

# Оглавление

Пролог .....	11
<b>Глава 1</b> Столкновение, которое сотрясло космос .....	17
чуть ГЛУБЖЕ: <i>Происхождение золота</i> .....	51
чуть ГЛУБЖЕ: <i>Почему килоновая была голубой?</i> .....	52
<b>Глава 2</b> Открытие нейтронных звезд... и маленькие зеленые человечки? .....	55
чуть ГЛУБЖЕ: <i>Межзвездная среда — пристанище     нейтронных звезд</i> .....	82
<b>Глава 3</b> Когда взрываются звезды .....	86
чуть ГЛУБЖЕ: <i>Всплеск пульсаров</i> .....	116
чуть ГЛУБЖЕ: <i>Смерть массивной звезды</i> .....	119
<b>Глава 4</b> Зомби и звездотрясения .....	123
чуть ГЛУБЖЕ: <i>Многолучевой приемник</i> .....	170
чуть ГЛУБЖЕ: <i>Экзотический мир рентгеновских источников</i> ....	173
чуть ГЛУБЖЕ: <i>Хронометрирование пульсаров</i> .....	174
<b>Глава 5</b> Путешествие к центру нейтронной звезды .....	177
<b>Глава 6</b> Как нейтронные звезды убивают теории темной материи ...	218

<b>Глава 7</b>	Как пульсары обзаводятся планетами . . . . .	248
<b>Глава 8</b>	Гигантские научные инструменты Вселенной . . . . .	265
	чуть глубже: <i>Законы Кеплера и посткеплеровские параметры</i> . . .	306
<b>Глава 9</b>	Быстрые радиовсплески, незавершенная глава . . . . .	310
	Эпилог . . . . .	343
	<i>Благодарности</i> . . . . .	347
	<i>Список литературы</i> . . . . .	351

# Глава 1

## Столкновение, которое сотрясло космос

Э то случилось утром 17 августа 2017 года. Всю ночь Марика Бранчези, итальянский астроном, доцент Научного института Гран-Сассо, провела в госпитале живописного городка-крепости Урбино в центре Италии. Она устала. Роды у ее младшей сестры Марисы шли сложно и долго, и Марика хотела быть рядом. Наконец на свет появился здоровый мальчик, которого называли Ной. Время дорого: Марика решила, что пора уходить. Новоиспеченная тетя поздравила и поцеловала на прощанье сестру, улыбнулась маленькому Ною и отправилась домой отдыхать.

Во время каникул Урбино выглядел абсолютно пустым. Отец Марики забрал ее у госпиталя и отвез домой, петляя по узким улочкам с домами из белого кирпича. Казалось, исходящий от них жар усиливает духоту. Наконец Марика с отцом подъехали к небольшому, окруженному тенистым садом дому, где жила ее семья. Это был день рождения ее мужа Яна. Ян только начал готовить обед, а их дети, двухлетний сын Диего и его восьмимесячный брат Дамиан, спокойно играли в саду.

Бранчези включила лэптоп. Она очень устала, но хотела еще кое-что сделать по работе. Будучи членом международного сообщества ученых, работающих с LIGO, лазерно-интерферометрической гравитационно-волновой observa-

торией, базирующейся в Соединенных Штатах, и детектором гравитационных волн *Virgo* в Италии близ Пизы, она знала, что всего три дня назад приборы зафиксировали сигнал от столкновения двух далеких черных дыр.

Такие открытия бывали и раньше: после последней модернизации детектор LIGO пять раз регистрировал подобные события. Астрономы впервые наблюдали слияние черных дыр 14 сентября 2015 года, всего через несколько дней после повторного включения LIGO. Теперь благодаря LIGO наконец появилась возможность непосредственно наблюдать гравитационные волны — рябь пространства-времени, обусловленную катастрофическими столкновениями невероятно плотных объектов в далеком космосе. Эта расходящаяся волнами рябь охватывает Землю наподобие волн от камня, брошенного на спокойную поверхность пруда. Наблюдение гравитационных волн подтвердило правоту Альберта Эйнштейна, предсказавшего почти сто лет назад, что гравитация может создавать волны, распространяющиеся по Вселенной со скоростью света. 3 октября 2017 года Кип Торн, Райнер Вайсс и Барри Бэриш, трое из четырех ученых, стоявших у истоков проекта LIGO, получили Нобелевскую премию по физике за то, что сделали возможной регистрацию гравитационных волн<sup>1</sup>. (Рональд Древер, еще одна ключевая фигура при разработке технологии LIGO, умер за полгода до того, как были объявлены лауреаты Нобелевской премии за 2017 год.)

Однако Бранчези была немного разочарована. Хотя слияние черных дыр — событие, безусловно, интересное, на самом деле она надеялась, что LIGO зарегистрирует нечто другое. Бранчези искала следы столкновения двух объектов, еще более таинственных, чем черные дыры, — небольших, сверхплотных, быстро вращающихся ядер массивных звезд, ядерное горючее которых уже выгорело — и они “сколлапсировали” под действием собственной гравитации. К сожалению, всего неделя отделяла LIGO от остановки

на два года для проведения следующей запланированной модернизации, но до сих пор удалось обнаружить только слияние черных дыр. Это, конечно, немало, но для Бранчези недостаточно.

“Все готово, к столу!” — позвал Ян из сада. “Еда для мамочки!” — радостно повторил за ним Диего. Бранчези закрыла лэптоп и присоединилась к семейству. Покончив с салатом, она подхватила Дамиана и взяла за руку Диего, намереваясь уложить их спать. Измученная бессонной ночью, она надеялась, что и ей наконец удастся отдохнуть. Именно тогда звякнул ее телефон, оповещая о новом сообщении: ее просили присоединиться к телефонной конференции, срочно организованной коллегами по сообществу LIGO.

Никаких шансов отдохнуть в этот день у Бранчези уже не осталось. На самом деле ей не удалось выспаться и в ближайшие десять дней. От прочитанного у Бранчези перехватило дыхание. Только что два детектора LIGO одновременно с *Virgo* зарегистрировали именно то, чего она так ждала: сигнал недвусмысленно указывал на то, что на расстоянии около 130 миллионов световых лет от Земли столкнулись две нейтронные звезды. Хотя нейтронные звезды не такие плотные объекты, как черные дыры, их столкновение оказалось достаточно сильным, чтобы привести к высвобождению огромной энергии и запустить гравитационную рябь, разошедшуюся во все стороны по пространству-времени.

А теперь рябь наконец добралась до Земли<sup>2</sup>. Бранчези на мгновение закрыла глаза. Если бы LIGO не модифицировали два года назад, эти возмущения, невероятно ослабленные за время путешествия, занявшего 130 миллионов лет, дошли бы до Земли и прошли бы никем не замеченные. Ничего нового ученые не узнали бы. В этот раз благодаря Бранчези и еще небольшой группе астрофизиков, астрономов и физиков, изучающих гравитационные волны, они были готовы к этой столь маловероятной встрече.

Она посмотрела на сыновей. Диего уже слышал от своих родителей множество историй о черных дырах, скоро его мама добавит еще несколько о нейтронных звездах. Бранчези знала, что если это наблюдение подтвердится, то слияние, теперь известное как GW170817, вполне может стать определяющим моментом в ее карьере, кульминацией ее десятилетних усилий по объединению исследователей из самых разных областей для совместной работы.

Любые проходящие из космоса сигналы могут быть “посланниками”. Например, от нашего Солнца исходит не только свет, но и непрекращающийся поток почти безмассовых частиц, так называемых нейтрино<sup>3</sup>. С помощью многоканальной астрономии удалось подтвердить всего три события, произошедшие за пределами нашего Млечного Пути. В 1987 году с использованием оптических телескопов и при участии нейтринных обсерваторий была обнаружена сверхновая. В 2018 году оптическим телескопам и детектору нейтрино *IceCube* в Антарктике удалось идентифицировать источник космических нейтрино<sup>4</sup>. Им оказался блазар — объект высокой светимости, связанный со сверхмассивной черной дырой в центре галактики, расположенной в четырех миллиардах световых лет от нас. Однако переломным моментом стало обнаружение и наблюдение в 2017 году гравитационно-волнового всплеска GW170817. Это и был проект, на который столько сил положила Бранчези. В этот раз физики зафиксировали проходящие через Землю пульсации пространства-времени и немедленно оповестили астрономов. Астрономы направили к источнику этих слабых пульсаций свои оптические, радио- и все другие возможные телескопы, предназначенные для приема электромагнитного излучения различных длин волн, чтобы зафиксировать весь спектр сигналов, иначе говоря, посланников космического катаклизма.

Очень важно, что это историческое столкновение и находящаяся в стадии становления многоканальная астроно-

мия помогли ученым получить представление об устройстве и эволюции этих удивительно странных объектов нашей Вселенной — нейтронных звезд<sup>5</sup>.

Благодаря своей работе Бранчези уже в следующем году попала в список самых влиятельных людей 2018 года по версии журнала *Time*<sup>6</sup>.

Но даже до получения результатов, уже в Урбино, стоя в своем нагретом летним солнцем саду днем 17 августа 2017 года, она знала: это событие навсегда останется в науке будущего и в исторических книгах.

## За одиннадцать миллиардов лет до открытия

Посмотрите как-нибудь ночью на полную Луну. Затем представьте себе, что вы поставили на ней ручкой точку, диаметр которой составляет менее 1 % от диаметра Луны. Поскольку поперечный размер Луны примерно 3476 километров, диаметр нарисованной точки будет около 20 километров. Это чуть меньше диаметра Чикаго, если представить себе, что этот город свернулся в плывущий в космосе шар. Средний размер нейтронной звезды именно такой.

Нейтронная звезда — это то, что осталось от звезды, масса которой изначально составляла от восьми до пятнадцати\* масс Солнца. За миллионы лет ядерное топливо выгорает, и массивная материнская звезда постепенно умирает. Этот процесс заканчивается феерическим взрывом — вспышкой сверхновой. Можно ожидать, что в среднем в галактике размером с наш Млечный Путь гибель звезды происходит примерно раз в пятьдесят лет. В огромной пустой Вселенной нейтронная звезда могла бы показаться совсем незначительным объектом, если бы не ее невероятная плотность,

\* Верхняя граница массы предков нейтронных звезд пока известна плохо. Она может достигать и шестидесяти масс Солнца. — *Прим. науч. ред.*

превышающая плотность воды примерно в сто триллионов раз. В плотном объекте внутри очень малого объема зажато очень большое количество вещества. Нейтронная звезда — это самый плотный из известных нам объектов, состоящих из обычного вещества. Если к массивной нейтронной звезде добавить еще немного вещества или если две нейтронные звезды столкнутся, коллапс звезды продолжится, что приведет к образованию черной дыры. Диаметр нашего Солнца — порядка 1,4 миллиона километров, но его масса примерно равна массе крохотной нейтронной звезды, поперечный размер которой составляет всего 20 километров. Представьте себе вишенку на торте, которая весит миллиард тонн!<sup>7</sup>

При такой безумной плотности эти таинственные зомби-звезды еще и носятся в пространстве, быстро вращаясь вокруг своей оси со скоростью как минимум один оборот в секунду. У некоторых нейтронных звезд вблизи магнитных полюсов формируются узконаправленные потоки электромагнитного излучения — джеты. Поскольку нейтронные звезды вращаются, их излучение в виде всплесков радиоволн можно обнаружить, когда один из джетов направлен в сторону Земли. Можно сказать, что быстро вращающаяся нейтронная звезда чем-то напоминает непрерывно светящийся вращающийся маяк, тогда как кораблям в море, или в нашем случае астрономам, видны только отдельные вспышки. Такие нейтронные звезды называют пульсарами, и обычно видят именно их. Вспышки многих пульсаров столь регулярны, что недавно пульсары предложили использовать для независимой проверки атомных часов, определяющих международное атомное время<sup>8</sup>.

Астрономы считают, что, хотя пока удалось открыть около трех тысяч радиопулсаров, только в нашей Галактике их число может достигать ста миллионов<sup>9</sup>. И все же до сих пор мы знаем о них очень мало.

Правда, до того, как 17 августа 2017 года в 14 часов 41 минуту по местному времени Марика Бранчези в городе Урбино получила сообщение о слиянии нейтронных звезд в со-



седней галактике, мы знали о радиопульсарах еще меньше<sup>10</sup>. Наконец у человечества появился шанс лучше понять, что представляют собой эти странные объекты.

По-видимому, две нейтронные звезды, замеченные LIGO и *Virgo*, образовались около 11 миллиардов лет назад. Тогда Вселенная была еще молодой, ни Земли, ни Солнечной системы не существовало, а обычные звезды объединялись в скопления. Две звезды, каждая из которых была примерно в десять раз массивнее Солнца, умерли одна за другой. По космическим масштабам они находились не слишком далеко друг от друга, и их оставшиеся ядра массой чуть больше одной солнечной массы (массы Солнца) начали по спирали приближаться друг к другу под действием взаимного гравитационного притяжения. Этот танец предопределил их судьбу. Обращаясь вокруг общего центра масс, они сминали ткань пространства и времени, наподобие того, как оставляет вмятины шар для боулинга, катясь по натянутой простыне, которую держат за четыре угла. Деформация пространства-времени, вызванная нейтронными звездами, привела к появлению ряби — гравитационных волн, распространяющихся по Вселенной<sup>11</sup>.

## За сто тридцать миллионов лет до открытия

Пока две нейтронные звезды двигались по спирали друг к другу, Вселенная эволюционировала и расширялась, образовывались новые галактики и рождались новые звезды. Около 130 миллионов лет назад эти нейтронные звезды подошли настолько близко друг к другу, что каждая из них стала причиной появления приливов и отливов на поверхности другой, вроде тех, за которые в земных океанах ответственна Луна. Эти приливные эффекты, растягивая и сжимая звезды, разрушали их.

Несколько позже произошла космическая катастрофа: нейтронные звезды наконец столкнулись и взорвались. Часть выброшенного при взрыве вещества не потеряла связь с тем, что сохранилось от этой пары, и из “мусора” вокруг остатка сверхновой образовался так называемый аккреционный диск. Это, в свою очередь, привело к формированию из вещества аккреционного диска мощной струи — джета, распространяющегося по Вселенной со скоростью, близкой к скорости света, и излучающего в рентгеновском, оптическом и радиодиапазонах. Кроме того, джет стал источником короткой и невероятно сильной вспышки гамма-излучения — наиболее мощного из известных электромагнитных событий.

Какой-то части выброшенной массы удалось преодолеть силу притяжения остатка сверхновой, сформировав очень горячее и быстро расширяющееся облако, напоминающее увеличивающийся в размере пончик. Это облако было настолько богато нейтронами, что запустилась реакция образования элементов тяжелее железа, таких как золото, серебро и платина. По оценкам астрономов, масса тяжелых элементов в этом облаке составляла примерно десять тысяч масс Земли. Только чистого золота там было 236 секстиллионов (то есть 236 и хвост из двадцати одного нуля) тонн, что равно сорока массам Земли. Радиоактивный распад всех этих тяжелых элементов генерирует свет — оптическое излучение, обусловленное радиоактивным послесвечением, которое называют “килоновая”<sup>12</sup>.

При слиянии двух нейтронных звезд плотность новообразованного тела резко увеличивается. Вероятнее всего, такая объединенная нейтронная звезда становится слишком массивной, чтобы продолжать существовать, она коллапсирует внутрь себя и образует черную дыру. Очень важно, что слияние значительно усиливает гравитационную рябь, которая была до столкновения. Гравитационные волны становятся невидимыми посланниками великого и ужасного

соударения, и они, обладая энергией двухсот миллионов Солнц, со скоростью света разбегаются во всех направлениях.

Когда это все происходило, на Земле начинался меловой период и динозавры населяли материки и океаны. Только в августе 2017 года гравитационная рябь достигла нашего мира и прикоснулась к чувствительной аппаратуре LIGO и *Virgo*. В течение этих 130 миллионов лет гравитационные волны, двигающиеся, согласно предсказанию Эйнштейна, со скоростью света, то есть около 300 тысяч километров в секунду, стали существенно слабее. До нас дошли и другие сигналы этого космического события, а именно — свет и радиоволны, распространяющиеся с той же скоростью. Когда мы что-то видим в космосе, мы наблюдаем прошлое. Даже свету, идущему от Солнца, требуется восемь минут двадцать секунд, чтобы дойти до нас. Если Солнце внезапно исчезнет (хотя этого не должно случиться при нашей жизни), потребуются именно эти восемь минут, чтобы мы узнали о произошедшем событии.

Когда детекторы LIGO и *Virgo* зафиксировали гравитационную волну, они разослали автоматические уведомления. Эти уведомления получили несколько так называемых первых респондентов, работа которых состояла в оценке всех возможных кандидатов, отмеченных программой. Стало ясно, что получены сенсационные данные: сила сигнала указывала на два объекта, массы которых попадали в интервал, соответствующий массам нейтронных звезд — другими словами, меньше масс черных дыр. Теоретически это означало, что столкновение должно также сопровождаться электромагнитным излучением. И действительно, ровно через две минуты после регистрации LIGO и *Virgo* сигналов гравитационных волн космический гамма-телескоп *Fermi* зафиксировал интенсивную вспышку гамма-излучения. За несколько минут удалось оповестить более широкий круг участников сообщества LIGO/*Virgo*, включая Бранчези, что стало началом очень долгой исторической телеконференции.