нобелевского комитета, не более трех) самых достойных Нобелевской награды. Но по сути, все они – тоже соавторы астрономических открытий. Что-то похо-

Радиотелескоп SKA

жее уже было, когда в 2013 году Нобелевская премия по физике была присуждена за «открытие бозона Хиггса» двум теоретикам (в том числе и самому Хиггсу). И хотя в обосновании премии и говорилось о роли коллайдера БАК и всего ЦЕРН'а в этом открытии, Нобелевский комитет не мог, конечно, выделить самых достойных кандидатов — их было слишком много.

В качестве иллюстрации достижений современной наблюдательной астрономии приведем краткие сведения об одном проекте. В 2016 году были сделаны первые измерения на строящемся гигантском радиотелескопе SKA (Square Kilometer Array). Он представляет собой комплекс, состоящий из трех объектов, расстояние между которыми свыше 3000 км, в пустынных местностях Южной Африки, Австралии и Новой Зеландии. Общее количество антенн поражает воображение — 9000 параболических антенн, каждая из которых высотой с трехэтажный дом, и два миллиона так называемых дипольных антенн, среди которых есть и большие (как деревья) и маленькие (лежащие на земле решетки). Сегодня построены 200 параболических антенн в Южной Африке и ведется монтаж десятков тысяч дипольных антенн в Австралии.

Почему элементы одного прибора разнесены на межконтинентальное расстояние? Дело в том, что чем больше расстояние между принимающими излучение приборами, тем точнее измеряется положение объекта на небесной сфере. В интерференционном радиотелескопе расстояние между двумя приборами играет такую же роль, как и диаметр одиночной антенны. При огромных расстояниях можно достичь углового разрешения в несколько десятитысячных долей угловой секунды. А само название SKA связано с тем, что общая площадь воспринимаемых радиоизображений будет составлять квадратный километр, в котором миллион квадратных метров, т.е. миллион отдельных изображений. Такое большое число антенн обеспечивает высокую чувствительность прибора и охват большего участка небесной сферы. Конечно, обработка огромного количества данных от каждого прибора и

их суммирование доступны только компьютеру. Когда войдет в строй весь телескоп SKA (от 2024 до 2030 года), в два центра обработки будет поступать информация, по объему превышающая весь нынешний интернетовский трафик, а для ее обработки создаются два мощных суперкомпьютера.

Безусловно, это — международный проект. Участвует в нем много стран, в первую очередь Великобритания, США, страны ЕС, Австралия, Южная Африка, Новая Зеландия, Китай, Индия, Канада — всего более 20 стран. Общая стоимость проекта превышает 1,5 миллиарда евро. На сегодня истрачена примерно половина этой суммы. К сожалению, Россия имеет пока только статус наблюдателя в этом проекте, хотя именно советским ученым еще сорок лет назад принадлежала сама идея сверхдлинных астрономических радиоинтерферометров.

Первая проба самой начальной стадии этого сооружения дала уже замечательные результаты. В изучаемом участке неба были открыты сотни неизвестных ранее очень удаленных галактик. Главная цель этих наблюдений — получить данные об очень молодой Вселенной в возрасте «всего лишь» несколько миллионов лет после Большого взрыва, т.е. в момент образования первых звезд и галактик. Кроме того, ожидается фиксирование гравитационных волн, уточнение представлений о темной материи и темной энергии и многое другое. У обычных оптических телескопов для

Изображение черной дыры

этого не хватает чувствительности. Да и радиоволны лучше доходят до Земли, чем излучения с меньшими длинами волн.

В заключение остановимся на вопросе, что же такое наблюдалось на знаменитом «изображении черной дыры», опубликованном 10 апреля 2019 года. «Изображением» это можно называть весьма условно, а уж «фотографией», как стали называть эту картинку в интернетовских и телевизионных новостях, и подавно нельзя. На самом деле это графическая иллюстрация отчета о десятилетней работе по изучению сверхмассивной черной дыры в галактике M87 с помощью системы интерференционных радиотелескопов. Основной целью этой работы было разобраться как можно лучше с характеристиками излучения того вещества, которое уже совсем близко подошло к горизонту событий черной дыры. Поэтому весь проект так и назывался Event Horizon Telescope – ЕНТ. Было задействовано 8 крупных радиотелескопов в Чили, Испании, на Гавайях, в Мексике, США и даже на Южном полюсе, в систему входило 9 интерференционных плеч длиной по несколько тысяч километров. Угловое разрешение этой системы было рекордным – 20 миллионных долей угловой секунды. Как пишет А.Понятов в журнале «Наука и жизнь» (2019, № 5), это соответствует возможности разглядеть спичечный коробок на лунной поверхности.

Международный коллектив составляли больше 200 астрономов из 60 исследовательских организаций. В течение четырех апрельских дней 2017 года ЕНТ проводил измерения центральной области M87. Все данные поступали в суперкомпьютеры – один в Институте радиоастрономии Общества Макса Планка, другой в американской обсерватории Хайтек. Компьютерная обработка огромного количества данных дала возможность представить размеры и характер аккреционного диска черной дыры, на фоне которого определилась «тень» черной дыры – область, в несколько раз большая горизонта событий, из которой свет уже не мог вырваться наружу и поэтому яркость излучения аккреционного диска здесь слабая.

Вся картина представляет собой пазл, сложенный из огромного числа отдельных

изображений, полученных из измерений приходящих к антеннам радиотелескопов радиоволн с длиной 1,3 мм, поскольку радиоволны с такой длиной лучше всего проходят сквозь земную атмосферу. Обработка нескольких петабайтов информации (петабайт – это 10^{15} байт), полученной в результате работы всех радиотелескопов, проводилась с помощью новейших вычислительных методов, разработанных специально для этой цели участниками проекта. Она длилась два года. Поэтому итоги работы были опубликованы только в 2019 году. Россия не была участницей этого международного консорциума прежде всего потому, что радиотелескопов миллиметрового диапазона у нас пока нет. Есть два проекта, один из них космический, другой наземный (совместно с Казахстаном). Но все упирается в финансирование этих проектов.

Почему для работы телескопа горизонта событий была выбрана именно эта галактика? Самая близкая к нам черная дыра в центре галактики – это «наша» дыра, центр Млечного Пути. А вторая по близости с хорошо различимой центральной черной дырой – это M87 (созвездие Девы). И хотя расстояние до нее составляет 55 миллионов световых лет, что в 2100 раз больше расстояния до нашего центра, но зато она много ярче, поскольку ее масса в 1500 раз больше. Размер ее горизонта событий как раз соответствует разрешающей способности ЕНТ. Кроме того, немаловажно и то обстоятельство, что этот небесный объект хорошо наблюдается и в Северном, и в Южном полушарии. Это позволило задействовать в проекте телескопы обоих полушарий.

Главный результат всей проведенной работы – это не сама картинка, а те параметры, на основании которых компьютеры ее «сочинили». Они хорошо совпали как с измерениями, сделанными на основании результатов других обсерваторий, так и с теоретическими предсказаниями. И безусловно, это стало еще одним доказательством существования черных дыр. Из разряда «ужасных монстров» черные дыры перешли в перечень «законных» космических объектов, изучение которых подтверждает современные представления о Вселенной.