

ARTIFICIAL UNIVERSE

V. M. LIPUNOV

Basing on the present notions of normal and relativistic stars evolution in binary systems, population synthesis of the Universe can be carried out. This artificially created Metagalaxy contains, among well known and clearly understood astrophysical processes and objects, phenomena not founded yet but highly significant for all modern science.

Опираясь на современные представления об эволюции обычных и релятивистских звезд в двойных системах можно осуществить популяционный синтез Вселенной. В такой искусственно созданной метагалактике наряду с известными и хорошо изученными астрофизическими процессами и объектами присутствуют еще пока не открытые, но крайне важные для всего естествознания явления.

ИСКУССТВЕННАЯ ВСЕЛЕННАЯ

В. М. ЛИПУНОВ

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

Одним из важнейших достижений естествознания XX века является открытие ядерной эволюции вещества. Поскольку почти все светящееся вещество Вселенной сосредоточено в звездах, то речь идет в первую очередь о звездной эволюции. Нормальные звезды, ближайшие из которых видны на ночном небосклоне, светят благодаря термоядерному синтезу, протекающему в их недрах, и, следовательно, продолжительность их жизни определяется и ограничивается запасами водорода, гелия и более тяжелых элементов вплоть до железа. Звезды невечны, они рождаются, живут и умирают, и умирают тем быстрее, чем больше их начальная масса. Жизнь звезды малой или средней массы (до десяти солнечных масс) завершается сжатием в компактное, размером с планету типа нашей Земли плотное образование – белый карлик. Гравитационное поле массивных звезд делает смерть звезды катастрофически быстрым явлением, сопровождающимся коллапсом центральной ее части в одно гигантское атомное ядро (нейтронную звезду), удерживаемое силами гравитации, которое было впервые предсказано в 1932 году Л.Д. Ландау и открыто в 1967 году английскими радиоастрономами – группой Э. Хьюиша, – удостоенными Нобелевской премии. Основная, наружная часть “умирающей” звезды сбрасывается в межзвездное пространство в виде раскаленного гигантского газового облака, несколько раз наблюдавшегося в уходящем тысячелетии как вспышка сверхновой звезды. Наконец, если масса звезды выше некоторого критического значения, то меняются уже не только свойства материи, но и само пространство–время: даже ядерные силы неспособны противостоять гигантской силе гравитации и образуется черная дыра – объект, размер которого равен гравитационному радиусу R_g :

$$R_g = \frac{2GM}{c^2} = 3 \text{ км} \cdot \frac{M}{M_\odot},$$

где M – масса черной дыры, выраженная в массах Солнца M_\odot :

$$M_\odot = 2 \cdot 10^{33} \text{ г.}$$

Большинство звезд входят в состав двойных систем и за счет гравитационных сил могут обмениваться друг с другом массой, делая возможным невозможное: те из них, которые, будучи одиночными, могли произвести лишь белые карлики, теперь в двойной системе могут рожать нейтронные звезды и даже черные дыры! Этим объясняется один из красочных парадоксов классической астрономии –

парадокс Алголя, открытый советскими исследователями А.Г. Масевич и П.П. Паренаго еще в 40-е годы и состоящий в том, что иногда менее массивная звезда в двойных системах опережает в эволюции свою массивную соседку.

Картина эволюции двойных звезд неизмеримо сложнее и до конца еще не выяснена, поэтому приходится говорить не о законах эволюции, а об эволюционных сценариях — последовательности эволюционных стадий, проходимых звездами в зависимости от начальных параметров: масс, большой полуоси двойной системы, магнитных полей и т.д.

К середине 60-х годов стало ясно, что компактные релятивистские звезды могут быть мощными источниками энергии: либо за счет высвечивания энергии захватываемого гравитационными силами окружающего вещества (механизм аккреции, предложенный независимо Я.Б. Зельдовичем и Э. Солпитером в 1964 году), либо за счет высвечивания их вращательной энергии, накопленной в процессе коллапса, посредством мощных электромагнитных полей (эти идеи были разработаны Ф. Хойлом и В. Фаулером (1963), Н.С. Кардашевым (1964), Ф. Пачини (1968)). Более того, как впервые показал советский астрофизик В.Ф. Шварцман в 1970 году, существует другой тип звездной эволюции — эволюция замагниченной компактной звезды, в ходе которой вращательный и аккреционный механизмы могут сменять друг друга.

Все эти теоретические гипотезы высказывались на фоне невиданного революционного процесса в астрономии — открытия рентгеновских звезд, пульсаров, квазаров, вспыхивающих рентгеновских источников (барстеров), гамма-всплесков. Были открыты тысячи новых источников и десятки качественно новых астрономических явлений. К началу 80-х годов возникла настоятельная необходимость в создании единого эволюционного подхода к столь разнообразным явлениям. Так как жизненные пути звезд, в особенности двойных, — это сложное ветвистое эволюционное дерево, то для анализа всех связей, для понимания того, почему Вселенная в разных диапазонах электромагнитных волн выглядит столь непохоже, необходимо было создание специальной компьютерной программы — Машины Сценариев, в которой были бы заложены все известные в настоящее время законы звездной эволюции. Идея Машины Сценариев и первая реализация, описывающая эволюцию массивных звезд, были осуществлены в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга в начале 1980-х годов В. Корниловым и В. Липуновым. Конечно, эта идея появилась не на пустом месте. Популяционный синтез — синтез различных типов звезд на основе эволюционных представлений производился в 70-е годы для объяснения цвета Галактики, который определяется самыми яркими и, следовательно, самыми молодыми звездами и содержит в себе ин-

формацию о скорости рождения звезд в минувшую эпоху. При этом предполагалось, что все звезды одиночные, и можно было ограничиться простым численным интегрированием.

Мы использовали прямой метод статистического моделирования (метод Монте-Карло), в котором начальные параметры звезд (массы, большие полуоси орбит, магнитные поля и т.д.) выбирали случайным образом в соответствии с принятыми модельными распределениями. Расчет вели следующим образом: в некоторый случайный момент компьютерного галактического времени рождалась двойная звезда с массами, соответствующими экспериментально открытому закону Солпитера. Далее включался блок законов, описывающий ядерную эволюцию и процессы обмена масс звездами. После рождения компактной звезды подключался блок, рассчитывающий эволюцию замагниченных вращающихся компактных звезд. Когда наступало компьютерное “настоящее”, двойная звезда со всеми своими физическими характеристиками изымалась и записывалась в память. Просчитав несколько десятков тысяч звезд и отнормировав полученные результаты на истинное число звезд в Галактике (около 100 млрд), мы получали Искусственную галактику (рис. 1).

Уже благодаря первому и второму вариантам Машины Сценариев мы смогли рассчитать подробную эволюцию как массивных, так и маломассивных звезд и предсказали более 100 (!) новых типов двойных звезд с компактными компонентами, некоторые из которых были открыты совсем недавно. Одно из наиболее важных предсказаний было подтверждено в 1993 году, когда австралийские радиоастрономы открыли радиопульсар, вращающийся по сильно вытянутой орбите вокруг массивной голубой звезды. Существование такого симбиоза не только подтверждает современные представления об эволюции релятивистских звезд в двойных системах, но и дает возможность изучать свойства околозвездной плазмы, поскольку пульсар, подобно рентгеновскому аппарату, просвечивает околозвездное пространство, позволяя диагностировать его физические параметры.

Тем не менее первая Машина Сценариев была сильно ограничена скудными вычислительными

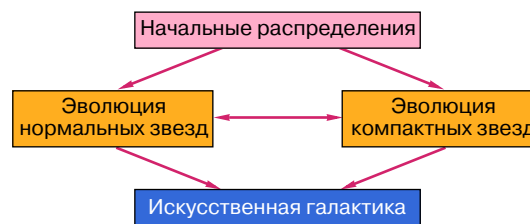


Рис. 1. Принцип работы Машины Сценариев

возможностями тогдашней компьютерной техники. Ведь эволюция двойной звезды, в особенности содержащей компактный компонент, представляет собой сложную траекторию в многомерном пространстве–времени: в первом приближении это пространство восьми измерений (массы звезд, расстояния между ними, эксцентриситеты орбит, скорости вращения релятивистских звезд, магнитные поля, скорости изменения масс и, наконец, само время). Отсюда, например, ясно, что оценить число и физические параметры тех или иных типов двойных систем с помощью простых аналитических оценок совершенно невозможно. Но также ясно, что для получения более или менее надежных результатов нужно заполнить восьмимерное пространство огромным количеством отдельных треков, что потребовало более высокоскоростных компьютеров и больших объемов памяти. Сейчас в одном численном эксперименте удается прогонять по жизненному пути миллионы двойных звезд!

Мы попытаемся рассказать о наиболее интересных результатах наших расчетов, которые в большинстве своем уникальны, так как до сих пор больше ни у кого нет Машины Сценариев, способной просчитывать одновременно эволюцию как нормальных, так и релятивистских звезд.

СДЕЛАЙ ГАЛАКТИКУ САМ

Имея в руках столь мощное средство, как Машина Сценариев, первым делом мы решили приготовить нашу Галактику. Здесь мы преследовали две стратегические цели. Во-первых, наша Галактика – Млечный путь – исследована подробнее остальных и, моделируя ее звездное население, можно наиболее полно проверить правильность наших теоретических представлений, отрегулировать ключевые параметры, выбрать наиболее реалистичный эволюционный сценарий и попытаться объяснить происхождение удивительного зоопарка астрофизических объектов, открытых в 70-е годы: рентгеновских пульсаров, радиопулсаров, рентгеновских барстеров, кандидатов в черные дыры, рентгеновских новых звезд и т.д. Во-вторых, интересно знать, сколько и чего мы еще можем открыть в нашей Галактике.

Перечислим основные физические процессы, включенные в последний вариант. Лучше всего это сделать на примере эволюции конкретной двойной системы. Для этого мы выбрали из недр компьютера один из наиболее интересных длинных эволюционных треков, который нам еще понадобится дальше (рис. 2).

Рис. 2. Эволюционный трек двойной звезды, приводящий к образованию радиопулсара с черной дырой. Слева и справа в ближайших колонках приводятся массы звезд в единицах солнечной массы. *A* – расстояние между звездами, выраженное в солнечных радиусах, *T* – возраст двойной системы в миллионах лет. WR – звезда Вольфа–Райе, NS – нейтронная звезда, BH – черная дыра

| $M_1,$ M_\odot | | $M_2,$ M_\odot | $A,$ R_\odot | $T,$ млн лет |
|---------------------|--------|---------------------|-------------------|-----------------|
| 52,00 | | 35,00 | 200,00 | 0,00 |
| 50,36 | | 33,35 | 207,90 | 3,60 |
| 47,85 | | 33,20 | 214,70 | 3,97 |
| 25,26 | WR | 55,78 | 272,80 | 3,97 |
| | | NS Ib | | 3,97 |
| 1,40 | NS "E" | 55,78 | 451,30 | 4,07 |
| 1,40 | NS "P" | 55,69 | 452,10 | 4,19 |
| 1,40 | NS "A" | 55,48 | 453,80 | 4,46 |
| 1,40 | NS "A" | 55,47 | 453,80 | 4,47 |
| 1,40 | NS "A" | 54,78 | 173,50 | 4,47 |
| 1,44 | NS "P" | WR | 27,87 | 4,48 |
| | NS "P" | NS Ib | | 4,48 |
| 1,44 | NS "E" | BH | 20,07 | 4,58 |

Эволюция двойной начинается с момента, когда обе звезды находятся на Главной последовательности и в их недрах идет термоядерный синтез гелия из водорода. Конкретно мы видим две голубые звезды с массами 52 и 35 масс Солнца. Это массивные звезды, каждая из которых вначале находится глубоко под *полостью Роша* — критической поверхностью, ограничивающей область гравитационного влияния каждой из звезд. Так как, согласно основному закону ядерной эволюции, более массивная звезда сжигает свой водород первой, то первой и начинает перестраивать свою внутреннюю структуру, при этом она расширяется. Через четыре миллиона лет она заполняет свою полость Роша и ее вещество без дополнительных затрат энергии начинает перетекать на соседку, которая по-прежнему находится на Главной последовательности. Обмен массой продолжается до тех пор, пока не стечет вся оболочка первоначально массивной звезды и в оставшемся гелиевом ядре не вспыхнет реакция горения гелия и превращения в углерод.

После обмена вторая звезда стала более массивной — это так называемая перемена ролей в двойной системе. Образовавшаяся гелиевая звезда (астрономы давно наблюдают такие звезды и называют их звездами Вольфа–Райе) живет очень недолго: буквально через сотню тысяч лет она пережигает весь гелий и более тяжелые элементы и взрывается как сверхновая, рождая сверхплотную нейтронную звезду. Молодые нейтронные звезды обладают сильными магнитными полями и быстрым вращением. Благодаря этому они излучают мощные потоки релятивистских частиц и радиоволн и наблюдаются как радиопульсары. В данном случае мы видим, что эволюция двойной звезды естественным образом привела к образованию очень редкого, открытого всего несколько лет назад симбиоза голубой звезды и радиопульсара.

Теперь в двойной системе появляется еще один тип эволюции — эволюция замагниченной нейтронной звезды, состоящая в медленном замедлении ее вращения и смене источников энерговыделения. Мы видим три фазы: E — эжектор, может наблюдаться как пульсар. Эжектор черпает свою энергию из энергии вращения посредством магнит-

ного поля. Когда звезда замедлится настолько, что звездный ветер соседки, захваченный гравитационным полем нейтронной звезды, устремится к ее поверхности, то он потушит пульсар. Однако быстрое вращение еще некоторое время препятствует падению плазмы на поверхность (P — стадия пропеллера), и лишь после дополнительного замедления вспыхивает яркий рентгеновский пульсар, излучающий гравитационную энергию ударяющегося о поверхность нейтронной звезды вещества. Сейчас наблюдается около 40 таких рентгеновских пульсаров.

Затем соседка наконец пережигает свой водород и начинает расширяться, и теперь история повторяется — она пытается отдать ранее взятое вещество обратно. Но небольшая нейтронная звезда не в состоянии принять его, и оно рассеивается в окружающее пространство. В результате образуется пара нейтронная звезда — звезда Вольфа–Райе, которая живет недолго и взрывается как сверхновая. Однако из-за большей массы, чем при первом взрыве, возникает черная дыра с массой порядка 20 масс Солнца, а не нейтронная звезда. Итак, мы получаем еще один удивительный, еще пока неоткрытый симбиоз — двойную, состоящую из радиопульсара и черной дыры.

Перейдем теперь к модели Галактики. В табл. 1 приведена упрощенная матрица состояний двойных звезд с релятивистскими компонентами в нашей Галактике. По горизонтали и вертикали показаны разные состояния компонентов системы. На пересечении — наблюдательные примеры. Знак вопроса означает, что такие системы должны быть, но пока не открыты. Как видим, даже в упрощенной для популярной статьи таблице мы имеем 24 различных типа двойных, из которых только шестая часть открыта.

Остановимся на одной клеточке, заполненной совсем недавно, где находится PSR 1259-63, — это быстро вращающаяся нейтронная звезда в паре с голубой нормальной звездой. Существование их было предсказано еще в 1984 году по результатам наших первых расчетов. Надо сказать, что мы не ограничились констатацией факта, а подробно исследовали все выгоды, которые могут получить астрономы после открытия такого объекта. Во-первых,

Таблица 1. Матрица всех возможных типов двойных систем Искусственной галактики

| Релятивистский компонент | Нормальный компонент двойной системы | | | | | |
|--------------------------|--------------------------------------|--------------|------------------------|-------------------------|-------------------|-------------|
| | Главная последовательность | сверхгиганты | полость Роша заполнена | звезды типа Вольфа–Райе | нейтронная звезда | черная дыра |
| Радиопульсар | PSR 1259-63 | ? | ? | Cyg X-3(?) | ? | ? |
| “Пропеллер” | ? | ? | ? | ? | ? | ? |
| Рентгеновский пульсар | A 0535+26 | Cen X-3 | Her X-1 | ? | ? | ? |
| Черная дыра | ? | ? | ? | ? | ? | ? |

открытие подтверждало бы правильность наших представлений об эволюции не только нормальных, но и нейтронных звезд; во-вторых, пульсар, вращающийся в звездном ветре обычной звезды, является своеобразным естественным зондом околосредней плазмы и ее магнитного поля: радиоизлучение пульсара, проходя через замагниченную плазму, во-первых, притормаживается за счет уменьшения фазовой скорости в плазме, во-вторых, существенно поглощается, а в-третьих, меняет плоскость поляризации. Все три эффекта теперь наблюдаются австралийскими радиоастрономами, и мы впервые имеем прямую информацию о параметрах звездного ветра и магнитных полях голубых звезд. Однако одно обстоятельство было неожиданным. Пульсар двигался по аномально сильно вытянутой орбите: в течение 3 лет (половина периода обращения) он удалялся от соседки на расстояние в 10 раз большее.

Конечно, столь необычный факт вызвал появление публикаций, в которых астрофизики искали специальные эволюционные причины. Но нам удалось объяснить это явление из иных соображений. Конечно, вытянутость орбиты связана со сбросом вещества в момент образования нейтронной звезды: сброс стремится разорвать двойную звезду, вот орбита и вытягивается. Но почему у первого же пульсара такой огромный эксцентриситет? Мы смоделировали распределение таких двойных по эксцентриситетам и обнаружили, что это распределение достаточно плоско и круглые орбиты так же предпочтительны, как и вытянутые. Однако из-за поглощения радиоволн в звездном ветре обычной звезды большинство нейтронных звезд как радиопульсары просто не видны. Чтобы декаметровые волны не поглощались, пульсар должен вынырнуть из плотных слоев звездного ветра, а это возможно только при большой вытянутости орбиты. На рис. 3 мы специально приводим распределение для “видимых пульсаров”, оно имеет резкий максимум у самых вытянутых орбит. Неудивительно, что и первый пульсар такого рода оказался среди них. Недавно открыт и второй пульсар, правда в соседней галактике – Большом Магеллановом облаке, но тоже на сильно вытянутой орбите.

ПАЛАТА МЕР И ВЕСОВ ВСЕЛЕННОЙ

Последние двадцать лет с частотой не реже двух раз в год средства массовой информации сообщают об открытии черных дыр. Однако Нобелевский комитет никак не реагирует на эти сообщения, хотя ясно, что экспериментальное подтверждение одного из самых впечатляющих предсказаний общей теории относительности – открытие объекта, в котором окончательно разрушены тысячелетние представления человечества о пространстве и времени, достойно высочайшей научной награды. Почему? Дело в том, что открываются не черные дыры, а кандидаты в черные дыры, и, хотя мало кто из ис-

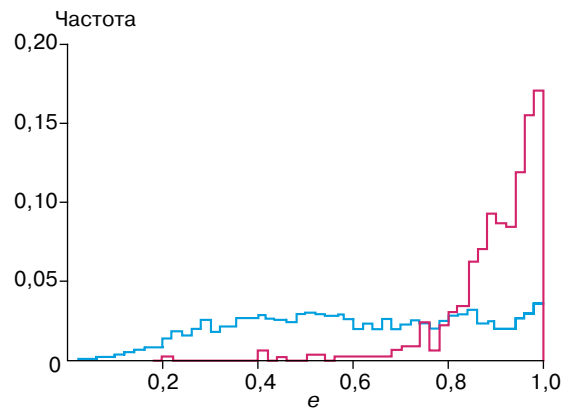


Рис. 3. Вероятность обнаружения радиопульсара на вытянутой орбите. По горизонтальной оси отложен эксцентриситет орбиты e . Голубой линией показано распределение всех нейтронных звезд по эксцентриситетам, красной – распределение тех нейтронных звезд, которые могут быть видны как радиопульсары. Чтобы радиоволны могли выйти из звездного ветра, радиопульсар должен двигаться по сильно вытянутой орбите. Поэтому максимум вероятности приходится на большие эксцентриситеты

следователей сомневается в их “чернодырности”, слишком невелика точность измерения всех физических параметров этих объектов и явлений, протекающих в их окрестностях. Нужно “увидеть”, “измерить” черную дыру с лабораторной точностью, нужна специальная космическая лаборатория со своей палатой мер и весов, к тому же позволяющая обнаружить новые, характерные только для черной дыры физические процессы. Есть ли такая лаборатория во Вселенной? Оказывается, есть!

В 1993 году американские радиоастрономы Р.А. Халс и Дж.Х. Тейлор получили Нобелевскую премию за открытие и изучение двойных радиопульсаров. Радиопульсар – это не просто быстро вращающаяся магнитная нейтронная звезда, излучающая радиоимпульсы. Радиопульсары – это идеальные сверхточные часы, своеобразный временной стандартный метр, но не лежащий под стеклом в Париже, а рассыпанный по нашей Галактике! Радиопульсаров около полумиллиона в Галактике, и примерно 30 000 из них входят в двойные системы. Особенно интересны именно радиопульсары, входящие в двойные системы, так как изменение хода часов, вращающихся на орбите в двойной системе, полностью определяется гравитационным полем (а следовательно, массой звезды, создающей это поле) и, таким образом, часы превращаются в идеальные весы!

Р.А. Халсу и Дж.Х. Тейлору удалось взвесить нейтронные звезды с рекордной для астрономии точностью в несколько десятых долей процента и обнаружить медленное сближение двух нейтронных звезд, вызванное излучением гравитационных волн.

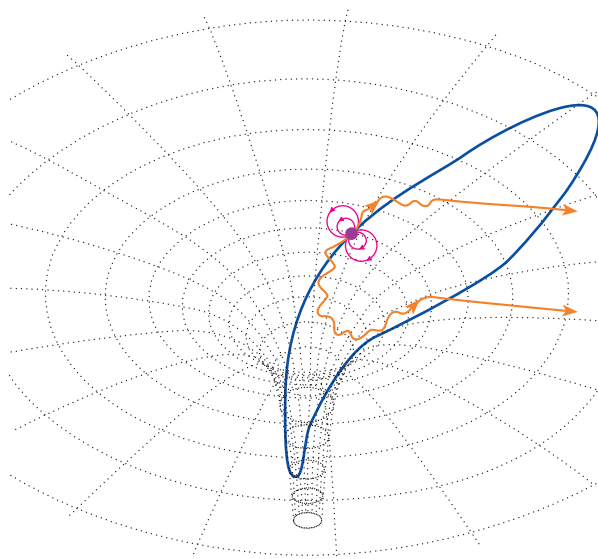


Рис. 4. Радиопульсар, движущийся вокруг черной дыры, является идеальным зондом свойств искривленного пространства–времени

Сейчас известны радиопульсары в паре с белыми карликами, нейтронными звездами и даже планетами и планетными системами. А нет ли в природе пульсаров в паре с черными дырами? Обнаружив такой симбиоз, мы смогли бы не только точно взвесить черную дыру, но и использовать радиоволны пульсара для зондирования пространства и времени буквально у пропасти — на границе черной дыры!

Недавно, рассматривая звездное население нашей Искусственной галактики, мы вдруг обнаружили именно такие пары. Но самое главное не то, что они есть в принципе. Главное — сколько их, каково ожидаемое число? Ведь мы видим сейчас только одну тысячную часть всех радиопульсаров в Галактике (не хватает чувствительности радиотелескопов), и если, например, их окажется всего какая-то сотня на Галактику, то ждать открытия в ближайшем веке бесполезно. Поэтому мы заново для самых разных эволюционных сценариев детально повторили все расчеты и получили неожиданный результат: черных дыр в паре с пульсарами в нашей Галактике при самых худших вариантах должно быть несколько тысяч и, следовательно, открытие их не за горами!

ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВОЕ НЕБО

Фундаментальная наука сейчас находится на пороге открытия новой экспериментальной области — гравитационно-волновой астрономии. Уже в 1998 году вступит в действие первая очередь гравитационно-волновых лазерных интерферометров в США (проект LIGO — Laser Interferometer), Европе (проект VIRGO и GEO) и Японии (TAMA) с чувствительностью к относительным сжатиям и растяже-

ниям порядка $h_{\min} = 10^{-21}$ и откроется новый канал информации о Вселенной.

Идея эксперимента крайне проста. Гравитационная волна при прохождении через интерферометр меняет длину его плеч на относительную величину, равную ее амплитуде h :

$$\frac{\delta L}{L} = h.$$

При изменении длины плеча будет меняться оптический путь лазерного луча и как следствие будут меняться условия интерференции и интенсивность света на приемнике. Например, для американского интерферометра $L = 4$ км, и, следовательно, он будет способен зарегистрировать смещение зеркал интерферометра на величину $\delta L = 4 \cdot 10^{-16}$ см, что в сотни раз меньше размера ядра атома! Очевидно, чтобы достигнуть такой беспрецедентной точности, нужно решить массу грандиозных технических проблем. Этот крайне дорогостоящий проект (например, американский интерферометр потребовал затрат более миллиарда долларов) осуществляется в надежде обнаружить гравитационные волны из космоса, и надежду эту подкрепляют эволюционные расчеты астрофизиков.

Как показал еще А. Эйнштейн, источником гравитационных волн может быть любое тело, изменяющее свой квадрупольный момент инерции (тело должно быть не круглым!). Более подходящего источника, чем двойные звезды, и придумать трудно. Амплитуда гравитационных волн у источника пропорциональна его гравитационному потенциалу (фактически равна потенциалу, выраженному в единицах квадрата скорости света) и падает обратно пропорционально расстоянию. Радиус нейтронных



Рис. 5. Проект лазерного интерферометра LIGO, строящегося в США под Ливингстоном (штат Луизиана) и в Хэнфорде (штат Вашингтон) с целью детектирования гравитационных волн. Лазерный луч направляется по двум перпендикулярным направлениям (плечам), на концах которых расположены зеркала. После отражения лучи возвращаются к вершине и смешиваются

звезд и черных дыр фактически порядка гравитационного, и, следовательно,

$$h \propto \frac{R_g}{R},$$

это и есть их радиус. Частота гравитационной волны равна удвоенной орбитальной частоте.

Первые реальные детекторы смогут регистрировать только высокочастотные гравитационные волны с частотой от 100 до 1000 Гц, а в этом диапазоне можно будет видеть отдельные события, соответствующие последним фазам слияния двойных релятивистских звезд, продолжающимся считанные минуты. При этом дальность обнаружения в единицах расстояния между компонентами двойной попросту равна обратной чувствительности, помноженной на гравитационный радиус сливающихся звезд:

$$R_{\max} = h_{\min}^{-1} R_g = 3 \cdot 10^{26} \text{ см.}$$

Таким образом, уже первая очередь детектора будет способна обнаруживать сливающиеся релятивистские звезды солнечной массы на расстоянии 100 мегапарсек (примерно 300 млн световых лет). Вопрос только в том, какова частота таких событий в указанном объеме.

Ясно, что такие процессы заведомо идут¹, так как мы видим сейчас двойные нейтронные звезды (радиопульсары), сближающиеся с характерным временем, гораздо меньшим возраста Вселенной. Сейчас их наблюдается около 10, а их общее число в Галактике оценивается в 10 000. Разделив характерное время слияния радиопульсаров (10^{10} лет) на общее их число (10 000), получаем, что в среднем одно слияние в галактике типа нашей происходит раз в миллион лет. Так как в объеме, ограниченном сотней мегапарсек, примерно миллион галактик, то следует ожидать нескольких успешных актов детектирования в год. Именно этой оценкой руководствовались ученые, когда начинали строительство гравитационно-волнового интерферометра.

За последние десять лет, улучшая с каждым разом точность, с учетом нового понимания эволюции двойных мы неоднократно пытались оценить частоту слияния нейтронных звезд в галактике типа нашей и все время приходили к выводу, что реальная частота слияний гораздо выше — одно событие в 5000–10 000 лет, то есть в сто раз чаще. Сейчас сходные оценки получены тремя независимыми группами.

Это означает, что первая очередь гравитационно-волновых интерферометров будет регистрировать всплески гравитационных волн каждые не-

¹ Весьма вероятно, что слияние нейтронных звезд сопровождается гигантским выбросом релятивистской плазмы, которое наблюдается нами в виде гамма-всплесков (об этом см. [2]).

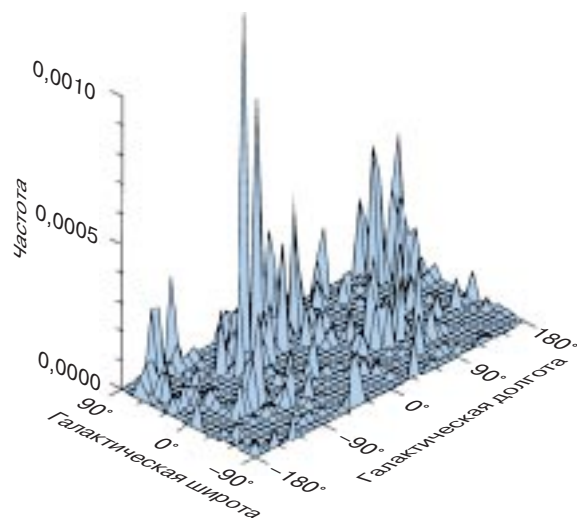


Рис. 6. Ожидаемая частота слияния двух нейтронных звезд по небу (в единицах событий на год на 1 кв. градус), построенная в угловых галактических координатах по распределению барionного вещества в ближайших 50 Мпк (Липунов, Назин, Панченко, Постнов, Прохоров, 1995)

сколько дней, а это уже не просто обнаружение, а большая наука (например, открытие W-бозона состоялось благодаря удачной регистрации всего лишь нескольких событий в год). Такая гигантская разница между наблюдательной оценкой и теоретическими расчетами возникает по одной простой причине. Дело в том, что в ходе эволюции задолго до слияния многие нейтронные звезды попросту перестают излучать радиопульсары, становясь ненаблюдаемыми, и истинное число двойных нейтронных звезд в сто раз превосходит количество двойных пульсаров.

Опираясь на лучшие астрономические данные о галактиках, специально был проведен популяционный синтез ближайших 50 Мпк Вселенной и смоделирована ожидаемая карта звездного неба в гравитационных волнах с указанием областей, откуда в первую очередь нужно ждать всплески гравитационных волн. Прямое открытие гравитационных волн, обладающих абсолютной проникаемостью, станет не только важнейшим событием всей фундаментальной физики, но уже в первые годы пролет свет на многие нерешенные проблемы теории эволюции звезд. Вполне вероятно, что здесь гравиастрономы могут опередить радиоастрономов в открытии черных дыр. Как показывают последние расчеты для широкого спектра эволюционных сценариев, всплески гравитационных волн от слияния двойных черных дыр могут приходиться на порядок чаще, чем от нейтронных звезд.

ИСКУССТВЕННАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Кажется, слишком амбициозное название нашей статьи начинает подтверждаться ее содержанием. Начав с эволюции отдельных двойных звезд, мы перешли к Галактике, а позже продемонстрировали необходимость и эффективность Машины Сценариев для космологических задач. А мы пока рассмотрели лишь самые модные, с Нобелевским “прикусом” проблемы.

А есть проблемы, которые уже давно ждут своего решения, и решить их без глобального подхода к эволюции барионного вещества Вселенной невозможно. Перечислим лишь некоторые из них: рентгеновские системы в соседних галактиках, вспышки звездообразования во Вселенной, космологические сверхновые, химическая эволюция барионной материи и синтез тяжелых элементов, эволюция фона космических лучей, объяснение рентгеновского фона Вселенной или по крайней мере той ее части, что связана с двойными релятивистскими звездами.

Согласно нашим расчетам, 10 млрд лет тому назад сверхновые в обычных галактиках вспыхивали не один раз в 50–100 лет, а десятками в год. Не надо быть специалистом, чтобы представить, к каким физическим последствиям это приводило в ту далекую эпоху, еще до сих пор доступную наблюдениям благодаря конечности скорости света.

Задавая темп рождения галактик, который в конце концов получается из теории развития возмущений во Вселенной, можно смоделировать звездный зоопарк всей Вселенной на разных этапах ее развития, даже с учетом образования неоднородно-

стей. Такая на первый взгляд фантастическая задача должна решаться в содружестве с космологами, и работа в этом направлении уже начата.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Липунов В.М.* В мире двойных звезд. М.: Наука, 1986. (Б-чка “Квант”. Вып. 52).
2. *Липунов В.М.* “Военная тайна” астрофизики // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 5. С. 83–89.
3. *Черепашук А.М.* Тесные двойные звезды на поздних стадиях эволюции // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 8. С. 84–92.
4. *Липунов В.М.* Астрофизика нейтронных звезд. М.: Наука, 1987.
5. *Гнедин Ю.Н.* Современная астрономия: Новые направления и новые проблемы // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 8. С. 76–83.
6. *Гнедин Ю.Н.* Небо в рентгеновских лучах // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 74–79.

* * *

Владимир Михайлович Липунов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ. Область научных интересов – астрофизика релятивистских звезд – нейтронных звезд, белых карликов и черных дыр. Автор более 100 научных работ, научных монографий и популярных книг, сборника задач по астрофизике.